Avances científicos, desarrollos tecnológicos y estrategias para la innovación sostenible en sistemas de agua y energía

Belkis Sulbarán Rangel

CENTRO UNIVERSITARIO DE TONALÁ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DEL AGUA Y LA ENERGÍA

Avances científicos, desarrollos tecnológicos y estrategias para la innovación sostenible en sistemas de agua y energía



Avances científicos, desarrollos tecnológicos y estrategias para la innovación sostenible en sistemas de agua y energía

Belkis Sulbarán Rangel
(Editora)







Avances científicos, desarrollos tecnológicos y estrategias para la innovación sostenible en sistemas de agua y energía. **Editora:** Belkis Sulbarán Rangel — *Guadalajara, México. 2026.*

Publicación electrónica digital: descarga y online; detalle de formato: EPUB.
Primera edición
D. R. © 2026. Belkis Sulbarán Rangel.

ISBN: **979-13-88349-53-9**

DOI: **https://doi.org/10.61728/AE26007977**

Edición y corrección: **Astra ediciones**

El contenido de esta obra ha sido sometido a un proceso de evaluación por pares bajo la modalidad de doble ciego, coordinado por la Editorial Astra Ediciones. Las opiniones, interpretaciones y contenidos expresados en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de las autoras y los autores. Asimismo, la responsabilidad sobre el uso de figuras, mapas, fotografías, ilustraciones y cualquier otro material sujeto a derechos de autor recae exclusivamente en las autoras y los autores.

Durante la preparación de esta obra, las autoras y los autores utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa, entre ellas ChatGPT (GPT-5) y Gemini, para mejorar la claridad, la gramática y la coherencia del texto, así como para apoyar la generación de algunas imágenes. Todas las contribuciones generadas mediante estas herramientas fueron revisadas, verificadas y editadas por las autoras y los autores, quienes asumen la responsabilidad total por el contenido final de esta publicación.

Todos los contenidos de esta publicación, se comparten bajo la licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional **(CC BY-NC-SA 4.0)**, Esto implica que no está autorizado el uso comercial de la obra original ni de las eventuales obras derivadas, las cuales deberán distribuirse bajo la misma licencia que rige la obra original. No obstante, se permite a terceros compartir el contenido siempre y cuando se reconozca debidamente la autoría y la publicación original en esta editorial.

HECHO EN MÉXICO | MADE IN MEXICO

Contenido

Prólogo 11

Capítulo 1
Del agua contaminada al agua limpia: Tecnologías para su tratamiento y purificación 15
Anahí Arreaga Cancino
Edison Javier Villota Gonzalez
Hasbleidy Palacios Hinestroza
Jesus Barrera Rojas
Belkis Sulbarán Rangel

Capítulo 2
Cuando el río crece sin avisar: Datos escasos, caudales extremos y gestión del riesgo hídrico en el río Shumuljá, Yajalón, Chiapas 37
Carolina Livier Recio Colmenares
Roxana Berenice Recio Colmenares
Aida Lucía Fajardo Montiel
César Alejandro García García

Capítulo 3
Análisis geoespacial frente a la crisis de inundaciones en la microcuenca del río San Juan de Dios..... 65
María del Sol Vázquez de León
Karla Benita Aranda Hernández
Laura Angélica Zamora Quintana
Juan Marcos García Martínez

Capítulo 4
De la vulnerabilidad hidráulica a la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible: Marco de evaluación para el drenaje urbano resiliente al clima en Guadalajara, México.....83
Jorge Cuevas Ferrel
Jesús Águila León
Carlos J. Vega Gómez
Néstor M. Ortiz Rodríguez

Capítulo 5
Materiales fotocatalíticos para la inhibición bacteriana en cuerpos de agua.....107
Angel Josue Iñiguez Hernandez
Aida Alejandra Guerrero de León
Jenny Arratia Quijada
María Guadalupe Pérez García
Edgar David Moreno Medrano

Capítulo 6
Nanomateriales magnéticos y economía circular: Aplicaciones sostenibles para el tratamiento de agua. Un caso de estudio con ferritas de cobre y cobalto.....125
Corazón Giovanna Morales Amaya
Jorge Enrique Rivera Salinas
Pablo Daniel Astudillo Sánchez

Capítulo 7
Polímeros inteligentes y nanomateriales para un agua más segura: Nuevas estrategias contra la contaminación por arsénico.....153
Gualberto Iglesias González
Aida Alejandra Guerrero de León
Fernando Enrique Espínola Portilla
José Benito Pelayo Vázquez
Jenny Arratia Quijada
María Guadalupe Pérez García

Capítulo 8
Transformando la luz solar en agua limpia y energía: El potencial de los evaporadores solares interfaciales 183
Rolando Alonso Guerra Santopietro
Víctor Hugo Romero Arellano
María Guadalupe Pérez García

Capítulo 9
Celdas fotosensibles para la generación sostenible de energía: Materiales, costos y avances actuales 209
Jean Flores Gómez
Juan Morales Rivera
Celina Sanchez Sanchez

Capítulo 10
Catalizadores avanzados para la producción más eficiente de biodiésel 237
José Juan Ávila Guerrero
José Benito Pelayo Vázquez
Fernando Enrique Espínola Portilla
Edgar David Moreno Medrano
Carolina Livier Recio Colmenares
María Guadalupe Pérez García

Capítulo 11
Materiales innovadores para desalación por congelación asistida con refrigeración solar 259
Beatriz Castillo Téllez
Margarita Castillo Téllez
José Armando Becerra Hernández
Carlos Javier Hernández Estrella

Capítulo 12
Modelado computacional para la gestión eficiente de energía en microrredes híbridas: Fundamentos, avances y perspectivas.....289
Cristian Daniel Chiñas Palacios
Jesús Águila León
Hugo Javier Coss y León Monterde

Capítulo 13
Implementación de la Norma ISO 50001 en CuTonalá: Una estrategia para la gestión energética y la sustentabilidad.....303
Araceli Sánchez Rosales

Capítulo 14
De las hormigas y las aves al agua y la energía: Cómo la naturaleza inspira nuevos algoritmos para la sostenibilidad 325
Jesús Águila León
César J. Aceves Jiménez
Beatriz Castillo Téllez
Gerardo A. Mejía Pérez

Capítulo 15
Cómo la inteligencia artificial ayuda a diseñar receptores solares más eficientes para almacenar energía 357
Mónica Camas Náfate
Jesus Aguila León
Delmer Gómez Heleria
Luis Alberto Borraz Jonapá

Capítulo 16
Ojos en el espacio y neuronas en la tierra: Cómo la inteligencia artificial limpia la mirada de los satélites para proteger nuestra agua.....385
Arely Daniela Ayala Reyes
Carlos Augusto Arellano Muro
Marlene Alejandra Pérez Villalpando
Virgilio Zúñiga Grajeda

Prólogo

El agua y la energía son recursos esenciales para el desarrollo de las sociedades y constituyen pilares fundamentales para garantizar el bienestar humano, la seguridad alimentaria, la salud pública y el crecimiento económico. Sin embargo, ambos enfrentan desafíos cada vez más complejos derivados del cambio climático, el crecimiento poblacional, la urbanización acelerada, la contaminación ambiental y la creciente demanda de recursos naturales. Ante este panorama, la generación de conocimiento científico, el desarrollo tecnológico y la formación de recursos humanos altamente especializados son elementos indispensables para construir un futuro más sostenible.

Con esta visión nace la obra *Avances científicos, desarrollos tecnológicos y estrategias para la innovación sostenible en sistemas de agua y energía*, un libro de divulgación científica que reúne el trabajo de estudiantes, egresados y profesores de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía de la Universidad de Guadalajara. Más que una recopilación de capítulos, esta obra representa el resultado del esfuerzo colectivo de una comunidad académica comprometida con la investigación, la innovación y la formación de profesionistas capaces de responder a los desafíos actuales en materia de agua y energía.

Cada capítulo refleja la diversidad de líneas de investigación desarrolladas en el posgrado, así como la calidad y pertinencia de los proyectos que se llevan a cabo en colaboración con instituciones nacionales e internacionales. Los temas abordados muestran cómo el conocimiento generado en la maestría trasciende el ámbito académico para proponer soluciones innovadoras a problemas reales relacionados con la gestión de los recursos hídricos, el tratamiento del agua, la eficiencia energética, el desarrollo de materiales avanzados, las energías renovables, la inteligencia artificial y la sostenibilidad.

Esta publicación es también un testimonio de la trayectoria y consolidación de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía, un programa que, desde su creación, ha impulsado la formación de investigadores y profesionales con una visión multidisciplinaria, promoviendo la integración de la ciencia, la ingeniería y la tecnología para contribuir al desarrollo sostenible de nuestro país. La participación de estudiantes y egresados como autores pone de manifiesto la capacidad del programa para formar recursos humanos que generan conocimiento de calidad y participan activamente en la divulgación científica.

Los capítulos que conforman esta obra ofrecen una visión amplia e interdisciplinaria de algunos de los principales desafíos y oportunidades en los sectores del agua y la energía. A través de sus páginas, el lector encontrará contribuciones que abarcan desde el tratamiento y la purificación del agua, la gestión del riesgo hídrico y la resiliencia frente al cambio climático, hasta el desarrollo de materiales avanzados, nanomateriales y tecnologías innovadoras para la descontaminación, desalinización y aprovechamiento sostenible de los recursos. Asimismo, el libro incorpora enfoques emergentes basados en la modelación computacional, la optimización energética, la inteligencia artificial, la biomimética y el análisis geoespacial, demostrando cómo la convergencia entre la ingeniería, la ciencia de materiales, las ciencias ambientales y las tecnologías digitales está impulsando soluciones más eficientes, resilientes y sostenibles para enfrentar los retos del desarrollo sostenible. En conjunto, los capítulos no solo presentan los avances científicos y tecnológicos más recientes, sino que también evidencian la importancia de fortalecer la colaboración interdisciplinaria para transformar el conocimiento en soluciones con impacto ambiental, social y económico.

Expresamos el más sincero reconocimiento a todos los autores por compartir su trabajo y entusiasmo, así como a los profesores que, mediante su labor académica y científica, han contribuido a la formación de nuevas generaciones de investigadores. De igual manera, agradecen a la Universidad de Guadalajara por impulsar espacios que fortalecen la divulgación del conocimiento y promueven una cultura de innovación, colaboración y compromiso con el desarrollo sostenible. Confiamos en que esta obra inspire nuevas ideas, fomente el intercambio de conocimientos

y contribuya a visibilizar el talento, la creatividad y el compromiso de quienes forman parte de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía, consolidando su papel como un referente en la formación de recursos humanos y en la generación de conocimiento para un futuro más sostenible.

Dra. Belkis Sulbarán Rangel
Editora

Capítulo 1

Del agua contaminada al agua limpia: Tecnologías para su tratamiento y purificación

Anahí Arreaga Cancino[1, 2]
Edison Javier Villota Gonzalez[3]
Hasbleidy Palacios Hinestroza[4]
Jesus Barrera Rojas[5]
Belkis Sulbarán Rangel[5]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26007984

[1] Instituto de Energías Renovables. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Chiapas, México.
[2] Centro Universitario de Tlaquepaque. Universidad de Guadalajara, Tlaquepaque, México.
[3] Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad de Guadalajara, Guadalajara México
[4] Centro Universitario de Tlajomulco. Universidad de Guadalajara, Tlajomutco, México
[5] Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara, Tonala México

Resumen

El agua constituye un recurso indispensable para la vida, el desarrollo social y el funcionamiento de los ecosistemas; sin embargo, su calidad se encuentra cada vez más comprometida debido al crecimiento poblacional, la urbanización, la industrialización, y genera un incremento en la generación de aguas residuales. Este capítulo presenta una visión integral sobre la problemática de la contaminación del agua, describiendo los principales tipos de contaminantes orgánicos, inorgánicos, biológicos y emergentes, así como sus efectos sobre la salud humana y el medio ambiente. Asimismo, se analizan los principales parámetros físicos, químicos y microbiológicos utilizados para evaluar la calidad del agua conforme a las normas oficiales, incluyendo demanda bioquímica y química de oxígeno, pH, conductividad, turbidez, entre otros indicadores, destacando el papel de las normas oficiales en el establecimiento de criterios para garantizar agua segura para consumo humano. Se describen las etapas fundamentales de los procesos convencionales y no convencionales, como las membranas en el tratamiento y purificación del agua, así como las perspectivas y oportunidades para garantizar agua limpia para consumo. En conjunto, se resalta la necesidad de integrar tecnologías convencionales y avanzadas, así como la integración de materiales sostenibles, para mejorar la eficiencia de los sistemas de tratamiento y contribuir al acceso universal a agua limpia y segura, en concordancia con los objetivos de sostenibilidad y protección de los recursos hídricos.

Introducción

La creciente expansión demográfica, la urbanización acelerada y el desarrollo industrial han incrementado significativamente la demanda mundial de agua, así como la generación de aguas residuales. Como consecuencia, la contaminación de los recursos hídricos y el desarrollo

de tecnologías eficientes para su tratamiento se han convertido en uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI (Dutta y Bose, 2026). El agua constituye un recurso esencial para la vida y el funcionamiento de los ecosistemas. Aunque aproximadamente el 71 % de la superficie terrestre está cubierta por agua, menos del 1 % corresponde a agua dulce disponible para consumo humano directo, lo que evidencia una importante paradoja hídrica global (Latifah e Iryani, 2026).

El agua es un recurso indispensable para los organismos vivos, ya que representa cerca del 60 % de la composición del cuerpo humano y participa en funciones fisiológicas fundamentales, como el transporte de nutrientes, la eliminación de desechos metabólicos y la regulación de la temperatura corporal (Azrour et al., 2022). Sin embargo, la calidad y disponibilidad de este recurso se encuentran cada vez más comprometidas por las actividades domésticas, industriales y agropecuarias. De acuerdo con las Naciones Unidas, durante 2022 alrededor de 113 000 millones de metros cúbicos de aguas residuales fueron descargados al ambiente sin un tratamiento seguro previo, generando impactos significativos sobre ríos, lagos y ecosistemas costeros (Dutta y Bose, 2026). La problemática actual no se limita únicamente a la escasez de agua, sino también a la presencia de contaminantes cada vez más complejos y difíciles de remover. Las descargas de aguas residuales incorporan a los cuerpos receptores una amplia variedad de contaminantes convencionales y emergentes, entre los que destacan materia orgánica, microorganismos patógenos, metales pesados, pesticidas, productos farmacéuticos, compuestos de cuidado personal y disruptores endocrinos (Gutiérrez Rodríguez y Ángel, 2025).

En México, esta situación resulta particularmente preocupante; de acuerdo con los datos reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), durante 2022 el 65 % de los sitios monitoreados en cuerpos de agua superficiales fueron clasificados como contaminados o fuertemente contaminados de acuerdo con el indicador de coliformes fecales, reflejando el deterioro progresivo de la calidad del agua en numerosos ríos, lagos y presas del país (CONAGUA, 2024). Para enfrentar esta problemática, las plantas de tratamiento de agua y aguas residuales emplean una serie de operaciones unitarias agrupadas convencionalmente en tratamientos primarios, secundarios y terciarios. Los tratamientos

primarios están orientados principalmente a la remoción física de sólidos suspendidos y materiales sedimentables, mientras que los procesos secundarios utilizan mecanismos biológicos para reducir la carga orgánica. Aunque estas tecnologías han demostrado ser efectivas para remover contaminantes convencionales, presentan limitaciones importantes frente a muchos contaminantes emergentes presentes en concentraciones cada vez mayores (Gutiérrez Rodríguez y Ángel, 2025).

En este contexto, los tratamientos avanzados y, particularmente, las tecnologías de membranas han adquirido una relevancia estratégica dentro del sector hídrico, debido a los procesos como la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, que permiten la separación selectiva de contaminantes mediante barreras físicas altamente eficientes, alcanzando remociones superiores al 90 % para numerosos compuestos orgánicos e inorgánicos (Gutiérrez Rodríguez y Ángel, 2025). No obstante, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos importantes, siendo el ensuciamiento de membranas (membrane fouling) uno de los principales obstáculos.

Ante este panorama, el presente capítulo aborda de manera integral la evolución de las tecnologías empleadas en el tratamiento y purificación del agua. Inicialmente, se presentan las generalidades del recurso hídrico, los principales parámetros utilizados para evaluar su calidad y los sistemas convencionales de tratamiento. Posteriormente, se analizan las tecnologías avanzadas basadas en membranas, así como las innovaciones recientes relacionadas con el uso de materiales sostenibles derivados de la celulosa y los nanocristales de celulosa, los cuales han demostrado un elevado potencial para mejorar la selectividad, permeabilidad y resistencia al ensuciamiento de las membranas.

El agua: un recurso indispensable para la vida

La superficie de la Tierra contiene alrededor del 71 % de agua, que en su mayoría es salada y se encuentra contenida en la tierra, el aire y los organismos vivos que existen en ella (Latifah e Iryani, 2026). De este porcentaje, menos del 1 % es apta para el consumo humano (Salama et al., 2021), por lo que se vuelve de vital importancia el tratamiento del

agua para hacerla potable; es debido a razones de salubridad pública, así como su conservación.

De acuerdo con la definición de la Real Academia Española, el agua (del latín aqua) es una sustancia cuyas moléculas están formadas por la combinación de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno; es líquida, inodora, insípida e incolora (Real Academia Española, 2001). El agua es esencial para la vida humana, puesto que constituye aproximadamente el 60 % de la composición corporal, interviniendo en numerosos procesos fisiológicos, incluyendo el transporte de nutrientes, la regulación de la temperatura corporal y el mantenimiento de las funciones celulares, tisulares y orgánicas (Azrour et al., 2022). Asimismo, el agua destinada al consumo humano debe ser apta para su ingesta, por lo que no debe contener sustancias o agentes de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo que representen un riesgo para la salud. Además, debe cumplir con características organolépticas adecuadas, tales como ser inodora, incolora, transparente y presentar un sabor aceptable para los consumidores.

La Norma Oficial Mexicana 127 establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano; en la Tabla 1 se presentan las características necesarias que debe cumplir el suministro de agua para ser segura y preservar la salud humana.

Tabla 1. *Límites permisibles de acuerdo con Normal Oficial Mexicana 127.*

Característica	**Limite Permisible**
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas NTU o su equivalente

Característica	**Limite Permisible**
Aluminio	0.2
Arsénico	0.05
Bario	0.7
Cadmio	0.005
Cianuros (CN-)	0.07
Cloro	0.2-1.50
Cloruros (Cl-)	250
Cobre	2
Cromo	0.05
Dureza (CaCO3)	500
Fenoles	0.001
Fierro	0.3
Fluoruros	1.5
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos	10
Nitritos	0.05
Nitrógeno amoniacal	0.5
pH	6.5-8.5
Plaguicidas (microgramos/l)	0.03
Clordano (isómeros)	0.3
DDT (isómeros)	1
Gamma-HCH (lindano)	2
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epoxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20
2,4 D	50
Plomo	0.025
Sodio	200
Sólidos disueltos	1000

Característica	**Limite Permisible**
Sulfatos (SO4-)	400
Sustancias activas (Azul de Metileno)	0.5
Trihalometanos	0.2
Zinc	5
Radiactividad alfa	0.1
Radiactividad beta	1

Los ríos y arroyos de México constituyen una red hidrográfica de 633 000 kilómetros de longitud, en la que destacan cincuenta y un ríos principales por los que fluye el 87 % del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65 % de la superficie territorial continental del país.

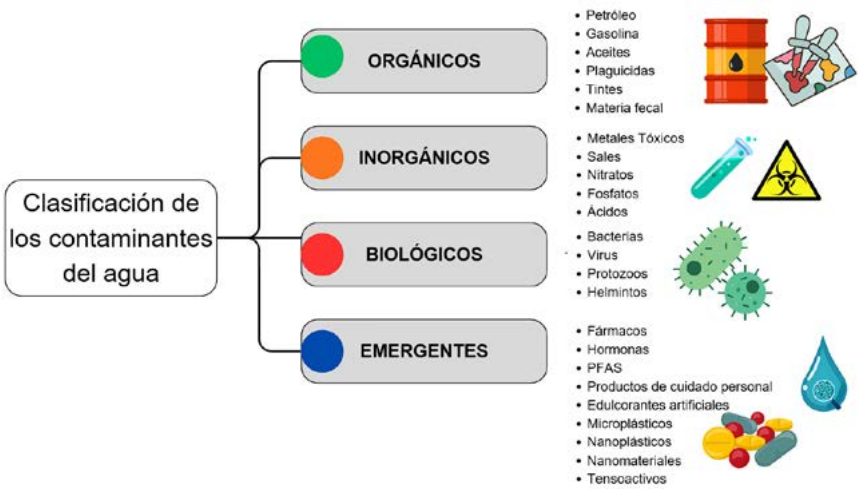
Para propósitos de administración de las aguas nacionales, la CONAGUA ha definido 731 cuencas hidrológicas, cuyas disponibilidades se encuentran publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF), de las cuales 104 muestran problemas de disponibilidad como resultado de su mala gestión, es decir, su sobreexplotación, sobreconcesión y contaminación. De acuerdo con un estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos de la CNDH, en el 2018 estima que solo el 35.36 % de aguas residuales son saneadas, que se vierten a las redes de descarga y cuerpos de agua 89.2 m^3/s de aguas contaminadas sin tratamiento alguno y 138.74 m^3/seg de aguas residuales de origen industrial. El 54 % de las aguas negras se descargan en ríos o arroyos y que más del 70 % de los ríos, lagos y presas está con algún grado de contaminación.

¿Por qué se contamina el agua?

Los contaminantes del agua atentan no solo contra la salud humana, sino también contra el ecosistema. Los contaminantes del agua se dividen en cuatro grandes grupos (Kordbacheh y Heidari, 2023): contaminantes orgánicos, inorgánicos, biológicos y emergentes. Algunos ejemplos de los tipos de contaminantes se describen en la Figura 2. Los cuales describen cada uno de esos contaminantes:

- Contaminantes orgánicos: son sustancias químicas que comparten cuatro características básicas: persistencia, bioacumulación, potencial de transporte a gran distancia en el medio y efectos adversos.
- Contaminantes inorgánicos: son compuestos metálicos y minerales no metálicos, que provienen de las actividades domésticas, industriales y agroindustriales, como el plomo que generan efectos adversos en todos los sistemas orgánicos corporales.
- Contaminantes biológicos: son organismos vivientes que afectan la salud humana como los protozoos, virus y bacterias.
- Contaminantes emergentes: Entre los contaminantes emergentes del agua se incluyen esteroides, hormonas, productos farmacéuticos y de cuidado personal, edulcorantes artificiales, tensioactivos, sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), nanomateriales y microplásticos, entre otros. Estos compuestos son incorporados continuamente al ambiente como resultado de las actividades humanas y del estilo de vida moderno. Su presencia en cuerpos de agua se atribuye principalmente a las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, así como a la limitada capacidad de los sistemas convencionales de tratamiento para eliminarlos por completo.

Figura 1. *Contaminantes en el agua*.



Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los efectos negativos del consumo de agua contaminada se listan algunos ejemplos en la Tabla 2.

Tabla 2. *Efectos de contaminantes en la salud (Reyes et al., 2016)*

Contaminante	Efecto en la Salud
Microorganismos patógenos: bacterias, virus, protozoos y helmintos (lombrices)	Enfermedades infecciosas y parasitarias gastrointestinales, diarrea, vómitos, muerte.
Arsénico	Precursor del Cáncer.
Plomo	Tóxico de carácter acumulativo, se fija en el esqueleto e impide el metabolismo del calcio.
Radón	Toxicidad, efectos cancerígenos, teratogénicos y mutagénicos.
Nitratos	Toxicidad, efectos cancerígenos, teratogénicos y mutagénicos.
Mercurio	Toxicidad, efectos en el sistema cardiovascular y efectos cancerígenos.
Cadmio	Absorción en riñón e hígado, desequilibrio en procesos de nutrición.

¿Cómo sabemos si el agua es segura?

La caracterización del agua tiene como objetivo conocer sus atributos físicos, químicos y biológicos con el propósito de definir su aptitud para uso humano, agrícola, industrial, recreacional o como recurso asimilatorio de descargas contaminantes. Estos parámetros definen su uso y permiten visualizar los aspectos relacionados con su composición química, microbiológica, económica, legal y de tratamiento para su aprovechamiento (Verma et al., 2025).

Existen dos normas que se encargan de la calidad del agua:

- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, esta norma enfocada a la salud ambiental se vigila los límites de permisibles de calidad y tratamientos al que debe someterse el agua para su potabilización para uso y consumo humano (ver tabla 1).

- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Con base en estas normas se contemplan las siguientes técnicas para determinar dichos parámetros de calidad:

- Prueba de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Las mediciones de la DBO determinan el total de oxígeno necesario para nivelar el carbono orgánico, indican la biodegradabilidad y la presencia de materia orgánica *in situ* que es metabolizada por las bacterias que se encuentran en el agua en un periodo de 5 días (Hasan et al., 2019). La oxidación microbiana de la materia orgánica es una de las reacciones que constituyen una de las demandas de oxígeno ejercida por los microorganismos heterotróficos (Galinha et al., 2018). El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se han inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno, en condiciones que favorecen el desarrollo de microorganismos.
- Prueba de Demanda Química de Oxígeno (DQO): La demanda química de oxígeno es un parámetro analítico que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. Es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente oxidante fuerte como el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en solución ácida. La oxidación de la materia orgánica se efectúa mediante la ebullición de la muestra con una mezcla de ácido sulfúrico y un exceso de dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$, que son sometidas a digestión por medio de un reactor de digestión y oxidadas a CO_2 y agua (H_2O) (Romero Rojas, 2018).
- Prueba de color: El agua es incolora; sin embargo, adquiere color por efecto de partículas coloidales cargadas negativamente, es decir, por la presencia de iones y por el contacto con desechos orgánicos, la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales (Romero Rojas, 2018). Existen dos tipos de color en el agua: el color aparente y el color verdadero; el color aparente incluye el color de las sustancias en solución, coloidales y material suspendido; este color es

determinado sobre la muestra original sin filtración. El color verdadero es el color de la muestra una vez removida su turbidez y es el que se analiza mediante el espectrómetro UV-Vis (Romero Rojas, 2018).

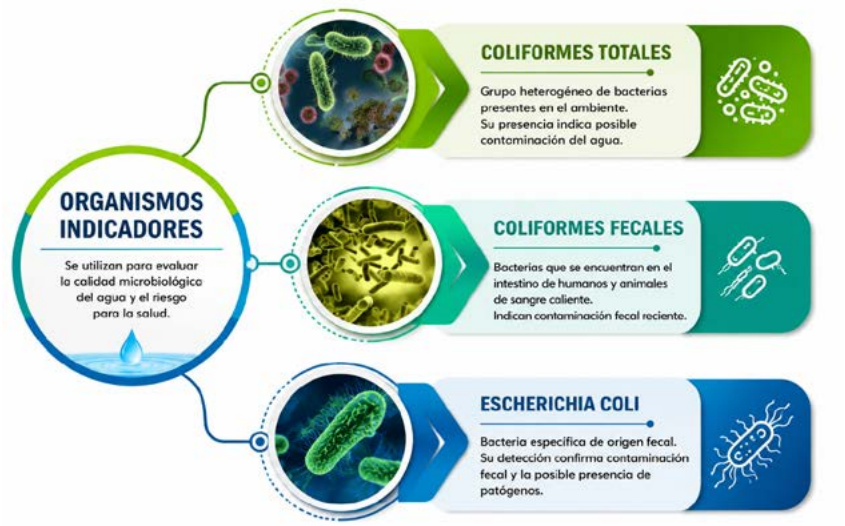
- Turbiedad: Es el efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua, es decir, que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la muestra de agua, y es generada por dispersiones coloidales, partículas gruesas, materia orgánica e inorgánica, organismos planctónicos y microorganismos (Romero Rojas, 2018).

  Actualmente, el método más utilizado para medir la turbidez es el método nefelométrico, haciendo uso de un turbidímetro, mostrando valores en NTU (por sus siglas en inglés Nephelometric Turbidity Unit). En este método se compara la intensidad de la luz dispersada por la muestra con la intensidad de luz dispersada por una suspensión estándar de referencia.
- Concentración de iones de hidrógeno (pH): La concentración de hidrogeniones se expresa por el valor de pH; en otras palabras, la actividad del ion hidrógeno, para el caso de aguas, es un factor que debe controlarse dentro de un intervalo favorable a los organismos. El pH se define como el logaritmo inverso de la concentración del ion hidrógeno.
- Conductividad: La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica dependiente de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación; es por ello que este valor se utiliza como un indicativo del contenido de sólidos disueltos. En otras palabras, es la suma de los cationes o aniones en las fuentes de suministro de agua y viene dada por micromhos/cm (Romero Rojas, 2018).
- Coliformes totales: Las coliformes son una familia de bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gramnegativas, no producen esporas y tienen forma bacilar; se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo los humanos. La presencia de bacterias coliformes es un indicio de que el agua puede estar contaminada con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición (Sembiring et al., 2026). Entre este gran grupo se encuentran: *Escherichia* spp.,

Klebsiella spp., *Shigella* spp., *Salmonella* spp. y *Yersinia* spp. (ver Figura 3).

- Coliformes fecales o termotolerantes: Bacterias en forma de bacilos, aerobias o anaerobias facultativas, no esporuladas, que fermentan la lactosa con producción de gas a 45 °C después de 48 horas y se encuentran establecidas en el tracto digestivo de animales y humanos (Mora Alvarado, 2024).
- *Escherichia coli* (E. coli): Está compuesta de un número de especies de bacterias que comparten características comunes, tales como la forma, el hábitat o comportamiento, y la misma es una especie del grupo de coliformes fecales. La cual está adaptada para crecer a la temperatura intestinal. E. coli reside en el intestino de los animales de sangre caliente, un medio ambiente que provee un suministro amplio de nutrientes para el crecimiento bacteriano. El tiempo de duplicación del E. coli en este hábitat primario es estimado en dos días. Esto sugiere que la mitad de la población total reside en el hábitat primario del huésped y la otra mitad en el medio ambiente externo (hábitat secundario) (Mora Alvarado, 2024).

Figura 2. *Relaciones de los grupos de coliformes.*



Fuente: Elaboración propia.

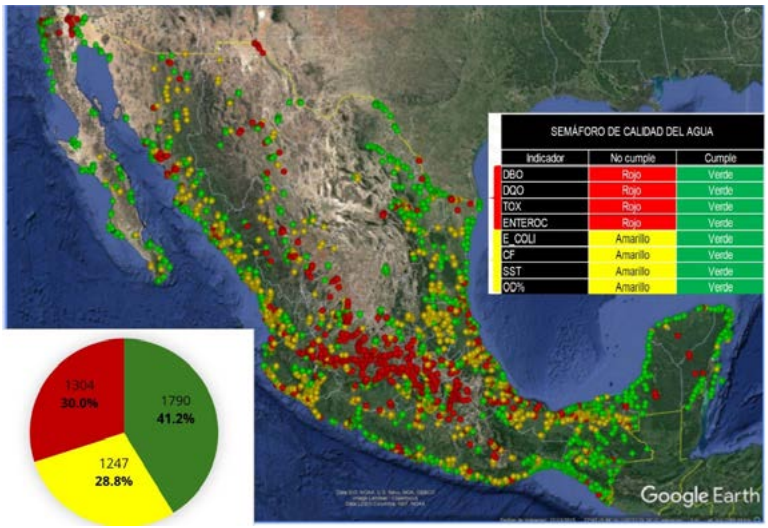
Problemática del agua en México

Miles de millones de personas en todo el mundo carecen de acceso a agua potable y saneamiento (Ranade y Bhandari, 2014). La contaminación continua de los recursos de agua dulce como resultado del aumento de las actividades humanas no solo deteriora la calidad de estos recursos hídricos en peligro de extinción; además, amenazan a la fauna y flora acuática, terrestre y aérea (Rafieian, Jonoobi et al. 2019). De acuerdo con la información de la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (CONAGUA), en México existen 1304 sitios de abastecimiento de agua superficial contaminados, es decir, el 30 % de los ríos, arroyos, lagos, lagunas, presas y zonas costeras, por lo que se necesitan sistemas de tratamiento que atiendan y mejoren la calidad del agua para los consumidores.

Según datos del INEGI, el estado de Chiapas cuenta con 306 tomas de agua para el abastecimiento público, de las cuales en su mayoría se registra que no cumplen con la calidad establecida por la NOM 127, como se observa en la Figura 4 del mapa interactivo de la calidad del agua a nivel nacional con la siguiente clasificación:

- Rojo: Los resultados de calidad del agua indican incumplimiento en más de uno de los indicadores y la calidad es contaminada a fuertemente contaminada.
- Amarillo-naranja: Los resultados indican el incumplimiento en algunos de los parámetros y la calidad del agua es aceptable.
- Verde: Los resultados indican el cumplimiento de la mayoría de los parámetros y la calidad del agua es de buena a excelente.

Figura 3. *Mapa nacional de la calidad del agua*.

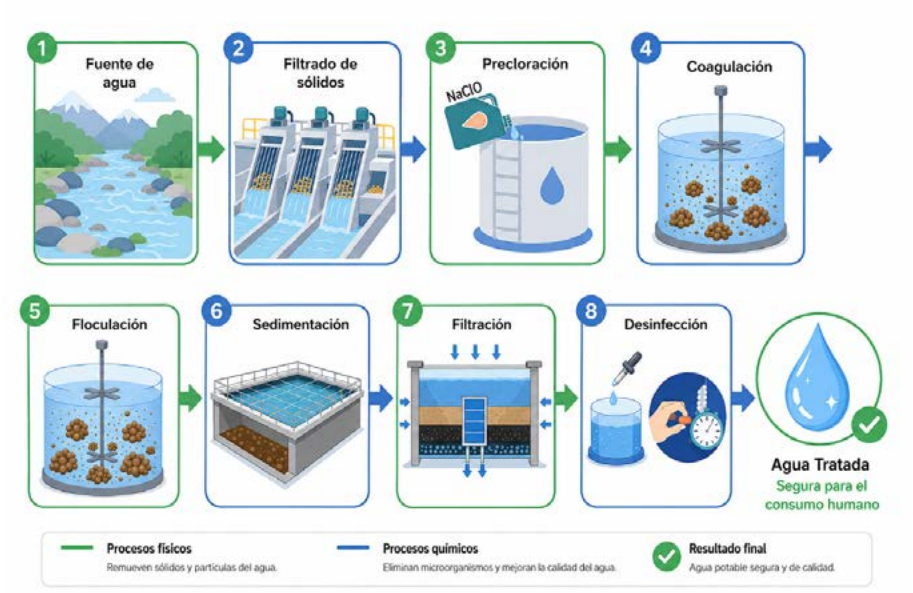


Fuente: CONAGUA, 2024.

Calidad del agua para consumo humano

En las plantas de tratamiento de agua potable, el agua superficial sufre cambios significativos en su calidad física, química y bacteriológica, con el objetivo de no ser peligrosa para la salud o la vida de los consumidores y satisfaga los estándares de calidad (NOM-127-SSA1-1994) para el agua potable. Para ello la fuente de agua pasa por varios procesos como se describen en la Figura 4 (Rodríguez, 2024).

Figura 4. *Esquema del proceso de potabilización de agua.*



Fuente: Elaboración propia.

La potabilización del agua es el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que se aplican al agua proveniente de ríos, lagos, presas o acuíferos para eliminar impurezas, microorganismos y sustancias que puedan representar un riesgo para la salud humana. El objetivo es transformar el agua cruda en agua potable, es decir, agua que cumpla con los estándares de calidad establecidos por la normatividad y que sea segura para el consumo humano. El proceso de potabilización del agua consta de diferentes etapas:

1. Filtrado de sólidos: En esta fase se remueven los sólidos en suspensión.
2. Precloración: La adición de cloro en el punto inicial tiene dos funciones: desinfección y oxidación. Con el objetivo de eliminar hierro, manganeso, sulfuros, amoniaco y la reducción del crecimiento de algas y otros microorganismos presentes en el agua. Esto se consigue añadiendo cloro hasta conseguir cloro residual libre en el agua (*breakpoint*) normalmente se busca 0.5 ppm de cloro libre. El cloro se puede adicionar en forma de cloro líquido, solución de hipoclorito

de sodio o tabletas de hipoclorito de calcio (Ocampo Rodríguez et al., 2022).

3. Coagulación-floculación: Las impurezas se encuentran en el agua superficial en suspensión y materia coloidal, entre ellas: arcilla, sílice, hierro, otros metales y sólidos orgánicos. La mayoría de ellas se eliminan por sedimentación, pero algunas de estas impurezas son demasiado pequeñas para obtener un proceso de eliminación eficiente; por lo tanto, se utilizan procesos de coagulación y floculación, los cuales causan un incremento de tamaño del flóculo y su rápida aglomeración, disminuyendo así el tiempo de sedimentación de las partículas, mediante la adición de sales químicas, en su mayoría cargadas positivamente (sales de aluminio, sales de hierro o polielectrolitos), que desplazan los iones negativos y reducen efectivamente el tamaño de carga. Entre los floculantes más usados se tienen: sulfato de aluminio, polielectrolitos, cloruro férrico, sulfato ferroso y férrico (Pérez González et al., 2020).
4. Sedimentación: Proceso de separación de un líquido de sólidos o de un líquido de mayor densidad mediante el trasiego de la capa superior después de que la materia más pesada ha sedimentado por efecto de la gravedad.
5. Filtración: Consiste en hacer pasar el agua que todavía contiene materias en suspensión a través de un medio filtrante que permite el paso del líquido, pero no el de las partículas sólidas, las cuales quedan retenidas en el medio filtrante. El medio filtrante más utilizado es la arena, sobre un lecho de grava como soporte.
6. Desinfección: Existen tres tipos básicos de desinfección:

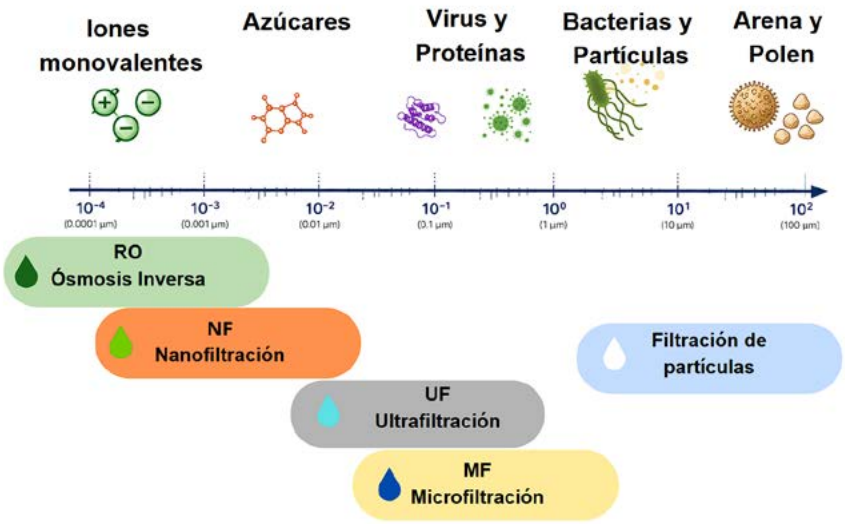
- Tratamientos físicos: Son los menos utilizados; dentro de ellos se incluye la aplicación de calor, pero además de ser costoso, deja mal sabor, ya que elimina el oxígeno disuelto y las sales presentes en el agua. Otro de los procesos que se utilizan es el dejar pasar el tiempo, para que los gérmenes fecales disminuyan su concentración al ser el agua retenida en ambiente hostil.
- Tratamientos químicos: Los agentes químicos desinfectantes más utilizados son el cloro, el dióxido de cloro y el ozono, siendo el cloro el más utilizado por su capacidad de oxidar sustancias inorgánicas

(hierro, manganeso, nitritos, etc.) que causan mal sabor, corrosión y deterioro en las líneas de transmisión del agua. La acción microbicida del cloro como algicida, bactericida y, en menor medida, virucida, además de favorecer la formación de flóculos, bajo costo y seguridad.
- Radiación: Las radiaciones más útiles son UV, los rayos X y los rayos gamma. La radiación que más se utiliza es la UV debido a su costo; un inconveniente que tiene este tratamiento es su baja eficacia frente a la turbidez del agua.

Las membranas: Una nueva generación de filtros para el agua

Las membranas son barreras selectivas entre dos fases (Mulder y Mulder, 1996); la separación por membranas es un proceso que se logra a través de la transferencia de masa de gas/líquido o líquido/líquido sin dispersión de una fase a otra. Los componentes centrales de la tecnología de separación por membrana, ya sea natural o sintética, serían la permeabilidad selectiva, la purificación y enriquecimiento de solutos y solventes de dos componentes o de múltiples componentes a través de energía externa o de diferencia de potencial químico como la fuerza motriz (Liu et al., 2021). Esta tecnología se clasifica principalmente en cinco categorías (ver Figura 6): microfiltración, ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), ósmosis inversa (RO) y ósmosis directa (FO) de acuerdo con su fuerza de transporte y tamaño de poro (Liu et al., 2021). Un sistema de purificación por medio de membranas consta de:
- Una fase permeable o semipermeable: que a la vez se divide en dos fluidos: la alimentación (F) y el permeado (S).
- La membrana polimérica: que es esencialmente una barrera que permite el paso selectivo de las especies químicas, controlando las velocidades relativas de transporte, que idealmente produce una fase enriquecida con componentes (F) y una fase de salida (S) sin ellos.
- Un dispositivo de filtración, el cual es una celda con agitación.
- Sistema de regulación de presión.

Figura 5. *Procesos comunes de membrana para remover contaminantes de varios tamaños del agua*



Fuente: Adaptado y modificado de (Anis et al., 2019).

Retos y perspectivas para garantizar agua limpia para consumo

Aunque los procesos convencionales de tratamiento de agua continúan desempeñando un papel fundamental para la remoción de materia orgánica, microorganismos patógenos y sólidos suspendidos. La presencia de otros contaminantes emergentes como microplásticos, residuos farmacéuticos, hormonas, nanopartículas, que no siempre son eliminados mediante tratamientos convencionales, evidencia las limitaciones de estas tecnologías. En consecuencia, el desarrollo de tecnologías avanzadas más eficientes, selectivas y sostenibles que permitan mejorar el sistema de abastecimiento y tratamiento de aguas, garantizando la disponibilidad a largo plazo, continúa vigente.

En este contexto, a nivel mundial, garantizar el acceso a agua limpia y segura para su consumo representa un gran desafío ambiental, tecnológico y de salud pública. Las investigaciones recientes han evaluado desde el

diseño de tecnologías enfocadas en eliminar contaminantes hasta sistemas de tratamiento más integradores. Además de la incorporación de materiales de origen renovable como celulosa y sus derivados. Estos últimos han abierto nuevas oportunidades para el desarrollo de membranas, las cuales favorecen la eliminación simultánea de metales pesados, colorantes, compuestos orgánicos persistentes y contaminantes emergentes.

De manera complementaria, en los últimos años, el aprendizaje automático, el modelado computacional y la inteligencia artificial permiten analizar grandes volúmenes de información para optimizar parámetros de operación y anticipar procesos, volviéndose un apoyo importante en la toma de decisiones para el diseño de sistemas de tratamiento y tipos de escalado industrial. En perspectiva, la tendencia de los tratamientos de agua será hacia sistemas híbridos que integren procesos químicos, físicos y biológicos con materiales avanzados de bajo impacto ambiental, plataformas inteligentes de monitoreo y esquemas de recuperación de recursos que respondan a contaminantes complejos y que no comprometan la sostenibilidad del proceso. Sin embargo, para que esto sea posible, la gestión integral del recurso hídrico se debe acompañar de políticas públicas, estrategias tecnológicas y colaboración multidisciplinaria que facilite la implementación de soluciones sostenibles capaces de garantizar el acceso universal a agua de calidad para las generaciones presentes y futuras.

Referencias

Anis, S. F., Hashaikeh, R. & Hilal, N. (2019). Microfiltration membrane processes: A review of research trends over the past decade. *Journal of Water Process Engineering*, *32*, 100941. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100941

Azrour, M., Mabrouki, J., Fattah, G., et al. (2022). Machine learning algorithms for efficient water quality prediction. *Modeling Earth Systems and Environment*, *8*(2), 2793–2801. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01293-4

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). *Estadísticas del agua en México 2023*. https://share.google/R3IDrwZglvMKeeU5c

Dutta, S. & Bose, S. (2026). Polymers for water purification and treatment. En S. Banerjee & M. K. Jindal (Eds.), *The polymer-water nexus: Addressing water challenges for a sustainable future* (pp. 63–90). Springer Nature Switzerland.

Galinha, C. F., Sanches, S. & Crespo, J. G. (2018). Chapter 6: Membrane bioreactors. En P. Luis (Ed.), *Fundamental modelling of membrane systems* (pp. 209–249). Elsevier.

Gutiérrez Rodríguez, W. A. (2025). Eficiencia de los procesos de tratamiento primario, secundario y terciario en la eliminación de contaminantes prioritarios en aguas residuales. *Journal of Multidisciplinary Novel Journeys Explorations*, *3*(1), 1–12.

Hasan, M. M., Saeed, T. & Nakajima, J. (2019). Integrated simple ceramic filter and waste stabilization pond for domestic wastewater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, *14*, 100319. https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100319

Kordbacheh, F. & Heidari, G. (2023). Water pollutants and approaches for their removal. *Materials Chemistry Horizons*, *2*(2), 139–153.

Latifah, N. & Iryani, N. (2026). Analysis of the effect of price and population on clean water demand of PDAM (A case study of Payakumbuh City, 2008–2022): Analisis pengaruh harga dan jumlah penduduk terhadap permintaan air bersih PDAM (Studi kasus: Kota Payakumbuh tahun 2008-2022). *Ekonomipedia: Jurnal Ekonomi, Manajemen dan Bisnis*, *41*(1), 54–63.

Liu, Y., Liu, H. & Shen, Z. (2021). Nanocellulose-based filtration membrane in industrial waste water treatment: A review. *Polymers*, <(18), 5398. https://doi.org/10.3390/polym14185398

Mora Alvarado, D. (2024). Evolución de las guías microbiológicas de la OMS para evaluar la calidad del agua de consumo humano. Periodos 1984-1994-2004-2011 y 2024. *Revista Tecnología en Marcha*, *37*(8), 110-120.

Mulder, M. & Mulder, J. (1996). *Basic principles of membrane technology*. Springer Netherlands.

Ocampo Rodríguez, D. B., Vázquez Rodríguez, G. A., Martínez Hernández, S., et al. (2022). Desinfección del agua: Una revisión a los tratamientos convencionales y avanzados con cloro y ácido peracético. *Ingeniería del Agua*, *26*(3), 185–204.

Pérez González, A. C., Espinoza Reyes, F. J., García Cortés, N., et al. (2020). Coagulación, floculación y sedimentación para la clarificación de aguas residuales. En *Red Iberoamericana de Academias de Investigación (Ed.), Innovación en biotecnología II* (pp. 73–82).

Real Academia Española. (2001). *Diccionario de la lengua española* (22.ª ed.). Espasa Calpe.

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., et al. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+D*, *16*(2), 66–77.

Rodríguez, J. P. (2024). *Potabilización del agua: Teoría aplicada*. https://digital.casalini.it/9789587789317

Romero Rojas, J. A. (2018). *Aguas residuales industriales.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Salama, A., Abouzeid, R., Leong, W. S., et al. (2021). Nanocellulose-based materials for water treatment: Adsorption, photocatalytic degradation, disinfection, antifouling, and nanofiltration. *Nanomaterials*, *11*(11), 3008. https://doi.org/10.3390/nano11113008

Sembiring, F., Regita Sari, T., Nasution, G. S., et al. (2026). Multidrug-resistant Escherichia coli and its role in stunting: Evidence from a cross-sectional study in Indonesia. *The Journal of Infection in Developing Countries*, *20*(5), 660–669.

Verma, S., Verma, S., Ramakant, R., et al. (2025). Comprehensive assessment of physico-chemical and biological parameters in water quality monitoring: A review of contaminants, indicators, and health impacts. *International Journal of Horticulture, Agriculture and Food Science*, *9*(2), 10–19.

Capítulo 2

Cuando el río crece sin avisar: Datos escasos, caudales extremos y gestión del riesgo hídrico en el río Shumuljá, Yajalón, Chiapas

Carolina Livier Recio Colmenares[1]
Roxana Berenice Recio Colmenares[1]
Aida Lucía Fajardo Montiel[1]
César Alejandro García García[2]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26007991

[1] Departamento de Estudios del Agua y la Energía. Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara, Tonala México
[2] Departamento de Innovación Tecnologíca. Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara, Tonala México

Resumen

Las inundaciones son una de las expresiones más visibles del riesgo hídrico en territorios donde la lluvia intensa, el relieve, la ocupación urbana y la infraestructura interactúan de manera desigual. En cuencas pequeñas y de respuesta rápida, como la del río Shumuljá en Yajalón, Chiapas, el agua puede concentrarse en poco tiempo y convertirse en una avenida súbita capaz de afectar viviendas, vialidades, puentes, servicios públicos y la seguridad de la población. El problema se vuelve más complejo cuando la información hidrológica local es limitada, porque la planeación territorial y el diseño de obras hidráulicas dependen de estimaciones confiables de caudales máximos. Este capítulo presenta, en lenguaje de divulgación científica, la utilidad del análisis de frecuencia y de la regionalización hidrológica para estudiar eventos extremos en sitios con registros escasos. A partir de un estudio hidrológico previo, se explican las condiciones físicas de la cuenca, los antecedentes de inundación, la ruta metodológica seguida y los principales resultados obtenidos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Los resultados muestran que el gasto de diseño aumenta de 40.91 m^3/s para un periodo de retorno de 2 años a 213.19 m^3/s para un periodo de 100 años, lo que evidencia la necesidad de considerar escenarios extremos en la evaluación de infraestructura y en las políticas de prevención. Más allá del cálculo, el caso permite reflexionar sobre la importancia de fortalecer las redes de monitoreo, actualizar estudios hidrológicos, conservar las zonas de infiltración y comunicar la información técnica de manera clara a autoridades y ciudadanía. El capítulo muestra que la ciencia del agua no solo produce números: también puede orientar decisiones para construir comunidades más seguras, resilientes y sostenibles.

Introducción

El agua sostiene la vida, la producción de alimentos, la generación de energía, la salud pública y el funcionamiento cotidiano de las ciudades. Sin embargo, cuando su dinámica natural se combina con asentamientos expuestos, cauces alterados, infraestructura insuficiente o falta de información, el agua también puede convertirse en una amenaza. Esta aparente contradicción permite entender por qué la gestión del agua no puede limitarse a asegurar disponibilidad; también debe considerar los riesgos derivados de su exceso, especialmente en regiones donde las lluvias intensas pueden generar avenidas súbitas.

Las inundaciones forman parte del ciclo hidrológico, pero sus consecuencias no son naturales en sentido estricto. El daño que provocan depende de la forma en que el territorio ha sido ocupado, de la capacidad de las obras hidráulicas, de la conservación de las cuencas y de la preparación institucional para actuar antes, durante y después de una emergencia. Por ello, hablar de inundaciones implica hablar al mismo tiempo de ciencia, planeación, gobernanza y justicia territorial.

En las últimas décadas, la discusión internacional sobre clima y agua ha subrayado que los eventos hidrometeorológicos extremos continúan generando impactos sociales, económicos y ambientales importantes. El informe *State of the Global Climate 2024* de la Organización Meteorológica Mundial señaló que los fenómenos extremos asociados con calor, lluvias intensas, tormentas e inundaciones siguieron provocando consecuencias relevantes para las sociedades y las economías (World Meteorological Organization [WMO], 2025). De manera complementaria, los reportes del IPCC han advertido que el cambio climático modifica la frecuencia e intensidad de diversos extremos hidrológicos en varias regiones, lo que exige fortalecer la adaptación, la prevención y los sistemas de alerta (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021).

En México, la gestión del riesgo hídrico enfrenta un reto adicional: la disponibilidad desigual de información. Existen regiones con estaciones hidrométricas y climatológicas históricas, pero también hay cuencas pequeñas, zonas montañosas y localidades con registros cortos, discontinuos o inexistentes. Esta situación dificulta el diseño de puentes, alcantarillas,

bordos, canales, sistemas de drenaje y obras de protección, porque estas decisiones requieren conocer qué caudales pueden presentarse bajo diferentes escenarios de lluvia.

El problema no es meramente técnico. Cuando no se cuenta con información suficiente, las decisiones se toman con mayor incertidumbre. Una obra puede quedar subdimensionada; un cauce puede ser ocupado sin valorar adecuadamente su zona de desbordamiento; una comunidad puede carecer de alertas oportunas; o un programa de prevención puede concentrarse en reaccionar después de la emergencia, en lugar de anticiparla. Por eso, la hidrología aplicada tiene una función social: traducir datos de lluvia, caudal y territorio en información útil para proteger vidas, bienes e infraestructura.

El río Shumuljá, en Yajalón, Chiapas, constituye un caso pertinente para explicar esta problemática. Se trata de un cauce que atraviesa una zona urbana y que forma parte de una cuenca pequeña, con relieve accidentado y antecedentes de inundaciones. Estas condiciones hacen que el estudio de sus caudales máximos sea indispensable para entender el riesgo y para orientar medidas de prevención. Al mismo tiempo, la disponibilidad limitada de registros obliga a utilizar herramientas que permitan aprovechar información regional y establecer estimaciones razonables.

Este capítulo retoma un estudio hidrológico previo sobre el control de inundaciones en Yajalón y lo transforma en un texto de divulgación científica. El objetivo no es presentar únicamente cálculos, sino explicar por qué se realizan, qué significan y cómo pueden contribuir a la gestión sostenible del territorio. La pregunta central que guía el capítulo es sencilla, aunque técnicamente exigente: ¿cómo estimar el tamaño de una avenida extrema en una cuenca donde no se cuenta con toda la información que se desearía?

Responder esta pregunta requiere entender tres ideas. La primera es que las cuencas pequeñas pueden responder de forma muy rápida a la lluvia intensa. La segunda es que el periodo de retorno no predice fechas, sino probabilidades de excedencia. La tercera es que, cuando los datos locales son escasos, la regionalización hidrológica permite aprender de cuencas vecinas o semejantes. A partir de estas ideas, el caso del río Shumuljá permite mostrar cómo la ciencia del agua puede apoyar decisiones de prevención, diseño y ordenamiento territorial.

De la lluvia al riesgo: Por qué importan los datos

En términos cotidianos, una cuenca puede imaginarse como un territorio que recoge el agua de lluvia y la conduce hacia un cauce principal. Cuando llueve, una parte del agua se infiltra en el suelo, otra se evapora o es interceptada por la vegetación y otra escurre sobre la superficie. La proporción entre estos caminos depende de la pendiente, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la intensidad de la lluvia y la forma en que la población ha modificado el territorio.

En una cuenca pequeña y con pendientes pronunciadas, el tiempo que tarda el agua en llegar al cauce principal puede ser corto. Esto significa que una tormenta intensa puede producir un aumento rápido del nivel del río. Este tipo de respuesta es particularmente relevante en zonas urbanas, porque el margen de reacción para proteger a la población puede ser reducido. En esos casos, la prevención depende de haber estudiado la cuenca con anticipación, no de improvisar durante la emergencia.

Los datos hidrológicos permiten reconstruir la memoria del agua. Una estación hidrométrica registra niveles o caudales; una estación climatológica registra precipitación, temperatura y otras variables; los mapas topográficos describen pendientes y elevaciones; y los registros históricos permiten identificar eventos dañinos. Cuando estas piezas se articulan, es posible estimar qué tan grande podría ser una avenida y qué zonas podrían resultar afectadas.

El reto aparece cuando esa memoria es incompleta. En muchas cuencas no hay estaciones suficientes, los registros son cortos o existen periodos sin medición. También puede ocurrir que los datos hayan sido obtenidos con métodos distintos o bajo condiciones que cambiaron con el tiempo. Esto obliga a evaluar la calidad de la información antes de usarla en cálculos de diseño. En hidrología, una serie de datos no se utiliza solo porque exista; debe analizarse si es homogénea, consistente y representativa.

La homogeneidad significa que los datos pueden considerarse parte de un mismo comportamiento estadístico. Por ejemplo, si una cuenca fue fuertemente urbanizada a mitad del periodo de registro, los escurrimientos posteriores podrían no ser comparables con los anteriores. La independencia indica que los eventos incluidos en la muestra no duplican

el mismo fenómeno. Estas condiciones son importantes porque el análisis de frecuencia se basa en la idea de que los datos históricos ayudan a inferir la probabilidad de eventos futuros (Stedinger et al., 1993).

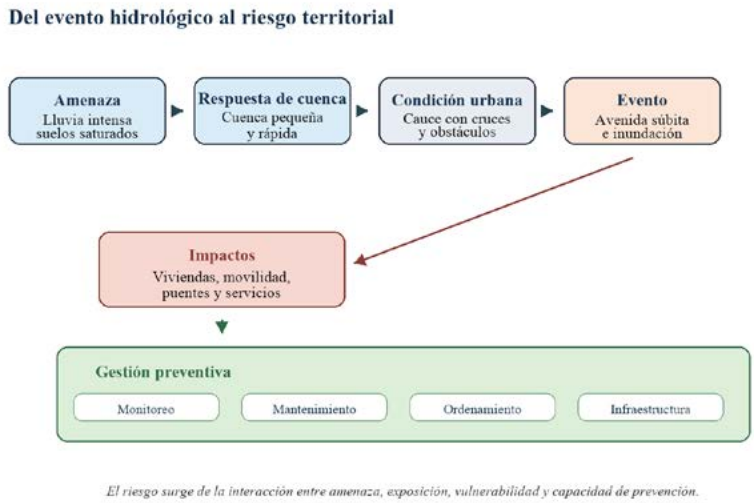
Para el público no especializado, puede parecer extraño que una decisión de infraestructura dependa de estadísticas. Sin embargo, las obras hidráulicas siempre se diseñan frente a la incertidumbre. No se puede saber con exactitud qué tormenta ocurrirá en un año específico, pero sí se puede estimar la magnitud de eventos con determinadas probabilidades. Por eso se habla de caudales de diseño: valores que sirven como referencia para dimensionar obras o evaluar si la infraestructura existente tiene capacidad suficiente.

Cuando los datos locales son escasos, abandonar el análisis no es una opción. La población sigue expuesta, los cauces siguen recibiendo escurrimientos y las lluvias extremas pueden ocurrir. En este contexto, la regionalización hidrológica permite aprovechar información de estaciones cercanas o de cuencas con características semejantes. Su lógica es comparable a consultar la experiencia de territorios vecinos para comprender el comportamiento probable de una cuenca poco medida.

La regionalización no elimina la incertidumbre, pero puede reducirla cuando se aplica con criterio. No basta con elegir estaciones cercanas; se requiere revisar si las cuencas comparten condiciones fisiográficas, climáticas o hidrológicas. También se deben identificar posibles inconsistencias en las series y seleccionar métodos adecuados. La literatura especializada ha mostrado que la similitud entre cuencas, la calidad de los datos y la selección del método son factores decisivos para obtener estimaciones útiles (Hosking y Wallis, 1997; Merz y Blöschl, 2005; Razavi y Coulibaly, 2013).

En términos de gestión pública, contar con una estimación imperfecta pero técnicamente sustentada suele ser mejor que no contar con ninguna base. Lo importante es comunicar claramente los alcances y límites del estudio. Una estimación de caudales máximos no debe presentarse como una verdad absoluta, sino como una herramienta para orientar decisiones que deben complementarse con inspecciones de campo, mantenimiento de cauces, ordenamiento urbano y sistemas de alerta.

Figura 1. *Cadena conceptual del riesgo hídrico en una cuenca urbana de respuesta rápida.*



Fuente: Elaboración propia.

El Río Shumuljá y el territorio de Yajalón

Yajalón se localiza en el estado de Chiapas, en una región donde el relieve, las lluvias y la red hidrográfica configuran un territorio sensible a los procesos de escurrimiento. La cabecera municipal se ubica aproximadamente a 819 metros sobre el nivel del mar y forma parte de un entorno con sierras, pendientes y corrientes que responden de manera marcada a la precipitación (INEGI, 2010).

Figura 2. *Ubicación general del Río Shumuljá y la zona urbana de Yajalón, Chiapas.*



Fuente: Elaboración propia con base en imagen satelital de Esri World Imagery y mapa de Chiapas

El río Shumuljá atraviesa la zona urbana de Yajalón y recibe aportaciones de arroyos, escurrimientos laterales y vertientes directas. La cuenca considerada en el estudio tiene un área aproximada de 48.22 km² hasta su confluencia con el río Grande. Aunque esta superficie puede parecer pequeña en comparación con grandes cuencas nacionales, en términos de riesgo urbano es suficiente para generar avenidas significativas cuando la lluvia se concentra en poco tiempo.

Una de las características relevantes de esta cuenca es su respuesta rápida. En un territorio con pendientes pronunciadas, el agua no permanece mucho tiempo en la superficie antes de dirigirse al cauce principal. Si además existen suelos saturados, pérdida de cobertura vegetal, obstáculos en el cauce o estructuras de cruce con capacidad limitada, el riesgo de desbordamiento aumenta. En este tipo de contextos, los procesos locales son tan importantes como los datos regionales.

El estudio base identificó una serie de aportaciones al río Shumuljá en su paso por la zona urbana. La cuenca alta aporta alrededor de 1 895.12 hectáreas al inicio del área urbana. Posteriormente, se incorporan apor-

taciones de los arroyos Azufre, San Antonio, Agua Fría, San Jorge y San Francisco, además de vertientes directas por ambas márgenes. En conjunto, las áreas de aportación acumuladas alcanzan cerca de 3 209.10 hectáreas en el tramo urbano analizado (Recio Colmenares, 2014).

La importancia de estos datos no radica solo en conocer superficies. Cada aportación representa agua que puede incorporarse al cauce durante una tormenta. Si varias subcuencas responden al mismo tiempo, el caudal en el tramo urbano puede incrementarse con rapidez. Esta es una de las razones por las cuales el análisis hidrológico debe considerar la cuenca como un sistema y no únicamente el tramo visible del río dentro de la ciudad.

Yajalón también cuenta con antecedentes de inundaciones. El estudio base reporta eventos relevantes en 1962, 1991, 2003 y 2010. En particular, el evento de 2010, asociado con las lluvias de la tormenta tropical Matthew, provocó daños severos, entre ellos arrastre de vehículos, colapso de puentes, suspensión de energía eléctrica y pérdidas humanas (Recio Colmenares, 2014). Este antecedente ayuda a comprender que el problema no es hipotético: existe una memoria territorial del riesgo.

La suspensión del servicio eléctrico durante eventos de inundación muestra con claridad el vínculo entre agua y energía. Cuando una avenida afecta redes eléctricas, caminos, sistemas de bombeo o servicios de comunicación, la emergencia se amplifica. El nexo agua-energía no se limita a la generación hidroeléctrica o al consumo de energía para tratamiento de agua; también incluye la vulnerabilidad de los servicios energéticos frente a amenazas hidrometeorológicas.

En este sentido, el caso del río Shumuljá se ajusta al enfoque de gestión integral del agua y la energía. Permite analizar cómo un problema hídrico puede afectar infraestructura, movilidad, electricidad y seguridad pública, y cómo la información técnica puede apoyar decisiones de prevención. El capítulo no solo trata de calcular caudales; trata de entender cómo esos caudales se traducen en riesgo para un territorio habitado.

Tabla 1. *Elementos territoriales relevantes del caso de estudio*

Elemento	Descripción para el caso del río Shumuljá
Ubicación	Zona urbana de Yajalón, Chiapas, en un territorio con relieve accidentado y lluvias importantes.
Área de cuenca considerada	Aproximadamente 48.22 km² hasta la confluencia con el río Grande.
Aportaciones relevantes	Cuenca alta, arroyos Azufre, San Antonio, Agua Fría, San Jorge, San Francisco y vertientes laterales.
Área acumulada en tramo urbano	Cerca de 3 209.10 ha de aportación acumulada en el tramo analizado.
Antecedentes de inundación	Eventos documentados en 1962, 1991, 2003 y 2010.
Implicación territorial	Riesgo para viviendas, vialidades, puentes, servicios públicos y continuidad de servicios energéticos.

Periodo de retorno: Una idea sencilla que suele malinterpretarse

El análisis de frecuencia hidrológica se utiliza para estimar la magnitud de eventos extremos asociados con diferentes probabilidades de ocurrencia. En el lenguaje técnico, estas probabilidades suelen expresarse mediante periodos de retorno. Un periodo de retorno de 10 años no significa que el evento ocurrirá exactamente cada diez años; significa que, en promedio estadístico, ese evento tiene una probabilidad anual de excedencia de 1/10, es decir, 10 %.

Esta aclaración es fundamental para la comunicación del riesgo. Muchas personas interpretan un evento de 100 años como algo que solo ocurrirá una vez en un siglo. Esa interpretación puede generar una falsa sensación de seguridad. En realidad, un evento con periodo de retorno de 100 años tiene una probabilidad anual de excedencia de 1 %. Puede ocurrir dos veces en un periodo corto, o no ocurrir durante mucho tiempo. La hidrología trabaja con probabilidades, no con calendarios.

La diferencia se vuelve más clara al considerar la vida útil de una obra. Si una alcantarilla, un puente o un canal se diseña para operar durante 30 años, la probabilidad acumulada de que enfrente un evento de cierto periodo de retorno puede ser mayor que la probabilidad anual. Por ejemplo, un evento de 100 años tiene 1 % de probabilidad anual, pero su probabilidad de ser excedido al menos una vez en 30 años es cercana a 26 %. Esta forma de lectura ayuda a tomar decisiones más prudentes.

El periodo de retorno tampoco debe analizarse aislado de las consecuencias. Un evento frecuente, pero de baja magnitud, puede afectar solo el drenaje ordinario, mientras que un evento menos frecuente puede dañar infraestructura crítica, interrumpir servicios públicos o poner en riesgo vidas humanas. Por eso, la selección del periodo de retorno de diseño depende del tipo de obra, de su importancia, de la exposición de la población y de la tolerancia social al riesgo.

En el caso del río Shumuljá, se estimaron caudales asociados con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Esta escala permite observar cómo cambia la magnitud de los caudales conforme disminuye la probabilidad anual de excedencia. También facilita una lectura gradual del riesgo: no todos los eventos son iguales, y no todas las decisiones requieren el mismo nivel de protección.

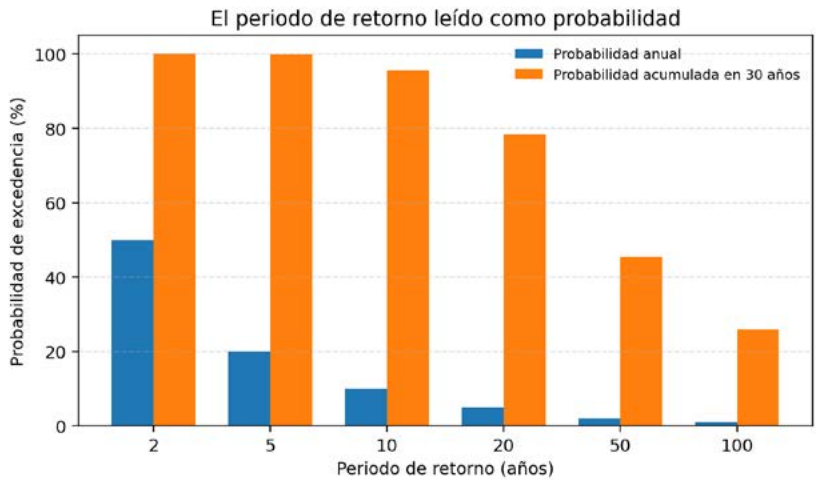
Para fines de divulgación, resulta útil traducir los periodos de retorno a dos preguntas: ¿qué tan probable es que este evento sea superado en un año cualquiera?, y ¿qué tan probable es que sea superado durante la vida útil de una obra o durante el periodo de exposición de una comunidad? Este cambio de lenguaje permite que la población y los tomadores de decisiones entiendan mejor la relevancia de los resultados.

Ejemplo rápido
Un evento de 100 años no “espera” cien años para ocurrir. Significa una probabilidad anual aproximada de 1 %. Si una comunidad permanece expuesta durante varias décadas, la probabilidad acumulada aumenta.

Tabla 2. *Lectura probabilística de los periodos de retorno*

Periodo de retorno (años)	Probabilidad anual de excedencia (%)	Probabilidad de excedencia en 30 años (%)
2	50	100
5	20	99.9
10	10	95.8
20	5	78.5
50	2	45.5
100	1	26

Figura 3. *Comparación entre probabilidad anual y probabilidad acumulada durante 30 años*



Elaboración propia a partir de la relación probabilística estándar P = 1 − (1 − 1/T)^n.

Ruta metodológica: Convertir datos limitados en información útil

El estudio del río Shumuljá siguió una ruta metodológica orientada a estimar caudales máximos en una cuenca con información limitada. Esta ruta puede resumirse en cinco momentos: caracterizar la cuenca, revisar la información disponible, evaluar la calidad estadística de las series,

aplicar análisis de frecuencia y utilizar regionalización hidrológica para estimar caudales de diseño.

El primer momento consistió en conocer el territorio. En hidrología, esta etapa es indispensable porque la respuesta de una cuenca no depende solo de la cantidad de lluvia. La forma de la cuenca, la pendiente, la longitud del cauce principal, la cobertura vegetal, el tipo de suelo, la urbanización y las estructuras existentes influyen en la rapidez con la que el agua llega al río. Esta caracterización permite pasar de una visión abstracta del dato a una comprensión territorial del riesgo.

El segundo momento fue la revisión de información hidrológica e hidrometeorológica disponible. En sitios con registros escasos, cada dato debe examinarse con cuidado. No se trata únicamente de reunir números, sino de valorar su confiabilidad. Una serie con errores, huecos o cambios no documentados puede conducir a estimaciones poco útiles. Por ello, el estudio consideró pruebas estadísticas de homogeneidad e independencia, entre ellas Helmert, t de Student, Cramer y Anderson, utilizadas tradicionalmente para valorar la consistencia de series en análisis hidrológicos.

El tercer momento fue el análisis de frecuencia. Esta etapa permitió estimar valores asociados con diferentes periodos de retorno. En general, el análisis de frecuencia ajusta distribuciones de probabilidad a los datos extremos disponibles, como máximos anuales de precipitación o caudal. Entre las distribuciones empleadas en hidrología se encuentran Gumbel, Normal, Lognormal y otras funciones que buscan representar la variabilidad de eventos extremos (Chow et al., 1988; Stedinger et al., 1993).

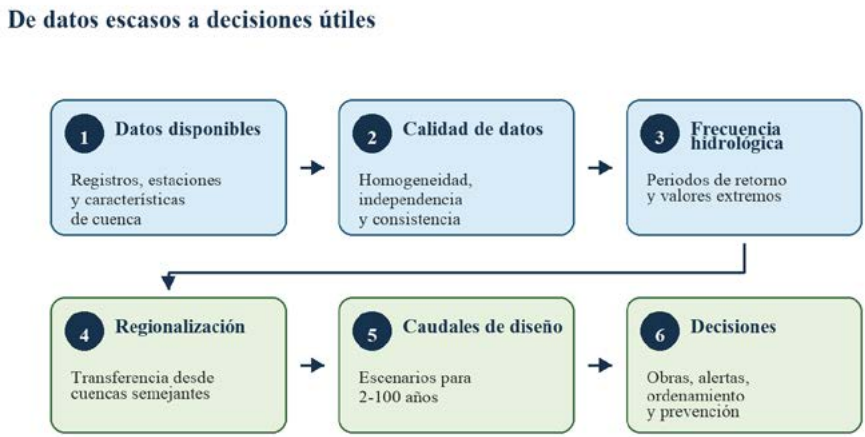
El cuarto momento fue la regionalización hidrológica. Cuando los registros locales no son suficientes, se recurre a información de estaciones cercanas o de cuencas hidrológicamente semejantes. Esto puede realizarse mediante relaciones estadísticas, regiones homogéneas, momentos-L o modelos que vinculan caudales con atributos físicos de las cuencas. El principio general es aprovechar la información regional para estimar valores en un sitio poco instrumentado (Hosking y Wallis, 1997; Ouarda et al., 2001).

El quinto momento fue la interpretación de resultados para la gestión del riesgo. Esta etapa es tan importante como el cálculo. Un caudal máximo estimado debe traducirse en preguntas aplicadas: ¿qué obras

podrían resultar insuficientes?, ¿qué tramos requieren mantenimiento?, ¿qué zonas urbanas están más expuestas?, ¿qué información adicional se necesita?, ¿cómo comunicar el riesgo a la población?

La metodología empleada no debe entenderse como una receta universal. Cada cuenca exige revisar la información disponible y ajustar los métodos a sus condiciones. Sin embargo, el caso del río Shumuljá muestra una lógica general aplicable a muchas cuencas pequeñas de México: cuando el dato local es limitado, se debe combinar conocimiento del territorio, análisis estadístico y aprendizaje regional.

Figura 4. *Ruta metodológica para estimar caudales máximos en cuencas con información limitada*.



Fuente: Elaboración propia.

Una decisión técnica importante
La regionalización no sustituye el monitoreo local. Es una estrategia para trabajar con la información disponible mientras se fortalecen las redes de medición y los sistemas de alerta.

Resultados principales: lo que dicen los caudales estimados

Los resultados muestran un incremento progresivo de los caudales de diseño conforme aumenta el periodo de retorno. Este comportamiento es esperado: los eventos menos frecuentes suelen asociarse con lluvias más intensas y con escurrimientos mayores. Sin embargo, observar los valores concretos permite dimensionar la magnitud del problema para el caso de Yajalón.

Para un periodo de retorno de 2 años, el gasto de diseño estimado fue de 40.91 m^3/s. Para 5 años, el valor aumentó a 78.97 m^3/s; para 10 años, a 107.88 m^3/s; para 20 años, a 137.53 m^3/s; para 50 años, a 179.79 m^3/s; y para 100 años, a 213.19 m^3/s. Esto significa que el evento de 100 años representa un caudal más de cinco veces superior al estimado para el evento de 2 años.

La diferencia es relevante porque una obra hidráulica diseñada únicamente para eventos frecuentes podría funcionar en condiciones ordinarias, pero fallar ante avenidas extraordinarias. En una zona urbana atravesada por un cauce, esa falla puede traducirse en desbordamientos, erosión, afectaciones a viviendas, interrupción de vialidades, daño a puentes y pérdida de servicios básicos.

El estudio también muestra que la precipitación efectiva de 1 hora aumenta de 8.47 mm para un periodo de retorno de 2 años a 44.14 mm para un periodo de 100 años. Esta precipitación efectiva representa la parte de la lluvia que contribuye al escurrimiento después de considerar pérdidas o abstracciones. Su crecimiento ayuda a explicar el aumento de los caudales estimados.

La precipitación de 24 horas ajustada al área también se incrementa con el periodo de retorno, de 49.63 cm a 106.04 cm. Aunque estos valores deben interpretarse dentro de la metodología del estudio base, sirven para mostrar que el análisis no se limita al caudal final: integra información de lluvia, transformación lluvia-escurrimiento y comportamiento territorial de la cuenca.

Entre las metodologías evaluadas, el estudio identificó que la regresión lineal presentó el comportamiento más confiable dentro del conjunto

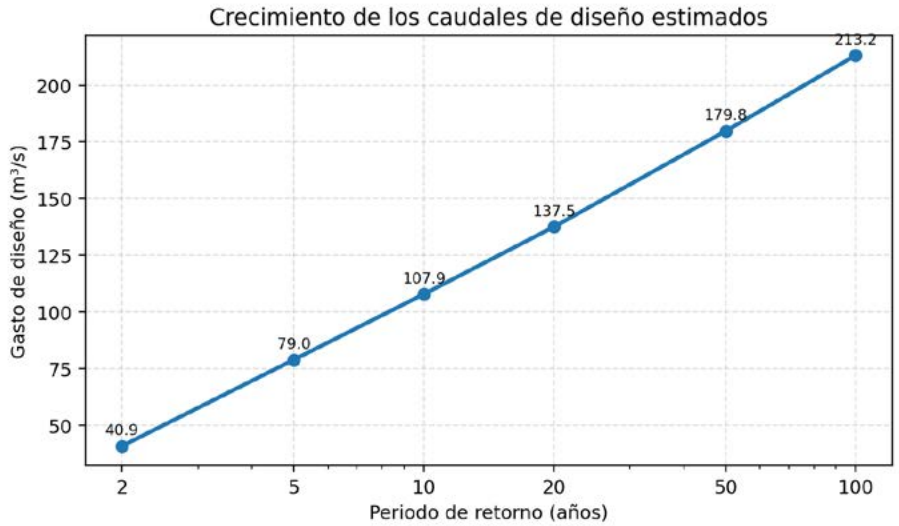
de métodos aplicados. Esta conclusión debe leerse con prudencia: no significa que la regresión lineal sea siempre el mejor método para todas las cuencas, sino que, para la información disponible y las condiciones del caso, proporcionó estimaciones consistentes y defendibles.

La utilidad de los resultados radica en que ofrecen una base para comparar la capacidad de la infraestructura existente con los caudales que podrían presentarse. También permiten priorizar acciones de inspección y mantenimiento en tramos críticos. Desde una perspectiva de protección civil, estos valores pueden convertirse en insumos para elaborar mapas de riesgo, rutas de evacuación, protocolos de alerta y mensajes de prevención.

Tabla 3. *Caudales de diseño estimados para la cuenca del río Shumuljá*

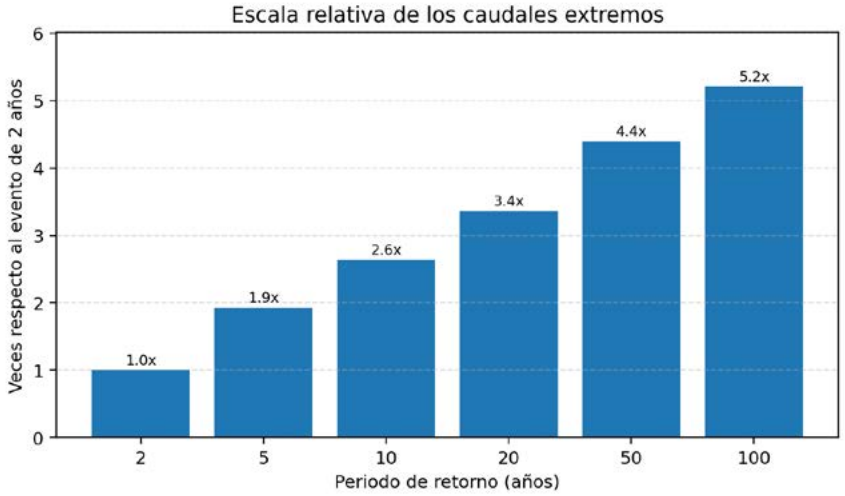
Periodo de retorno (años)	Precipitación 24 h ajustada al área (cm)	Precipitación efectiva en 1 h (mm)	Gasto de diseño (m^3/s)	Veces respecto a T=2
2	49.63	8.47	40.91	1.00
5	64.78	16.35	78.97	1.93
10	74.70	22.34	107.88	2.64
20	84.11	28.47	137.53	3.36
50	96.64	37.22	179.79	4.39
100	106.04	44.14	213.19	5.21

Figura 5. *Crecimiento de los caudales de diseño estimados para diferentes periodos de retorno.*



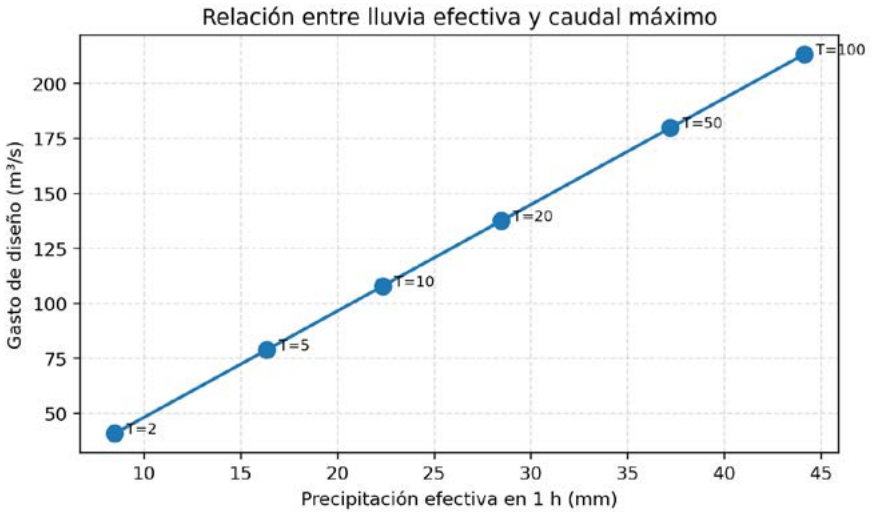
Fuente: Elaboración propia con datos del estudio base.

Figura 6. *Incremento relativo de los caudales respecto al evento de 2 años.*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. *Relación entre precipitación efectiva y gasto de diseño.*



Fuente: Elaboración propia con datos del estudio base.

Discusión: De los números a la gestión del riesgo

Los caudales estimados no son únicamente cifras para una tabla. Representan escenarios de escurrimiento que pueden afectar de forma concreta a la población de Yajalón. Por ello, la interpretación de resultados debe conectar la hidrología con la infraestructura, el ordenamiento territorial y la comunicación social del riesgo.

Una primera lectura se relaciona con la capacidad hidráulica del cauce y de las estructuras de cruce. Si un puente, alcantarilla o tramo canalizado no puede conducir los caudales asociados con eventos extremos, el agua buscará rutas alternativas. Estas rutas pueden coincidir con calles, patios, zonas bajas o márgenes ocupadas. En ese momento, el problema deja de ser únicamente hidráulico y se convierte en un problema urbano y social.

Una segunda lectura se vincula con el mantenimiento. Incluso una estructura adecuadamente diseñada puede perder capacidad si acumula sedimentos, residuos sólidos, vegetación u obstáculos. En cuencas que transportan detritos orgánicos e inorgánicos durante las tormentas, el mantenimiento preventivo es una medida de reducción del riesgo. No

siempre requiere grandes obras; a veces requiere inspección, limpieza, coordinación institucional y vigilancia comunitaria.

Una tercera lectura tiene que ver con la conservación de la cuenca. La pérdida de cobertura vegetal, la erosión y la ocupación de zonas de infiltración pueden aumentar el escurrimiento superficial. En términos simples, cuando el territorio pierde capacidad de retener agua, el río recibe más escurrimiento en menos tiempo. Por ello, la prevención de inundaciones no debe limitarse al tramo urbano del cauce; también debe mirar las laderas, los suelos y las áreas de aporte.

Una cuarta lectura se relaciona con el crecimiento urbano. Los cauces tienen memoria hidráulica: aunque durante años parezcan estables, pueden recuperar espacios de inundación durante eventos extremos. Construir demasiado cerca de ellos aumenta la exposición. El análisis de caudales máximos puede ayudar a delimitar zonas de riesgo, orientar usos de suelo y evitar que nuevas viviendas o servicios se ubiquen en áreas vulnerables.

Una quinta lectura se refiere a la energía. Las inundaciones pueden interrumpir el suministro eléctrico, dañar equipos, afectar sistemas de bombeo y reducir la capacidad de comunicación durante emergencias. En comunidades donde la respuesta depende de alumbrado, radio, telefonía, bombeo o sistemas de alerta, la continuidad energética forma parte de la gestión del riesgo hídrico. Este enfoque amplía el concepto de nexo agua-energía hacia la resiliencia territorial.

El caso también muestra la importancia de comunicar la incertidumbre. Todo estudio hidrológico tiene límites, especialmente cuando se trabaja con datos escasos. Reconocer esa incertidumbre no debilita el análisis; al contrario, lo vuelve más honesto y útil. La decisión pública debe saber qué tan robustas son las estimaciones, qué información falta y qué acciones pueden reducir el margen de error en el futuro.

La gestión del riesgo requiere convertir el lenguaje técnico en mensajes comprensibles. Una autoridad municipal, una comunidad escolar o una familia que vive cerca del río no necesariamente necesita conocer todos los detalles estadísticos, pero sí debe entender que un evento de 100 años no es imposible, que la probabilidad se acumula con el tiempo y que existen acciones preventivas que pueden disminuir el daño.

Por estas razones, la divulgación científica cumple un papel central. Permite que el conocimiento producido en tesis, estudios técnicos o investigaciones universitarias no permanezca encerrado en documentos especializados. En el caso del río Shumuljá, divulgar los resultados puede contribuir a que el riesgo se vea antes de la emergencia y a que las decisiones se tomen con mayor información.

Tabla 4. *Traducción de resultados técnicos a decisiones territoriales*

Resultado técnico	**Lectura para la gestión del riesgo**
El caudal de 100 años supera 213 m³/s.	La infraestructura debe evaluarse frente a eventos extremos, no solo frente a lluvias frecuentes.
El caudal de 100 años es más de cinco veces el de 2 años.	El riesgo crece de manera no lineal; pequeñas diferencias en lluvia pueden traducirse en grandes diferencias de escurrimiento.
La cuenca tiene respuesta rápida.	La alerta temprana y la limpieza preventiva del cauce son claves, porque el tiempo de reacción puede ser reducido.
La información local es limitada.	La regionalización ayuda, pero debe acompañarse de monitoreo hidrometeorológico permanente.
El cauce atraviesa zona urbana.	El ordenamiento territorial y la protección civil deben integrarse al análisis hidráulico.

Sostenibilidad territorial y nexo agua-energía

La sostenibilidad suele asociarse con conservación ambiental, eficiencia energética o reducción de emisiones. Sin embargo, en territorios expuestos a inundaciones, la sostenibilidad también implica reducir vulnerabilidades. Una comunidad no puede considerarse sostenible si sus viviendas, escuelas, caminos, puentes o servicios básicos se encuentran expuestos a avenidas recurrentes sin medidas de prevención.

Desde esta perspectiva, el análisis hidrológico aporta información estratégica para la sostenibilidad territorial. Permite estimar la magnitud

de eventos extremos, identificar infraestructura potencialmente vulnerable, orientar el mantenimiento de cauces, apoyar el diseño de obras y establecer prioridades de intervención. Pero su impacto depende de que los resultados se integren en la toma de decisiones y no queden aislados como un ejercicio académico.

El nexo agua-energía aparece en el caso de Yajalón de varias maneras. En primer lugar, las inundaciones pueden afectar la infraestructura eléctrica y con ello interrumpir servicios esenciales. En segundo lugar, los sistemas de bombeo, drenaje, tratamiento de agua y comunicación dependen de energía para operar. En tercer lugar, los sistemas de monitoreo y alerta requieren continuidad energética, especialmente durante tormentas. Finalmente, la recuperación posterior a un desastre demanda recursos energéticos para limpieza, bombeo, transporte y rehabilitación.

Por ello, la prevención de inundaciones también es una estrategia de resiliencia energética. Evitar que el agua dañe instalaciones, caminos o redes reduce el tiempo de interrupción de servicios y mejora la capacidad de respuesta de la comunidad. Este enfoque es especialmente importante en localidades donde la infraestructura crítica puede ser limitada o donde el acceso durante emergencias se vuelve difícil.

La sostenibilidad territorial también exige mirar la cuenca completa. Canalizar un tramo puede ser necesario, pero no siempre resuelve el problema si aguas arriba continúa aumentando el escurrimiento superficial. Las soluciones más robustas combinan medidas estructurales y no estructurales: obras hidráulicas, restauración de vegetación, conservación de suelos, manejo de residuos, delimitación de zonas federales, reglamentos de construcción, educación comunitaria y sistemas de alerta.

Las medidas basadas en la naturaleza pueden complementar la infraestructura convencional. La restauración de cobertura vegetal, la protección de zonas de infiltración y el control de erosión ayudan a disminuir la velocidad del escurrimiento y la carga de sedimentos. Aunque estas acciones no eliminan eventos extremos, pueden contribuir a reducir daños, prolongar la vida útil de obras y mejorar la salud del ecosistema.

El Programa Hídrico Regional de la Región Hidrológico-Administrativa XI Frontera Sur reconoce la necesidad de fortalecer la gestión integral del agua bajo condiciones regionales específicas (CONAGUA,

2021). Este tipo de instrumentos resulta relevante porque el riesgo hídrico no se atiende solo desde una obra local; requiere coordinación entre municipios, estado, federación, instituciones académicas y población.

En este marco, la universidad puede desempeñar un papel importante. Los estudios generados en programas de posgrado pueden convertirse en insumos de planeación, capacitación y divulgación. Un capítulo de divulgación como este contribuye a acercar el conocimiento académico a públicos más amplios y a mostrar que la ciencia del agua tiene aplicaciones directas en la vida cotidiana.

Nota:
La gestión del riesgo hídrico no termina cuando se calcula un caudal. Empieza cuando ese dato se usa para decidir dónde construir, qué limpiar, qué proteger, cómo alertar y cómo mantener funcionando los servicios esenciales.

Recomendaciones para fortalecer la prevención

A partir del caso analizado, pueden plantearse recomendaciones orientadas a mejorar la gestión del riesgo hídrico en Yajalón y en cuencas semejantes. Estas recomendaciones no sustituyen estudios hidráulicos de detalle, pero ayudan a ordenar prioridades y a convertir la información hidrológica en acciones preventivas.

La primera recomendación es fortalecer el monitoreo hidrometeorológico. Las estaciones de lluvia y caudal son indispensables para reducir la incertidumbre. Cuando una cuenca cuenta con registros continuos y confiables, los análisis de frecuencia pueden actualizarse con mayor precisión. Además, el monitoreo en tiempo real puede apoyar alertas tempranas, especialmente en cuencas de respuesta rápida.

La segunda recomendación es actualizar periódicamente los estudios hidrológicos e hidráulicos. Las cuencas cambian: se modifica el uso del suelo, se construyen nuevas viviendas, se alteran cauces, se acumulan sedimentos y cambia la cobertura vegetal. Un estudio útil en un momento puede perder vigencia si el territorio se transforma. Por ello, la actualización debe ser parte de la gestión pública y no una acción excepcional.

La tercera recomendación es evaluar la capacidad de puentes, alcantarillas y tramos canalizados frente a los caudales estimados. Esta evaluación permitiría identificar puntos críticos donde la infraestructura podría obstruirse o resultar insuficiente. Los resultados podrían traducirse en un programa de mantenimiento, rehabilitación o rediseño priorizado según el nivel de riesgo.

La cuarta recomendación es integrar el ordenamiento territorial con la información hidrológica. Las zonas cercanas al cauce no deben ocuparse sin considerar escenarios de inundación. La delimitación de áreas de riesgo, la vigilancia de márgenes y la regulación de construcciones son medidas de prevención que pueden evitar daños futuros.

La quinta recomendación es incorporar soluciones basadas en la naturaleza. La restauración de vegetación, la protección de áreas de infiltración, el control de erosión y la reducción de residuos en cauces son acciones que pueden disminuir la velocidad del escurrimiento y mejorar la capacidad de respuesta del territorio. Estas medidas deben complementarse con infraestructura, no verse como sustituto único.

La sexta recomendación es diseñar estrategias de comunicación del riesgo. La población necesita mensajes claros: qué significa vivir cerca del cauce, cómo interpretar alertas, qué rutas evitar durante lluvia intensa, cómo preparar documentos y equipos básicos y a quién reportar obstrucciones. La comunicación debe ser constante, no únicamente durante una emergencia.

La séptima recomendación es fortalecer la coordinación institucional. La prevención de inundaciones involucra protección civil, obras públicas, gestión del agua, energía, salud, educación y desarrollo urbano. Si estas áreas trabajan de forma aislada, las respuestas suelen ser tardías o incompletas. Una mesa técnica permanente podría integrar datos, actualizar diagnósticos y dar seguimiento a acciones prioritarias.

Finalmente, se recomienda mantener una colaboración activa entre universidad, autoridades y comunidad. Los estudios académicos pueden convertirse en materiales de capacitación, mapas simplificados, fichas técnicas o talleres. La divulgación científica puede facilitar que los resultados de una tesis o de una investigación se traduzcan en decisiones comprensibles y útiles para quienes habitan el territorio.

Tabla 5. *Recomendaciones para pasar del estudio técnico a la prevención*

Línea de acción	Propósito	Posible responsable
Monitoreo hidrometeorológico	Reducir incertidumbre y apoyar alertas tempranas.	Autoridades del agua, protección civil, academia.
Mantenimiento de cauces y estructuras	Evitar obstrucciones y pérdida de capacidad hidráulica.	Municipio, obras públicas, comunidad.
Actualización de estudios	Incorporar cambios en uso de suelo, infraestructura y clima.	Instituciones técnicas y universidades.
Ordenamiento territorial	Evitar nueva exposición en zonas de riesgo.	Desarrollo urbano, municipio, protección civil.
Comunicación comunitaria	Convertir datos técnicos en acciones comprensibles.	Protección civil, escuelas, universidad.
Continuidad energética	Mantener operación de bombeo, comunicación y alerta durante emergencias.	Servicios públicos, energía, protección civil.

Alcances y límites del estudio

Como todo análisis hidrológico, el estudio del río Shumuljá debe interpretarse dentro de sus alcances y límites. Su principal valor es ofrecer una estimación técnicamente sustentada de caudales máximos en un contexto de información limitada. Esta estimación permite orientar decisiones, comparar escenarios y reconocer la magnitud potencial de avenidas extremas.

Sin embargo, los resultados no sustituyen un estudio hidráulico detallado para cada tramo del cauce. Para saber con precisión qué zonas se inundarían bajo un caudal específico se requieren levantamientos topográficos, secciones transversales, análisis de rugosidad, información sobre estructuras, modelos hidráulicos y validación de campo. El caudal estimado es una entrada fundamental, pero no agota el análisis espacial de la inundación.

Tampoco se debe olvidar que la regionalización depende de la calidad de la información disponible en estaciones regionales. Si las estaciones presentan registros cortos o inconsistentes, la incertidumbre aumenta. Por

ello, los resultados deben acompañarse de una recomendación permanente: mejorar la medición local y actualizar las estimaciones conforme se disponga de nuevos datos.

Otro límite se relaciona con el cambio territorial. La urbanización, la deforestación, la modificación de cauces y la acumulación de residuos pueden alterar la respuesta hidrológica. Si estas condiciones cambian de manera importante, los caudales y las zonas de riesgo deben revisarse. La ciencia del agua no produce diagnósticos definitivos; produce herramientas que deben actualizarse conforme cambia el territorio.

Reconocer estos límites no reduce la utilidad del estudio. Al contrario, permite usarlo de manera responsable. En la gestión del riesgo, una estimación clara, transparente y actualizable es una base valiosa para decidir. Lo peligroso no es reconocer incertidumbre; lo peligroso es ignorarla o actuar como si el riesgo no existiera.

Conclusiones

El caso del río Shumuljá, en Yajalón, Chiapas, muestra la importancia de aplicar herramientas hidrológicas en territorios con antecedentes de inundación y disponibilidad limitada de información. En cuencas pequeñas y de respuesta rápida, los caudales pueden incrementarse de manera significativa durante eventos de lluvia intensa, por lo que la prevención requiere estudios que permitan dimensionar escenarios extremos antes de que ocurra la emergencia.

El análisis de frecuencia y la regionalización hidrológica constituyen herramientas valiosas para estimar caudales máximos cuando los registros locales son insuficientes. Su utilidad radica en aprovechar la información disponible, evaluar su calidad y transferir conocimiento desde cuencas semejantes o estaciones regionales. Aunque estas herramientas no eliminan la incertidumbre, permiten tomar decisiones con una base más sólida que la simple intuición.

Los resultados del caso muestran que el gasto de diseño aumenta de 40.91 m^3/s para un periodo de retorno de 2 años a 213.19 m^3/s para un periodo de 100 años. Este incremento, superior a cinco veces el valor del evento frecuente, evidencia la necesidad de evaluar infraestructura y

planes de prevención frente a escenarios extremos. Diseñar o mantener obras considerando solo eventos ordinarios puede dejar expuesta a la población ante avenidas menos frecuentes, pero de mayor impacto.

La interpretación del periodo de retorno debe comunicarse con claridad. Un evento de 100 años no ocurre necesariamente una vez cada siglo; tiene una probabilidad anual de excedencia aproximada de 1% y una probabilidad acumulada mayor cuando se considera la vida útil de una obra o el tiempo de exposición de una comunidad. Esta explicación es esencial para evitar una lectura equivocada del riesgo.

El estudio también confirma la necesidad de fortalecer el monitoreo hidrometeorológico. La regionalización ayuda a trabajar con datos escasos, pero no debe normalizar la falta de medición. Contar con registros locales continuos y confiables permitiría actualizar los análisis, mejorar alertas tempranas y reducir la incertidumbre en la toma de decisiones.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la gestión del riesgo hídrico debe integrar ciencia, territorio, infraestructura, energía y participación social. Las inundaciones pueden afectar no solo viviendas o vialidades, sino también servicios eléctricos, sistemas de bombeo, comunicación y respuesta de emergencia. Por ello, el nexo agua-energía debe entenderse también como una relación de resiliencia frente a eventos extremos.

Finalmente, el capítulo muestra que la divulgación científica es una herramienta de gestión. Traducir los resultados de un estudio hidrológico a un lenguaje claro permite que autoridades, estudiantes, comunidades y tomadores de decisiones comprendan mejor el riesgo y actúen con anticipación. La ciencia del agua no debe quedarse únicamente en cálculos; debe convertirse en conocimiento socialmente útil para proteger vidas, patrimonio e infraestructura, y para construir territorios más seguros y sostenibles.

Referencias

Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Comisión Nacional del Agua. (2021). Programa hídrico regional 2021–2024: Región hidrológico-administrativa XI Frontera Sur. Gobierno de México.

Hosking, J. R. M. & Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments*. Cambridge University Press.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Yajalón, Chiapas*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Regional fact sheet: Central and South America. IPCC.

Merz, R. & Blöschl, G. (2005). Flood frequency regionalisation: Spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, *302*(1–4), 283–306. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.018

Ouarda, T. B. M. J., Girard, C., Cavadias, G. S. & Bobée, B. (2001). Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology*, *254*(1–4), 157–173. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00488-7

Razavi, T. & Coulibaly, P. (2013). Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, *18*(8), 958–975. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690

Recio Colmenares, C. L. (2014). *Evaluación de metodologías de análisis de frecuencias hidrológicas: Caso de estudio control de inundaciones en Yajalón, Chiapas* [Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara].

Stedinger, J. R., Vogel, R. M. & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency analysis of extreme events. En D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill.

World Meteorological Organization. (2025). *Estado del clima mundial 2024 (WMO-No. 1368)*. Organización Meteorológica Mundial.

Capítulo 3

Análisis geoespacial frente a la crisis de inundaciones en la microcuenca del río San Juan de Dios

María del Sol Vázquez de León[1]
Karla Benita Aranda Hernández[1]
Laura Angélica Zamora Quintana[1]
Juan Marcos García Martínez[1]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008004

[1] Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad de Guadalajara

Resumen

El análisis sobre la crisis de inundaciones en la microcuenca del Río San Juan de Dios evidencia cómo el crecimiento urbano acelerado y poco planificado del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) ha transformado drásticamente la dinámica hidrológica de la ciudad, convirtiendo una microcuenca natural en una zona de alto riesgo. A través de un análisis geoespacial detallado, se expone cómo el entubamiento histórico del río y la masiva impermeabilización del suelo, que alcanza un 89 % en su zona norte, han reducido la capacidad de infiltración y las áreas verdes al 1.1 %. El estudio integra datos topográficos, edafológicos y de crecimiento urbano para demostrar que la topografía plana y la configuración de la cuenca, sumadas a la pérdida de funciones naturales de regulación, han derivado en cientos de puntos críticos de inundación que provocan recurrentemente daños estructurales, pérdidas materiales y pérdidas humanas. En conclusión, se subraya que la gestión actual es insuficiente, exigiendo una reevaluación profunda de las políticas urbanas que priorice la restauración hidrológica y el respeto a los ecosistemas como una vía para garantizar la seguridad y la sustentabilidad de la ciudad.

Introducción

El crecimiento urbano desmedido AMG ha provocado, en un alto grado, la impermeabilización de las cuencas que inciden en la región. Este fenómeno ha exacerbado la problemática de las inundaciones urbanas, incrementando los escurrimientos debido a los cambios drásticos en el uso de suelo y a la ocurrencia de precipitaciones extremas. Según datos del Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEGJ), en el año 2023 se registraron niveles de precipitación extraordinaria de 943 mm, superando significativamente las precipitaciones promedio anuales, que se sitúan en los 648.17 mm. Ante esta realidad, la construcción de

infraestructura urbana que sea segura, digna y sustentable se ha convertido en un compromiso ineludible para asegurar la armonía entre los asentamientos humanos y el comportamiento natural de la escorrentía pluvial.

La presente investigación aborda la importancia crítica del análisis geoespacial en la gestión de escurrimientos pluviales, utilizando los Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el propósito de entender hidrológicamente la dinámica que tienen las inundaciones en la ciudad de Guadalajara. La relevancia de este análisis se fundamenta en las cuantiosas pérdidas materiales y los daños estructurales que se presentan de manera recurrente cada año en el AMG como consecuencia de las inundaciones. Casos extremos, como las inundaciones de julio de 2021, ilustran esta vulnerabilidad: veinte colonias resultaron gravemente afectadas y, solo en el municipio de Zapopan, la Coordinación Municipal de Protección Civil y Bomberos determinó la pérdida total de 275 viviendas. (Cantero, 2021). De igual manera, en 2023, al menos 110 hogares en el mismo municipio perdieron la totalidad de sus pertenencias ante eventos similares. Rojas, 2025).

Además de los daños materiales, las inundaciones en zonas urbanizadas generan consecuencias negativas en la movilidad, aumentando los tiempos de recorrido de los automovilistas y elevando la incidencia de accidentes viales. (CENAPRED, 2013). No obstante, la repercusión más grave es la pérdida de vidas humanas durante los temporales de lluvias y el menaje de viviendas. Datos estadísticos municipales indican que, en promedio, fallecen al menos cinco personas cada año debido al arrastre de corrientes que fluyen por la ciudad, potenciadas por la desaparición histórica de cauces naturales y la insuficiencia crónica del sistema de drenaje pluvial. Asimismo, se debe considerar el alto costo económico que implica la inversión constante en estudios, propuestas de mitigación y obras de infraestructura para intentar contener esta problemática. (PROMIAP, 2017).

Un elemento central en esta dinámica hidrológica es el río San Juan de Dios, el cual nace en el Cerro del Cuatro, atraviesa diversas localidades y, en amplios tramos, ha sido canalizado a causa de la presión urbanística. Este río se incorpora al sistema del río Santiago, aportando los excedentes pluviales de las subcuencas de Atemajac y San Juan de Dios, además de aguas residuales del arroyo Huentitán. Es importante

señalar que ambas subcuencas se encuentran prácticamente saturadas en cuanto a espacio disponible para el desarrollo urbano. El agua de estos cauces es captada por instalaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y conducida hacia la planta hidroeléctrica Valentín Gómez Farías (Agua Prieta).

La complejidad de la gestión de este cauce radica en su recorrido por zonas urbanas críticas. Históricamente, áreas como el Parque Agua Azul funcionaron como vasos reguladores naturales del río San Juan de Dios. Sin embargo, la urbanización ha desplazado esta función natural, y el área de influencia actual abarca puntos de riesgo como la colonia El Deán (donde se ubica un vaso regulador), las inmediaciones de la Avenida Gobernador Curiel, la Avenida Lázaro Cárdenas, así como las colonias Ferrocarril, Cruz del Sur y Huentitán el Alto. La magnitud del problema es evidente al contrastar las cifras: un estudio del IIEG en 2023 identificó 147 puntos críticos de inundación en la zona metropolitana, cifra que ascendió a 356 sitios de inundación recurrente detectados por Protección Civil en el año 2022.

Antecedentes

La historia urbana de Guadalajara ha estado intrínsecamente ligada al río San Juan de Dios, un elemento natural que, desde la fundación de la ciudad, fungió como su principal sistema de drenaje y desagüe. A inicios del siglo XX, durante el mandato del coronel Miguel Ahumada, comenzó un proceso de transformación radical con el entubamiento de sus primeros tramos mediante técnicas de cemento armado, una práctica que se consolidó entre 1922 y 1927 bajo la gestión de José Guadalupe Zuno. Este embovedado permitió la creación de vialidades estratégicas como la Calzada Independencia, la cual se convirtió en un eje comercial vital. No obstante, esta intervención marcó el inicio de una urbanización intensiva que, sin la debida planificación, ignoró las dinámicas naturales de la cuenca y priorizó la expansión inmobiliaria sobre la integridad ecológica (Gobierno del Estado de Jalisco, s. f.).

A partir de las décadas de 1930 y 1940, el crecimiento acelerado de la capital jalisciense alteró drásticamente el relieve de la cuenca de Ate-

majac. Procesos de urbanización no regulados absorbieron elementos geográficos esenciales como las barrancas de Mezquitán y Belén, integrándolos a la mancha urbana mediante la construcción sobre áreas que presentaban riesgos inherentes de inundación. Esta negligencia en los reglamentos de construcción, orientada mayoritariamente a favorecer a los desarrolladores, resultó en la ocupación de zonas vulnerables cercanas a los cauces primarios de agua. Como señalan las autoridades estatales, este modelo de desarrollo permitió la conformación de la actual Zona Metropolitana, aunque a costa de vulnerar la seguridad física y ambiental de los ciudadanos (Gobierno del Estado de Jalisco, s. f.).

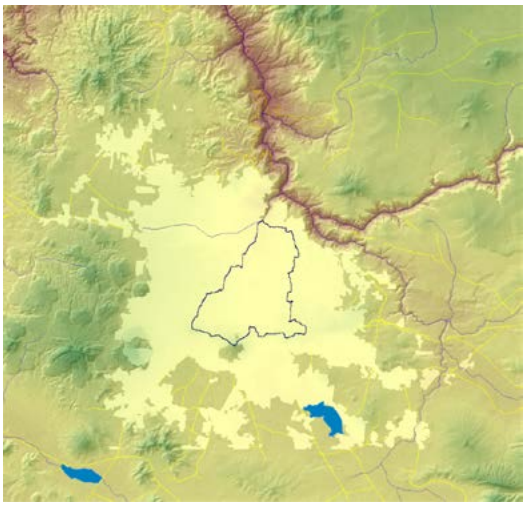
En la actualidad, la subcuenca del río San Juan de Dios enfrenta un deterioro ambiental crítico, particularmente en su zona norte, donde la impermeabilización del suelo alcanza el 89 % y la cobertura de áreas verdes se limita a un ínfimo 1.1 %. La infraestructura pluvial y de alcantarillado, al ser obsoleta y funcionar de manera aislada, resulta insuficiente para atender las necesidades del entorno urbano contemporáneo, lo que deriva en colapsos recurrentes ante cualquier evento hidrometeorológico. De acuerdo con Salas Salinas y Jiménez Espinosa (2017), la ineficiencia de este sistema, sumada a la falta de visión integral en la gestión del agua, posiciona a esta zona como uno de los puntos con mayor fragilidad ambiental de toda el área metropolitana de Guadalajara, exigiendo una reevaluación urgente de las políticas de gestión urbana y de drenaje pluvial.

Localización del río San Juan de Dios

La subcuenca del río San Juan de Dios se encuentra en la parte central del estado de Jalisco; cubre en su totalidad el municipio de Guadalajara. En las coordenadas, X min 65225.5, X máx. 688292.5, Y min 2277623.5, Y máx. 2315031.7 del Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM-13N), en el sistema World Geodetic System 84 (WGS84). Su parteaguas se extiende por las faldas del Cerro del Cuatro hacia el norte a través del Valle de Atemajac. Este río, históricamente ligado a la ciudad, corre bajo la Calzada Independencia y atraviesa zonas como Villas de San Juan, Independencia y Rancho Nuevo, desembocando

finalmente en el Río Santiago en la Barranca de Huentitán. En la Figura 1 se muestra la subcuenca polígono en color azul.

Figura 1. *Mapa de la subcuenca del río San Juan de Dios, polígono en color azul.*



Desarrollo

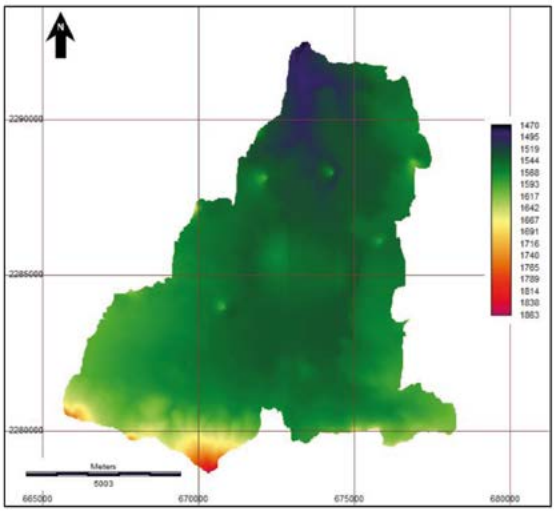
Con el propósito de determinar la dinámica hidrológica de la zona, se analizó la subcuenca del río San Juan de Dios mediante un Modelo Digital de Elevación (MDE). Este análisis permitió integrar las condiciones topográficas y la fisiografía urbana actual para modelar con precisión la dirección del flujo hídrico y cuantificar los escurrimientos pluviales. Los mapas temáticos resultantes se sustentaron en la versión 3.0 del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), un insumo cartográfico de alta resolución (15 metros) generado bajo el mandato del Artículo 26 de la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (LSNIEG). Este modelo proporciona una representación detallada del terreno mediante coordenadas (X, Y) y valores de elevación (Z), superando la precisión de versiones anteriores y facilitando una caracterización más homogénea y actualizada del relieve. (INEGI, 2025).

A partir de este modelo, se delimitó el parteaguas de la subcuenca, la cual comprende una superficie de 93.02 km² y un perímetro de 66.68

km. La obtención de un coeficiente de compacidad de 2.7 revela una configuración irregular y alargada, una característica que condiciona directamente el comportamiento hidrológico, influyendo tanto en el tiempo de concentración del flujo como en la magnitud de las crecidas ante eventos pluviales, como se puede apreciar en la Figura 2.

Finalmente, el análisis hipsométrico, derivado del procesamiento de imágenes ráster, permitió clasificar las altitudes de la subcuenca en un rango de 1 472 a 1 863 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m.), como se aprecia en la Tabla de la Figura 2. El cálculo de las subáreas reveló que la mayor parte del territorio (82.58 km²) se concentra entre las curvas de nivel de 1500 y 1600 m s. n. m. Este hallazgo destaca una topografía predominantemente plana, condición que, sumada a la forma alargada de la cuenca, resulta determinante para entender los retos de drenaje y la gestión de riesgos en la zona.

Figura 2. *MDE y áreas entre curvas de nivel de la subcuenca del río San Juan de Dios.*



Áreas entre curvas de nivel

Curvas del nivel		Área Km²
1472	1500	1.59
1500	1600	82.57
1600	1700	8.01
1700	1800	0.75
1800	1863	0.10
Total		93.02

Los resultados obtenidos mediante la curva hipsométrica se presentan en la Tabla 1, donde se observa que la mayor superficie de la subcuenca se sitúa en una elevación media de 1500 m s. n. m. Esta distribución describe una curva de tipo B (Figura 3), la cual refleja que la cuenca se

encuentra en una etapa de madurez geomorfológica; en este estado, los procesos de erosión y sedimentación alcanzan un equilibrio relativo, lo que sugiere una erosión uniforme a lo largo de toda el área. Asimismo, la Figura 4 ilustra las curvas de nivel trazadas con intervalos de 100 metros para la subcuenca del río San Juan de Dios.

Tabla 1. *Cálculo de la curva hipsométrica*

Elevaciones (m s.n.m)	Área (km^2)	Área acumulada (km^2)	Área que queda entre contornos (km^2)
1472	0	0	93.02
1500	1.59	1.59	91.43
1600	82.57	84.16	8.86
1700	8.01	92.17	0.85
1800	0.75	92.92	0.10
1863	0.10	93.02	0.00
Total	93.02		

Finalmente, el cálculo de la elevación media de la cuenca, detallado en la Tabla 2, arroja un valor de 1559.4 m s. n. m.

Tabla 2. *Elevación media de la subcuenca del Río San Juan de Dios.*

Curvas de nivel		Área Km2	Elevaciones medias	Área * elevaciones medias
1472	1500	1.59	1486	2362.7
1500	1600	82.57	1550	127983.5
1600	1700	8.01	1650	13216.5
1700	1800	0.75	1750	1312.5
1800	1863	0.10	1832	183.2
			Elevación media	1559.4

Figura 3. *Gráfico de la curva hipsométrica tipo "B".*

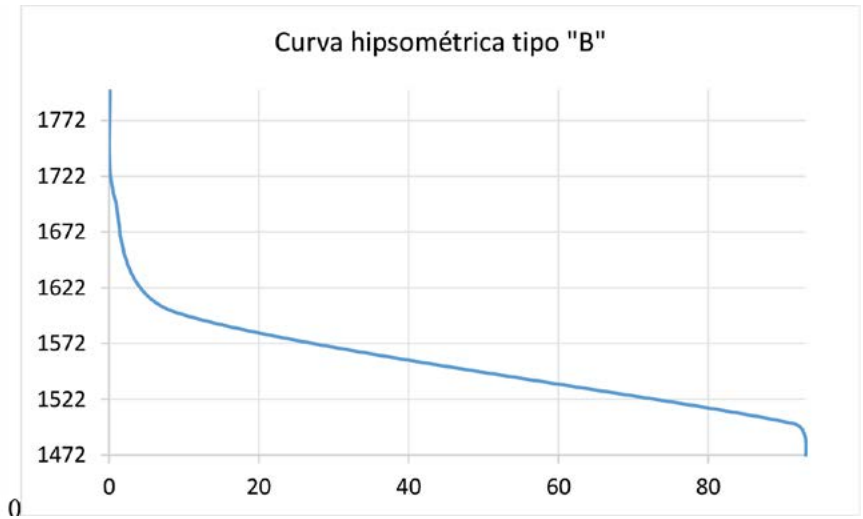
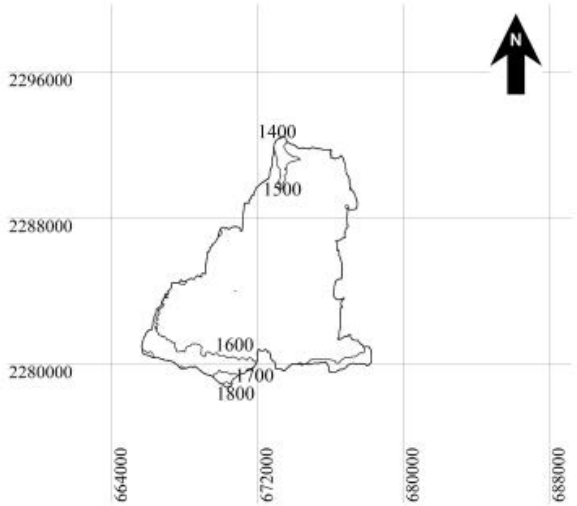


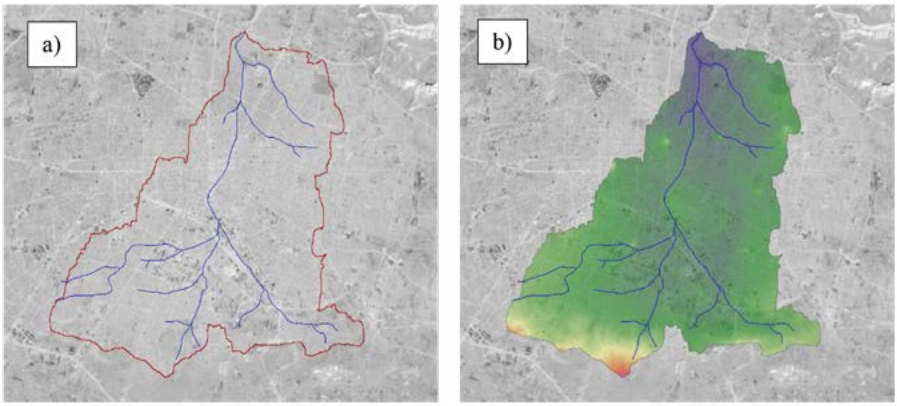
Figura 4. *Curvas de nivel a cada 100 metros en la subcuenca del río San Juan de Dios.*



Respecto a la red de drenaje, la subcuenca del río San Juan de Dios presenta una textura gruesa, lo que denota un mayor espaciamiento y una menor densidad de canales por unidad de área. Esta característica

sugiere que la composición del suelo y la roca madre permiten una infiltración facilitada del agua, lo cual, bajo condiciones naturales, reduciría la escorrentía superficial debido a una buena capacidad de infiltración. No obstante, al contrastar esta morfología con el uso de suelo actual, la Figura 5a, que presenta el parteaguas de la subcuenca sobrepuesto a una imagen de satélite LANDSAT del año 2024, evidencia que la cuenca se encuentra cubierta en su totalidad por la mancha urbana. Esta condición se reafirma en la Figura 5b, donde se visualiza la misma imagen satelital complementada con el MDE de la subcuenca, permitiendo observar la relación entre la topografía original y el grado de ocupación urbana existente.

Figura 5. *Mapa de la red de drenaje de la subcuenca del río San Juan de Dios: a) con imagen de satélite LANDSAT y b) Red de drenaje y MDE*

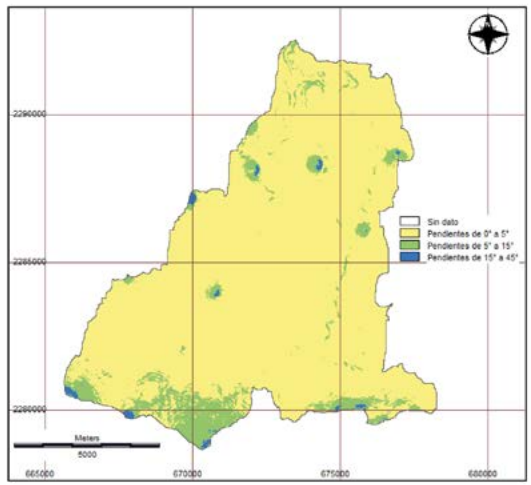


La clasificación de las pendientes en la subcuenca del río San Juan de Dios permite comprender el comportamiento del flujo hídrico según la inclinación del terreno. Como se detalla en la Tabla de la Figura 6, el área predominante corresponde a pendientes planas, las cuales abarcan 84.80 km². En estas zonas, caracterizadas en color amarillo en la Figura 6, el agua de escurrimiento fluye con lentitud y tiende a extenderse sobre la superficie. Esta configuración, sumada a la presencia de una capa impermeable en el suelo, convierte a esta área en una zona altamente propensa a las inundaciones por acumulación de agua.

Por otro lado, se identificaron pendientes moderadas que cubren 7.76 km², donde los escurrimientos adquieren mayor velocidad, incrementando

la escorrentía superficial y limitando la infiltración, lo que vuelve a estas áreas susceptibles a inundaciones repentinas, especialmente ante la falta de cobertura vegetal. Finalmente, las pendientes muy fuertes se localizan en la parte alta de la subcuenca, ocupando un área reducida de 0.53 km²; no obstante, debido a la inclinación, el agua fluye con gran velocidad y genera procesos erosivos intensos, lo que representa un riesgo significativo de inundaciones con un alto potencial de riesgo.

Figura 6. *Mapa y clasificación de pendientes en la subcuenca del Río del San Juan de Dios*.



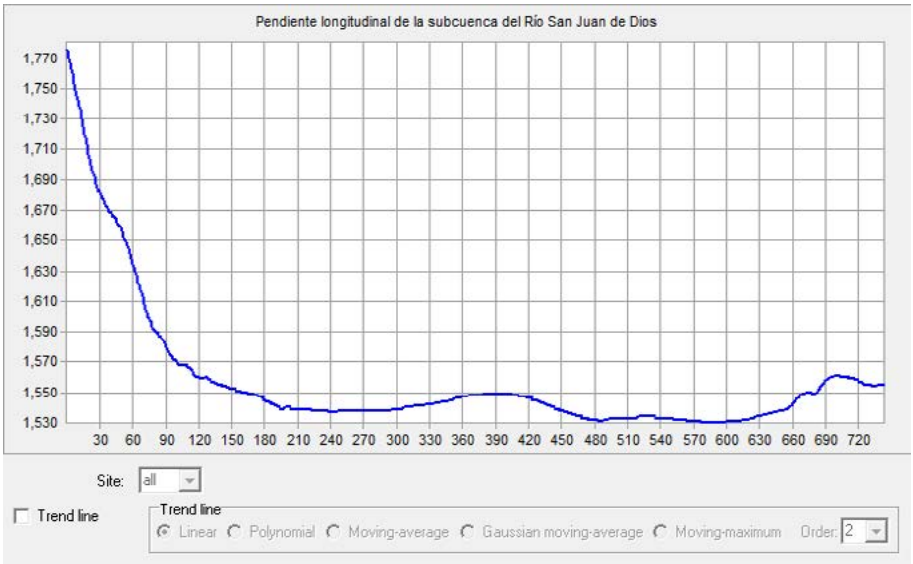
Clasificación de pendientes en la subcuenca

Tipo de pendiente	Porcentajes %	Área Km²
Plano	0-5	84.80
Ondulado	5-15	7.76
Montañoso	15-45	0.53

El trazo del perfil topográfico de esta subcuenca revela una configuración del terreno que la hace particularmente vulnerable a las inundaciones. Como se observa en la Figura 8, en el segmento intermedio del perfil predominan pendientes suaves con secciones convexas, las cuales configuran un escenario propicio para la acumulación de agua. Estas zonas, al presentar una inclinación reducida, dificultan el drenaje eficiente, favoreciendo el estancamiento y zonas inundables. La convexidad del terreno acentúa esta problemática al actuar como una retención física que impide el escurrimiento natural. En consecuencia, ante eventos de precipitación intensa o prolongada, estas áreas se consolidan como puntos críticos donde el riesgo de inundación se incrementa significativamente.

En contraste con las zonas planas, la parte alta de la cuenca presenta una topografía con caídas pronunciadas, donde las pendientes aceleran drásticamente el escurrimiento hídrico. Esta configuración transforma las laderas en canales naturales que conducen el agua hacia las zonas bajas con gran velocidad. Lejos de ser un beneficio, este rápido desplazamiento representa una amenaza significativa, pues reduce el tiempo de concentración en las áreas bajas e incrementa la probabilidad de inundaciones repentinas. Estos eventos se distinguen por su súbita aparición y una elevada capacidad de arrastre, factores que los convierten en fenómenos altamente demoledores para la infraestructura y seguridad de las zonas receptoras.

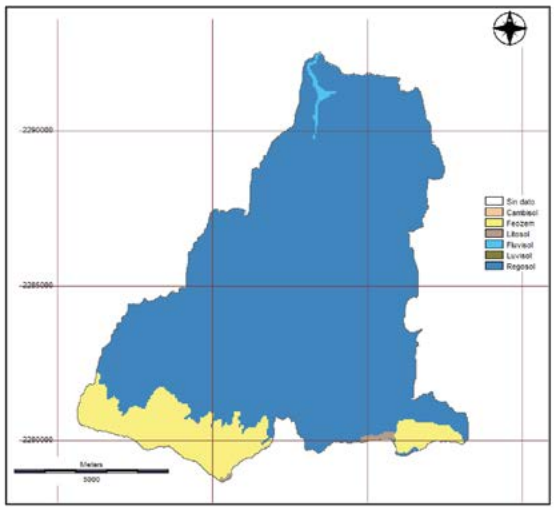
Figura 7. *Perfil topográfico de la subcuenca del Río San Juan de Dios.*



El análisis edafológico de la subcuenca del río San Juan de Dios revela una diversidad de suelos que influye directamente en cómo se comporta el agua de lluvia, fenómeno que se detalla en la Tabla la Figura 8. El tipo de suelo predominante es el regosol, que cubre una extensa área de 82.29 km^2; aunque permite que el agua penetre fácilmente, su limitada capacidad para retener humedad provoca que los niveles de los cauces

suban rápidamente durante lluvias intensas, aumentando el riesgo de inundaciones repentinas. Por otro lado, el suelo feozem (10.13 km²) actúa como un aliado natural, pues su alto contenido de materia orgánica ayuda a retener agua y a reducir la velocidad con la que esta corre por la superficie, mitigando así el riesgo de desbordamientos. En contraste, el litosol (0.27 km²) presenta dificultades importantes debido a su poca profundidad y abundancia de roca, lo cual impide que el agua se filtre, forzándola a correr por la superficie y arrastrar sedimentos que pueden obstruir los drenajes. Finalmente, los fluvisoles (0.39 km²), al encontrarse en las partes más bajas y planas de la subcuenca, están naturalmente más expuestos a acumular agua, lo que los convierte en zonas de alta sensibilidad ante eventos de inundación. En conjunto, esta distribución de suelos demuestra que la capacidad del terreno para absorber o desplazar el agua es un factor determinante en la vulnerabilidad de cada sector de la cuenca.

Figura 8. *Mapa y datos edafológicos de la subcuenca del río San Juan de Dios*



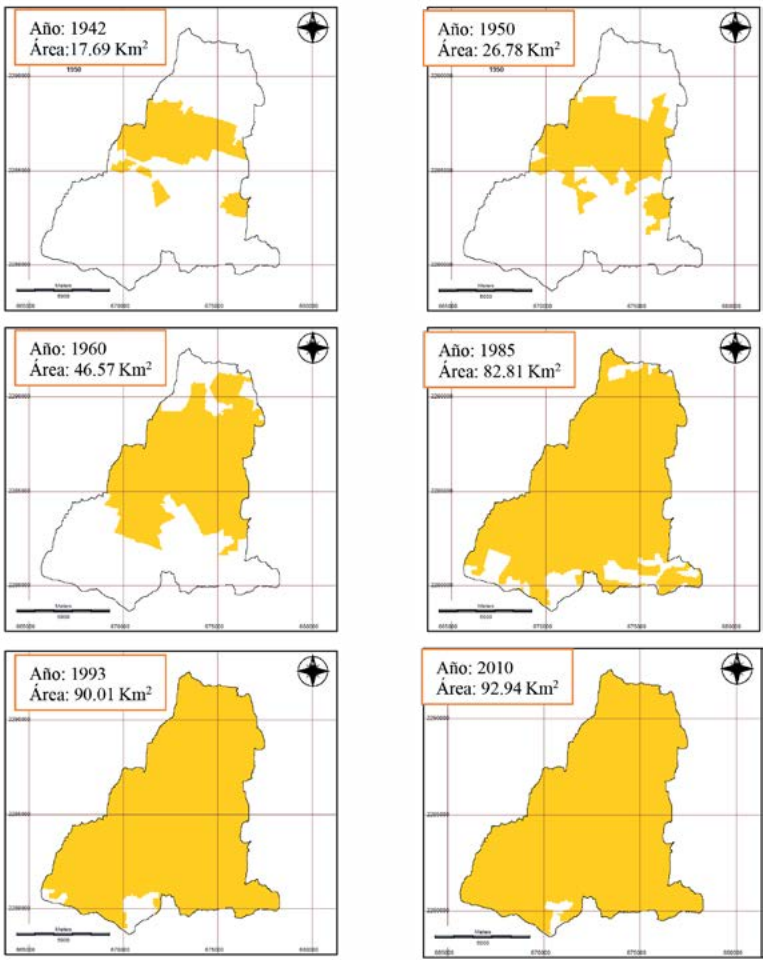
Datos edafológicos

Suelo	Km²
Feozem	10.131790
Litosol	0.275035
Fluvisol	0.392226
Regosol	82.295271

El análisis de la urbanización en la subcuenca del río San Juan de Dios muestra un crecimiento acelerado y persistente entre 1942 y 2010, como se puede observar en la Figura 9. Mientras que en 1942 la zona intervenida

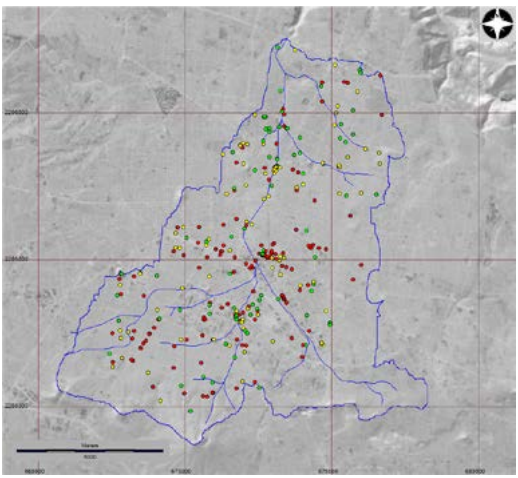
apenas ocupaba 17.69 km², el desarrollo urbano se intensificó drásticamente en las décadas siguientes, alcanzando los 82.81 km². Para 1985, llegando a cubrir prácticamente la totalidad de la subcuenca (92.94 km²). En 2010, dejando solo un pequeño remanente en el Cerro del Cuatro. Esta rápida expansión ha provocado una impermeabilización masiva del suelo, la cual reduce drásticamente la capacidad natural de infiltración y acelera el flujo de escurrimientos hacia los drenajes pluviales.

Figura 9. *Área de la mancha urbana por décadas 1942-2010 en la subcuenca del Río San Juan de Dios.*



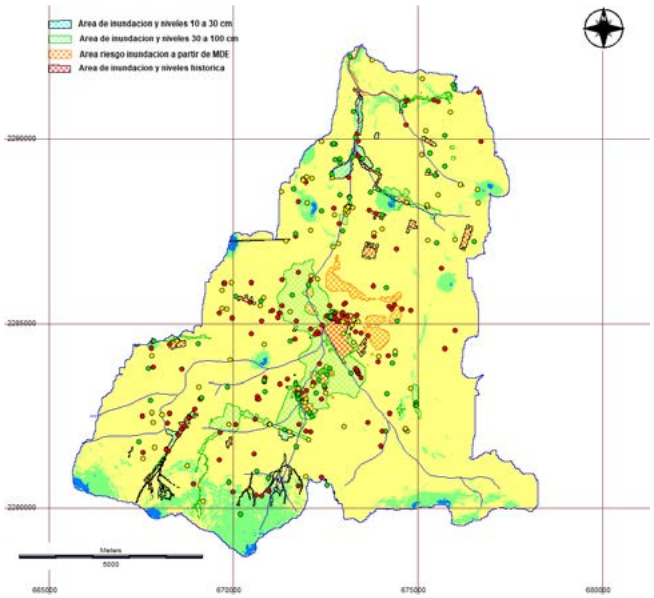
El análisis de los puntos de inundación en la subcuenca del río San Juan de Dios permite identificar zonas críticas mediante una clasificación de niveles de riesgo, representados visualmente en la Figura 10 mediante colores: verde para niveles bajos, amarillo para medios y rojo para altos. Se observa que los puntos de riesgo alto (rojo) se concentran principalmente en el sector central de la subcuenca, donde convergen diversos arroyos; esta unión de flujos incrementa significativamente el volumen de escorrentía en áreas específicas, elevando la probabilidad de desbordamientos.

Figura 10. *Puntos de inundación en la subcuenca del río San Juan de Dios.*



Al contrastar los polígonos de inundación con la clasificación de pendientes en la Figura 11, se confirma que los eventos de inundación coinciden con las zonas de mayor escorrentía, particularmente en la parte alta de la subcuenca, donde la inclinación del terreno acelera la velocidad y energía del flujo hídrico. Esta relación demuestra que la pendiente es un factor determinante en la magnitud de los siniestros, ya que dirige y concentra el agua hacia puntos de menor elevación. Además, es fundamental considerar que elementos urbanos como edificaciones, infraestructura vial y puentes actúan como obstáculos que modifican la dirección natural del agua, acumulándola y agravando el riesgo en sectores específicos de la mancha urbana.

Figura 11. *Clasificación de pendientes, puntos y poligonos de inundación en la subcuenca del río San Juan de Dios*



Conclusiones

La historia del AMG es un testimonio de la ambición por la expansión inmobiliaria y un crecimiento urbano acelerado y poco planificado pueden alterar drásticamente la configuración de un ecosistema, comprometiendo no solo el entorno natural, sino la seguridad y bienestar de sus habitantes. El análisis de la subcuenca del río San Juan de Dios, un sistema que históricamente fungió como drenaje natural de la ciudad, revela que la transformación de nuestro territorio no ha sido un proceso inocente, sino un factor determinante en la exacerbación de los riesgos que hoy enfrentan los tapatíos.

La transición histórica, desde sus cauces naturales hasta el entubamiento y la urbanización intensiva iniciada a principios del siglo XX, constituye el punto de inflexión hacia la actual crisis. Observamos cómo la negligencia en la planificación, orientada históricamente a favorecer desarrollos inmobiliarios, ignoró las dinámicas hidrológicas de la cuen-

ca, traduciéndose en una impermeabilización masiva que hoy alcanza el 89 % en su zona norte y una reducción crítica de áreas verdes a solo un 1.1 %. Esta realidad ha convertido una red de drenaje natural en un sistema obsoleto, incapaz de gestionar el comportamiento de las escorrentías pluviales ante eventos hidrometeorológicos cada vez más extremos.

El costo de esta desarticulación entre el desarrollo urbano y la naturaleza es inmensamente alto y se manifiesta en una dualidad: el daño material y la pérdida de vidas humanas. La recurrencia de inundaciones, que no solo afecta la movilidad y la economía, sino que despoja a cientos de familias de su patrimonio, como se evidenció trágicamente en los eventos de 2021 y 2023 en Zapopan. Es el ejemplo claro de una enfermedad urbana que requiere atención urgente. La gestión actual, caracterizada por la inversión constante en mitigación tras los desastres, resulta insuficiente ante un modelo que continúa subestimando la fisiografía del terreno.

La evidencia técnica expuesta es contundente: la topografía predominantemente es plana, la configuración alargada de la cuenca y la naturaleza de sus suelos, como el regosol, que dificulta la retención de humedad. Crean un escenario de vulnerabilidad inherente. Cuando estas condiciones se entrelazan con la desmedida impermeabilización, el agua pierde su capacidad de infiltración y se convierte en una amenaza que fluye con gran velocidad, buscando ríos o arroyos que, en muchos casos, han desaparecido o han sido entubados por la propia infraestructura.

Por lo tanto, más allá de la construcción de infraestructura de drenaje, el desafío que enfrenta Guadalajara exige una reevaluación profunda de sus políticas de gestión urbana. La comprensión de que el suelo, la pendiente y la cobertura vegetal forman un sistema interconectado es fundamental para transitar hacia una planeación más sustentable. Debemos reconocer que la seguridad física de los ciudadanos está ligada directamente a nuestra capacidad para respetar, entender y restaurar las dinámicas hidrológicas de las cuencas. De lo contrario, seguiremos atrapados en un ciclo donde el crecimiento urbano solo promete un mayor riesgo y una mayor vulnerabilidad ante los efectos de las lluvias, perpetuando las consecuencias negativas de una ciudad que, al darle la espalda a su propia hidrología, ha terminado por verse superada por ella.

Referencias

Cantero, C. (2021, 26 de agosto). Casas inhabitables, pérdida total de bienes y ausencia de las autoridades, denuncian familias afectadas por inundaciones en Zapopan. *ZonaDocs, periodismo en resistencia*. https://www.zonadocs.mx/2021/08/26/casas-inhabitables-perdida-total-de-bienes-y-ausencia-de-las-autoridades-denuncian-familias-afectadas-por-inundaciones-en-zapopan/

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2013). *Inundaciones*. https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF

Gobierno de Guadalajara. (2023). Mapa de riesgos Guadalajara. Administración e Innovación. https://mapa.guadalajara.gob.mx/riesgos

Gobierno del Estado de Jalisco. (s. f.). *Historia y desarrollo urbano del Río San Juan de Dios*.

Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco (IIEG). (2023). *Zapopan: Diagnóstico municipal*. https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2023/08/Zapopan.pdf

Rojas-Ramírez, J. J. P. (2025). Inundaciones y expansión urbana, sus implicaciones socioambientales: La gestión de riesgos por inundación en Guadalajara metropolitana, México. *Revista de Geografía Norte Grande*, *91*, 1–25. https://doi.org/10.4067/S0718-34022025000200104

Salas Salinas, M. & Jiménez Espinosa, R. (2017). *Diagnóstico socioambiental de la subcuenca del Río San Juan de Dios en la ciudad de Guadalajara*. [Nota: Falta el nombre de la revista, editorial o institución que publicó el documento. Si es una tesis o informe, debe indicarse entre corchetes].

Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). (2017, marzo). *Programa de Manejo Integral de Aguas Pluviales (PROMIAP) y Plan Integral de Manejo de Inundaciones (PIMI)*. https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/doctrans/1.-_antecedentes-promiap-pimi.pdf

Capítulo 4

De la vulnerabilidad hidráulica a la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible: Marco de evaluación para el drenaje urbano resiliente al clima en Guadalajara, México

Jorge Cuevas Ferrel[1]
Jesús Águila León[2]
Carlos J. Vega Gómez[3]
Néstor M. Ortiz Rodríguez[4]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008011

[1] Departamento de Ingeniería Civil y Topografía, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara.
[2] Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Autor de correspondencia: jesus.aguila@academicos.udg.mx .
[3] División de Desarrollo Tecnológico e Ingeniería, Centro Universitario de Tlajomulco, Universidad de Guadalajara.
[4] Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.

Resumen

Las inundaciones urbanas representan un desafío crítico en regiones en rápida urbanización, como la zona noreste de Guadalajara, México, donde la infraestructura de drenaje existente enfrenta serias dificultades para gestionar eficazmente las aguas pluviales bajo condiciones climáticas actuales y proyectadas. Mientras que diversas ciudades del mundo abordan esta problemática mediante la optimización de espacios verdes y estrategias de drenaje sostenible, los marcos sistemáticos que vinculan el diagnóstico de vulnerabilidad hidráulica con la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) permanecen subdesarrollados en contextos latinoamericanos con escasez de datos. Este estudio desarrolla un marco de evaluación transferible que traduce la simulación computacional del drenaje en prioridades de intervención espacialmente explícitas. Empleando el Storm Water Management Model (SWMM 5.2.4), el marco simula el sistema de drenaje urbano bajo eventos de lluvia presentes y proyectados, integrando análisis detallado de precipitaciones mediante los métodos Bell y Chen, evaluación de calidad de datos de infraestructura y diseño de tormentas de diseño mediante el método de bloques alternados para identificar mecanismos críticos de falla. Se generaron mapas temáticos de vulnerabilidad que identifican nodos de inundación críticos, secciones de tuberías con exceso de capacidad (HCI > 1.0), conductos con velocidades que superan los límites permisibles y niveles de agua que exceden condiciones seguras de operación.

Los resultados revelan que entre el 65.6 % y el 71.8 % de los nodos experimenta inundación bajo condiciones actuales de diseño, con volúmenes de inundación que aumentan 29 % bajo escenarios futuros de peor caso (294.12 ML), demostrando que la infraestructura verde por sí sola proporciona resiliencia insuficiente y que las estrategias híbridas verde-gris son esenciales. A partir de estos diagnósticos, se identifican y priorizan sistemáticamente las ubicaciones estratégicas donde el

despliegue de SUDS —incluyendo superficies permeables, celdas de biorretención y sistemas de detención— maximizaría la reducción del riesgo de inundación. Este marco integral, de la evaluación de vulnerabilidad al análisis de idoneidad de SUDS, proporciona a planificadores urbanos e ingenieros herramientas basadas en evidencia para mejorar el desempeño del sistema de drenaje y avanzar hacia la gestión sostenible del agua urbana en entornos con escasez de datos.

Introducción

La urbanización acelerada constituye uno de los procesos territoriales más determinantes del siglo XXI, con impactos directos y cuantificables sobre los sistemas hidrológicos urbanos. A nivel global, la superficie urbana se ha triplicado en las últimas cinco décadas, transformando paisajes permeables en mosaicos de asfalto y concreto que alteran radicalmente el ciclo hidrológico local: reducen la infiltración, incrementan la escorrentía superficial, aceleran los tiempos de concentración y amplifican los caudales pico. Estas transformaciones imponen cargas crecientes sobre infraestructuras de drenaje que fueron diseñadas bajo condiciones urbanas y climáticas que ya no corresponden a la realidad actual ni a la proyectada (Marsalek, 2008; Yazdanfar y Sharma, 2015).

En México, ciudades como Monterrey, Ciudad de México, Tijuana, Ciudad Juárez y Guadalajara son las más pobladas y, por tanto, las que presentan mayores problemas en el manejo de aguas pluviales, enfrentando inundaciones recurrentes y los efectos del cambio climático (Echavarría Alfaro, 2006). Guadalajara, capital del estado de Jalisco y segunda metrópoli del país con más de cinco millones de habitantes en su zona metropolitana, lleva más de 20 años padeciendo inundaciones en cada temporada de lluvias (SIAPA, 2008). La ciudad opera un sistema de alcantarillado combinado —sanitario y pluvial en la misma red— que frecuentemente es rebasado por la intensidad de las lluvias convectivas características del régimen pluviométrico local. El crecimiento habitacional e industrial ha impermeabilizado progresivamente el suelo; la infraestructura vial ha modificado y eliminado los espacios naturales de conducción de agua, y la falta de planeación hidrológica integrada ha agravado el problema a lo largo de décadas (SIAPA, 2017).

La zona noreste de la ciudad sintetiza esta problemática: un área de aproximadamente 15 km² con usos mixtos de suelo —residencial denso, comercial e industrial— cuyos índices de impermeabilidad oscilan entre el 75 % y el 92 % por subcuenca, documentando décadas de densificación sin compensación hidrológica. A estas causas endógenas se suma el cambio climático, que intensifica los eventos de precipitación extrema con incrementos documentados de entre 28.7 % y 126.6 % en intensidades de lluvias centenarias bajo distintos escenarios de emisión (Adnan et al., 2025; Piadeh et al., 2024).

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) han emergido globalmente como estrategia central de adaptación climática, combinando funciones de control hidrológico —retención, infiltración, laminación de caudales pico— con beneficios ambientales adicionales como la mejora de la calidad del agua, la reducción del efecto isla de calor urbano y el incremento de la biodiversidad (Fletcher et al., 2015; Monachese et al., 2024). Sin embargo, la implementación efectiva de SUDS exige diagnósticos hidráulicos precisos que identifiquen las zonas prioritarias de intervención, los mecanismos específicos de falla de la infraestructura existente y los umbrales de desempeño bajo escenarios futuros. En contextos con disponibilidad limitada de datos —como los que prevalecen en la mayoría de las ciudades latinoamericanas en rápida urbanización— las metodologías existentes suelen apoyarse en evaluaciones cualitativas o requerir extensos programas de monitoreo que exceden las capacidades institucionales locales (Ahmad et al., 2024).

Este trabajo desarrolla y operacionaliza un marco de evaluación de vulnerabilidad hidráulica aplicado a la cuenca de drenaje noreste de Guadalajara. El objetivo central es generar métricas de desempeño derivadas de simulación computacional —sobrepresión nodal, razones de excedencia de flujo mediante el Índice de Capacidad Hidráulica (HCI) y violaciones de umbral de velocidad— bajo condiciones climáticas actuales y proyectadas, traduciendo esos diagnósticos en salidas espacialmente explícitas que orienten la planificación estratégica de SUDS. El documento se organiza en las siguientes secciones: marco teórico-conceptual, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

El ciclo hidrológico urbano y sus alteraciones

La urbanización transforma fundamentalmente el ciclo hidrológico. Marsalek (2008) señala que una gestión eficaz del agua urbana debe basarse en la comprensión real de los impactos de las actividades humanas sobre el ciclo hidrológico y en la mitigación de esos impactos dentro del sistema socioeconómico local, considerando variables climáticas, técnicas, culturales e institucionales. Los efectos negativos de la urbanización son ya conocidos; no obstante, existen aspectos positivos de vivir en una ciudad bien administrada: oportunidades económicas, estilo de vida moderno y servicios sanitarios, aunque los aspectos ecológicos resultan limitados. La administración y gestión de las grandes ciudades representa uno de los mayores retos de la humanidad (Marsalek, 2008).

Yang et al. (2023) profundizan en las diferencias topológicas entre redes de drenaje urbano (UDN) y redes fluviales naturales: mientras las redes naturales evolucionan siguiendo principios de minimización de disipación de energía a escala geológica, las UDN son planificadas por ingenieros para satisfacer necesidades de drenaje local, con estructuras topológicas distintas que presentan ramificaciones imperfectas. Esta diferencia estructural tiene implicaciones directas para la vulnerabilidad: las UDN generan concentraciones de flujo en nodos específicos que se convierten en cuellos de botella sistémicos cuando la densificación urbana incrementa la impermeabilidad más allá de los parámetros de diseño originales.

Quintero Espinosa (2006) afirma que el estudio del ciclo hidrológico urbano conduce a una mayor verificación de los enfoques modernos de gestión del agua, incluyendo el desarrollo sostenible y de bajo impacto, así como la ecohidrología; estos enfoques basados en la conservación del agua hacen uso de técnicas de gestión integrada, incluyendo la reutilización de aguas pluviales, subterráneas y residuales. Campos Aranda (2009) precisa que las infraestructuras de drenaje urbano tratan de eliminar las inundaciones y los riesgos asociados al agua generada por las tormentas en las ciudades, entre las cuales se encuentran presas o embalses para almacenar excedentes, diques, rectificaciones, canalizaciones y depósitos de control.

Sistemas integrados verde-gris-azul y SUDS

La literatura internacional documenta una evolución conceptual en la gestión del drenaje urbano: del paradigma de conducción rápida hacia un paradigma de gestión integral del ciclo hídrico urbano que busca replicar la hidrología *predevelopment*. Fletcher et al. (2015) documentan esta evolución terminológica —SUDS, LID, BMP, WSUD—, señalando que todos estos enfoques comparten el principio de gestionar el agua en su origen o lo más cerca posible de él.

Wang et al. (2022) cuantifican la superioridad de los sistemas integrados verde-gris-azul: estos sistemas logran reducciones promedio del riesgo de inundación del 85.5 %, con efectos sinérgicos determinados principalmente por mecanismos hidrológicos y el principio de utilidad marginal decreciente. La infraestructura verde, implementada de manera descentralizada en subcuencas superiores, regula eficazmente el flujo en su origen; la infraestructura gris y azul aporta la capacidad de conducción que la verde no puede reemplazar en episodios extremos. Bakhshipour et al. (2019) formalizan este principio bajo el concepto de sistemas híbridos verde-azul-gris (HGBGI), cuyo objetivo es integrar la fiabilidad de las infraestructuras grises con la multifuncionalidad y adaptabilidad de las verdes.

Monachese et al. (2024) sintetizan los mecanismos de contribución de los SUDS a la adaptación climática: al imitar los procesos hidrológicos naturales, los SUDS gestionan eficazmente las aguas pluviales capturando, absorbiendo y filtrando el agua de lluvia, reduciendo la escorrentía y mitigando el riesgo de inundaciones. La incorporación de elementos como techos verdes, pavimentos permeables y jardines de lluvia disminuye los volúmenes de escorrentía y los caudales máximos durante lluvias intensas, reduciendo la probabilidad de inundaciones urbanas. Para el contexto latinoamericano, Zubelzu et al. (2020) demuestran la viabilidad de enfoques multiobjetivo en San Luis Potosí, México, proponiendo criterios económicos e hidrológicos para optimizar combinaciones de SUDS.

Vulnerabilidad hidráulica: Hacia un índice multidimensional

La evaluación de vulnerabilidad hidráulica ha evolucionado desde enfoques binarios hacia marcos multidimensionales que capturan distintos mecanismos de falla. Kirshen et al. (2015), en su análisis de Somerville, Massachusetts, proponen que la evaluación de vulnerabilidad implica identificar las debilidades del sistema y desarrollar estrategias de mitigación para escenarios climáticos futuros, evaluando su eficacia y costo. Ahmad et al. (2024) integran GIS, SWMM y modelación basada en agentes para evaluaciones en entornos con escasez de datos, demostrando que la combinación de herramientas puede suplir parcialmente la falta de monitoreo extenso.

La propuesta conceptual central de este estudio es un índice de vulnerabilidad hidráulica que integra tres componentes: (1) vulnerabilidad nodal, medida como frecuencia y magnitud de eventos de inundación superficial; (2) vulnerabilidad de conductos, evaluada mediante el Índice de Capacidad Hidráulica (HCI = Qpico/Qlleno), donde valores superiores a 1.0 indican excedencia de la capacidad de diseño; y (3) riesgos inducidos por velocidad, identificados mediante la superación del umbral de 5.0 m/s, a partir del cual la erosión interna y la degradación estructural representan riesgos de largo plazo. Esta tríada permite distinguir entre vulnerabilidades de capacidad —que requieren expansión— y vulnerabilidades estructurales —que requieren disipación de energía—, orientando estrategias de intervención diferenciadas.

Área de estudio y planteamiento del problema

Guadalajara se localiza a 20.67° N y 103.39° O, a 1 598 metros sobre el nivel del mar, en la región central de Jalisco, zona Pacífico-Occidental de México. La ciudad presenta un clima semicálido y semihúmedo con temperatura media anual de 21.7 °C (máximas de 32.0°C y mínimas de 9.9 °C) y una precipitación media anual de 998 mm altamente concentrada en los meses de junio a octubre (IIEG, 2018). La ciudad se asienta en un valle alto cuyas aguas superficiales escurrían originalmente por

cinco cauces principales que fueron progresivamente absorbidos por el desarrollo urbano sin planificación hidrológica integrada.

La zona noreste de la ciudad fue seleccionada como área de estudio por su representatividad urbana —mixtura de usos residencial denso, comercial e industrial— y su historia documentada de inundaciones recurrentes. La cuenca abarca aproximadamente 15 km², con impermeabilidades por subcuenca que oscilan entre 75 % en zonas moderadamente densas y 92 % en áreas de consolidación urbana máxima, reflejando décadas de densificación sin compensación hidrológica. La topografía del área es heterogénea: los sectores norte y noreste presentan pendientes pronunciadas que generan escorrentías rápidas con altas velocidades de flujo, mientras que los sectores centrales y sur son relativamente planos, favoreciendo la acumulación de agua.

Diagnóstico del sistema de drenaje existente

El sistema de drenaje de la zona noreste opera como red combinada —recibe simultáneamente aguas residuales domésticas e industriales y escorrentías pluviales—, lo que implica que durante tormentas intensas el sistema enfrenta no solo la carga hidráulica de la lluvia, sino también el volumen base de aguas negras. Este diseño heredado genera riesgos adicionales de desbordamiento de alcantarillado combinado (CSO, Combined Sewer Overflow) con implicaciones sanitarias significativas. La red fue inventariada a partir de datos coordinados con el Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y dependencias municipales de planeación, incluyendo especificaciones de tuberías (diámetros, pendientes, materiales, cotas de plantilla), modelos de elevación digital, clasificación de uso de suelo y datos de permeabilidad de suelos.

Metodología

Plataforma de modelación: SWMM 5.2.4

El Storm Water Management Model (SWMM) versión 5.2.4, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), sirvió como plataforma de modelación hidráulica e hidrológica. SWMM es ampliamente reconocido como el estándar industrial para análisis de drenaje urbano debido a sus robustos algoritmos computacionales y su extensiva validación en entornos geográficos diversos (Rossman, 2015). Seyedashraf et al. (2021) destacan su capacidad para simular procesos de precipitación-escorrentía, infiltración, transporte de contaminantes y drenaje en conductos cerrados y canales abiertos, con ruteo de ondas dinámicas que permite representar efectos de remanso, reversiones de flujo y condiciones de presurización. El modelo fue configurado con los componentes descritos en la Tabla 1.

Tabla 1. *Configuración del modelo de red de drenaje*

Parámetro	Valor
Subcuencas	41
Nodos de unión	131
Nodos de descarga	1
Conductos	130
Impermeabilidad por subcuenca	75 % – 92 %
Método de escorrentía superficial	Depósito no lineal (Manning)
Método de ruteo en red	Ondas dinámicas (Saint-Venant)

La escorrentía superficial se calculó mediante el método del depósito no lineal, que enruta el flujo hacia el sistema de drenaje utilizando la ecuación de Manning. El flujo subsuperficial se simuló mediante el método de ruteo de ondas dinámicas, que resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint-Venant, permitiendo representar con precisión efectos de remanso, reversiones de flujo y condiciones de presurización en la red.

Análisis de precipitaciones y tormentas de diseño

Las relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) se desarrollaron empleando los métodos Bell y Chen para caracterizar eventos de precipitación extrema locales. El método Bell emplea un enfoque regional simplificado basado en profundidades máximas de lluvia observadas; el método Chen ofrece un análisis estadístico más detallado del registro completo de precipitaciones. Ambos métodos fueron comparados para validar la consistencia de las curvas IDF resultantes. Los registros históricos de precipitación se obtuvieron de las estaciones meteorológicas locales coordinadas con CONAGUA.

Las tormentas de diseño se generaron para periodos de retorno de 10 años —condiciones actuales— y 50 años —condiciones futuras de cambio climático— con duración de 30 minutos, característica de los episodios convectivos de alta intensidad del régimen pluviométrico de Guadalajara. Los hietogramas se construyeron mediante el método de bloques alternados, posicionando las intensidades máximas en el centro temporal de la tormenta, siguiendo la práctica estándar de ingeniería hidrológica (Chow et al., 1988).

Marco de escenarios

Para evaluar sistemáticamente el desempeño hidráulico del sistema, se estableció una matriz de cinco escenarios que combinan periodo de retorno, configuración de uso de suelo y condición climática, tal como se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. *Marco de configuración de escenarios para la evaluación del desempeño hidráulico*

Escenario	T. retorno (años)	Uso de suelo	Impermeabilidad	Clima	Propósito
Base	10	Urbanización actual	Existente 75–92%	Actual	Línea base de capacidad actual
1-A	10	Desarrollo reducido con infraestructura verde	Baja	Actual	Mitigación bajo clima actual
1-B	10	Urbanización intensiva sin áreas verdes	Extrema	Actual	Peor caso bajo clima actual
2-A	50	Desarrollo reducido con infraestructura verde	Baja	Futuro	Mitigación bajo clima futuro
2-B	50	Urbanización intensiva sin áreas verdes	Extrema	Futuro	Peor caso bajo clima futuro

El escenario base establece la condición de referencia simulando las características urbanas actuales bajo una tormenta de periodo de retorno de 10 años. Los escenarios 1-A y 1-B mantienen el mismo periodo de retorno explorando trayectorias contrastantes de uso de suelo bajo condiciones climáticas actuales: 1-A evalúa el beneficio potencial de la infraestructura verde con impermeabilidades bajas, mientras que 1-B representa el peor caso de urbanización intensiva sin áreas verdes. Los escenarios 2-A y 2-B repiten estas trayectorias bajo condiciones climáticas futuras con periodo de retorno de 50 años, permitiendo cuantificar la amplificación del estrés hidráulico inducida por el cambio climático.

Métricas de vulnerabilidad hidráulica

El marco de vulnerabilidad integra tres dimensiones de análisis con métricas específicas: (1) vulnerabilidad nodal: porcentaje de nodos con desbordamiento superficial y profundidad promedio de encharcamiento; (2) vulnerabilidad de conductos: porcentaje de conductos con HCI > 1.0, donde HCI = Qpico/Qlleno, clasificando como cuellos de botella estructurales los conductos con excedencia persistente en múltiples escenarios; (3) riesgos por velocidad: conductos que superan el umbral de 5.0 m/s, a partir del cual la erosión interna en tuberías de concreto y PVC es estadísticamente significativa. La integración espacial de estas métricas genera mapas de vulnerabilidad compuesta que clasifican subcuencas y tramos de red en niveles de riesgo crítico-alto, moderado y bajo, orientando estrategias de intervención diferenciadas por zona.

Resultados

Desempeño hidráulico comparativo entre escenarios

Los indicadores hidráulicos agregados para todos los escenarios revelan variaciones significativas en la respuesta del sistema según la combinación de intensidad de tormenta, configuración de uso de suelo y condición climática. La Tabla 3 presenta los valores comparativos de los principales indicadores de desempeño.

Tabla 3. *Desempeño hidráulico del sistema bajo escenarios de desarrollo y cambio climático*

Indicador	Base	1-A	1-B	2-A	2-B
Nodos inundados (%)	94 (71.8 %)	86 (65.6 %)	91 (69.5 %)	91 (69.5 %)	91 (69.5 %)
Conductos sobrepresionados (%)	113 (86.9 %)	108 (83.1 %)	113 (86.9 %)	113 (86.9 %)	114 (87.7 %)
Volumen total de inundación (10^6 L)	228.46	187.99	230.53	238.87	294.12
Tasa promedio de inundación (m^3/s)	4.55	3.90	4.40	4.60	5.22
Profundidad promedio de encharcamiento (m)	0.22	0.17	0.21	0.17	0.23

El escenario base confirma que el sistema opera al límite o más allá de su capacidad nominal para cualquier episodio pluvial significativo: el 71.8 % de los nodos experimenta inundación y el 86.9 % de los conductos opera bajo sobrepresión, generando un volumen de inundación de 228.46 ML con tasas de 4.55 m^3/s y profundidades de encharcamiento de 0.22 m. Esta prevalencia generalizada de inundación bajo las condiciones de diseño actuales constituye una alerta crítica sobre el estado real de la infraestructura, indicando que el deterioro acumulado y la densificación urbana no planificada han erosionado sustancialmente la capacidad nominal del sistema.

La comparación entre el escenario 1-A y el escenario base cuantifica la efectividad máxima alcanzable mediante la gestión del uso de suelo bajo condiciones actuales: reducción del 18 % en volumen de inundación (de 228.46 a 187.99 ML), del 14 % en tasa promedio (de 4.55 a 3.90 m^3/s), del 9 % en nodos inundados (de 94 a 86) y del 23 % en profundidad de encharcamiento (de 0.22 a 0.17 m). Estas mejoras son significativas, pero insuficientes: con el 65.6 % de nodos aún inundados, la infraestructura verde por sí sola no puede eliminar la vulnerabilidad sistémica derivada del subdimensionamiento de la red troncal.

El diferencial de 23 % en volumen de inundación entre los escenarios 1-A (187.99 ML) y 1-B (230.53 ML) bajo condiciones actuales —con

idéntico periodo de retorno— cuantifica el costo hidráulico de la urbanización no regulada. Esta diferencia proporciona base empírica para los argumentos económicos de marcos regulatorios preventivos.

Amplificación climática y vulnerabilidades futuras

Los escenarios de cambio climático (periodo de retorno de 50 años) revelan una amplificación sustancial del estrés hidráulico con implicaciones directas para la planificación de largo plazo. Bajo condiciones optimizadas (escenario 2-A), el sistema aún experimenta 69.5 % de nodos inundados y 238.87 ML de volumen de inundación —aproximándose al nivel base a pesar de estrategias de mitigación idénticas al escenario 1-A. Esta convergencia cuantifica un hallazgo crítico: la efectividad de la infraestructura verde disminuye progresivamente a medida que la intensidad climática aumenta, porque los mecanismos de infiltración y retención tienen capacidades finitas que los episodios climáticos proyectados pueden superar sistemáticamente. Este comportamiento es consistente con lo documentado por Funke y Kleidorfer (2024), quienes señalan que el rendimiento de los SUDS varía sustancialmente según la magnitud del evento.

El escenario 2-B (peor caso futuro) produce las condiciones más severas: 294.12 ML de volumen de inundación —incremento del 29 % sobre la línea base—, 5.22 m^3/s de tasa promedio (+15%) y 0.23 m de profundidad (+5 %). El nodo n1450 ejemplifica la vulnerabilidad localizada extrema, con flujos pico de 41.05 m^3/s que sugieren déficits de capacidad superiores al 200 % de los umbrales de diseño.

Patrones espaciales de vulnerabilidad crítica

El análisis espacial revela una distribución heterogénea de la vulnerabilidad con concentraciones de riesgo crítico-alto claramente identificables. La vulnerabilidad se concentra en los sectores norte-central, centro-oeste y este, donde ocho nodos exhiben diez conductos que exhiben excedencias persistentes de capacidad (HCI > 1.0) bajo todos los escenarios evaluados, siendo los conductos 12 y 74 los cuellos de botella universales. El conduc-

to 12 (diámetro 0.76 m, pendiente 20 %) presenta subdimensionamiento fundamental relativo a las áreas contribuyentes aguas arriba a pesar de su gradiente favorable; el conducto 74 (diámetro 0.76 m, pendiente 3 %) confirma restricciones estructurales similares. Los escenarios climáticos futuros activan siete conductos críticos adicionales, predominantemente líneas troncales de 1.07 m de diámetro donde los flujos pico alcanzan 3.09–4.08 m^3/s contra capacidades nominales de 1.15–2.72 m^3/s (excedencias del 48 % al 150%)..

Diez conductos exhiben excedencias persistentes de capacidad (HCI > 1.0) bajo todos los escenarios evaluados, siendo los conductos 12 y 74 los cuellos de botella universales. El conducto 12 (diámetro 0.76 m, pendiente 20 %) presenta subdimensionamiento fundamental relativo a las áreas contribuyentes aguas arriba a pesar de su gradiente favorable; el conducto 74 (diámetro 0.76 m, pendiente 3 %) confirma restricciones estructurales similares. Los escenarios climáticos futuros activan siete conductos críticos adicionales, predominantemente líneas troncales de 1.07 m de diámetro donde los flujos pico alcanzan 3.09–4.08 m^3/s contra capacidades nominales de 1.15–2.72 m^3/s (excedencias del 48 % al 150%).

Los riesgos inducidos por velocidad constituyen un mecanismo de falla diferenciado e independiente. Diez conductos superan el umbral de 5.0 m/s, con los conductos 5 y 60 clasificados en riesgo crítico (8.00 y 7.29 m/s, respectivamente). La distribución espacial de estos riesgos exhibe superposición limitada con los segmentos de déficit de capacidad: las excedencias de velocidad se concentran en segmentos aguas arriba con topografía escarpada, mientras que los déficits de capacidad predominan en líneas troncales aguas abajo. Esta separación espacial de mecanismos de falla confirma la necesidad de un marco de evaluación multidimensional, ya que la evaluación por indicador único subestimaría sistemáticamente la vulnerabilidad real de zonas que experimentan ambos tipos de riesgo simultáneamente.

Estrategias de implementación de SUDS: priorización espacial

A partir del diagnóstico hidráulico, la priorización de SUDS sigue una lógica espacial diferenciada por nivel de vulnerabilidad. Las subcuencas norte-centrales de riesgo crítico-alto requieren implementación intensiva de múltiples tipologías: pavimentos permeables para reducir la generación de escorrentía en el origen, celdas de biorretención para capturar y filtrar el agua antes de su entrada a la red, techos verdes (con capacidades de retención documentadas del 56 ± 20 %), jardines de lluvia en espacios públicos disponibles y cisternas de retención. La integración de pavimentos permeables e instalaciones de biorretención puede gestionar el 30 % del territorio desarrollado sin adquisición adicional de suelo (Lee et al., 2018).

Las zonas periféricas de vulnerabilidad moderada representan oportunidades de despliegue preventivo más costo-efectivas que las intervenciones en zonas críticas. Los marcos regulatorios de control preventivo deben mandar la retención in situ de los primeros 20–25 mm de lluvia, ratios mínimos de superficie permeable del 30-40 % en nuevos desarrollos y desconexión de superficies impermeables. Los sectores aguas arriba con topografía pronunciada requieren tipologías especializadas de atenuación de flujo y disipación de energía: tanques de detención, zanjas de infiltración vegetadas y estructuras de control, especialmente para los conductos 5 y 60 con velocidades críticas de 8.00 y 7.29 m/s, respectivamente.

La implementación de SUDS debe estar acoplada con mejoras en infraestructura gris en los cuellos de botella identificados. La persistencia de sobrepresión en los conductos 12 y 74 bajo todos los escenarios confirma que el control en el origen no puede resolver restricciones estructurales fundamentales. Las estrategias híbridas que combinan SUDS aguas arriba con ampliación estratégica de diámetros en los cuellos de botella identificados representan el enfoque más costo-efectivo. Zhang et al. (2024) demuestran que mejoras estructurales focalizadas —incorporación de bucles en la red y ampliación de diámetros en conductos sobrecargados— pueden reducir el riesgo de inundación de manera más eficiente que mejoras distribuidas en toda la red.

Implicaciones para la política urbana

Los hallazgos generan cuatro implicaciones directas de política. Primera, los estándares de diseño del drenaje deben revisarse hacia periodos mínimos de retorno de 25 a 50 años para mantener niveles aceptables de servicio bajo proyecciones climáticas de mediados del siglo; los estándares actuales de 10 años son inadecuados dado que los escenarios futuros de 50 años producen volúmenes de inundación 29 % mayores que el peor caso actual (Radu et al., 2024; Adnan et al., 2025). Segunda, los marcos regulatorios deben combinar mandatos de infraestructura verde en nuevos desarrollos con financiamiento para rehabilitación de infraestructura gris en los cuellos de botella identificados (Rodríguez-Rojas et al., 2024). Tercera, la inversión de corto plazo debe priorizarse en los conductos 12, 74, 5 y 60 y los nodos n1450, n1471 y n1451 como puntos de falla universales cuya mejora generaría beneficios desproporcionados para todo el sistema. Cuarta, los controles de desarrollo deben establecer límites de densidad en zonas de alta vulnerabilidad, ratios mínimos de superficie permeable (30-40 %), retención in situ de los primeros 20-25 mm de lluvia y desconexión de superficies impermeables; el diferencial del 23 % en volumen de inundación entre desarrollo optimizado y no regulado justifica empíricamente estas regulaciones.

Conclusiones

Este estudio desarrolló y operacionalizó un marco de evaluación de vulnerabilidad hidráulica aplicado a la zona noreste de Guadalajara que genera diagnósticos cuantificados y espacialmente explícitos para orientar la planificación estratégica de SUDS en un entorno urbano latinoamericano con disponibilidad limitada de datos. Los resultados revelan deficiencias sistémicas que trascienden problemas localizados y que el cambio climático amplificará de manera sustancial en las próximas décadas.

Los cuatro hallazgos principales son los siguientes. Primero, el sistema de drenaje exhibe deficiencias sistémicas de capacidad incluso bajo condiciones actuales de diseño: entre el 65.6 % y el 71.8 % de los nodos experimenta inundación y el 86.9 % de los conductos opera bajo sobre-

presión, indicando que la infraestructura opera al límite o más allá de su capacidad nominal para cualquier episodio pluvial significativo. Segundo, el cambio climático amplifica sustancialmente el estrés hidráulico: los escenarios futuros de 50 años generan volúmenes de inundación 29 % mayores (294.12 ML) y tasas 15 % superiores (5.22 m^3/s), nullificando efectivamente los beneficios de la infraestructura verde que son efectivos bajo clima actual. Tercero, los enfoques de infraestructura verde exclusiva son insuficientes para la resiliencia climática: la reducción del 18 % en volumen de inundación lograda bajo clima actual se aproxima a cero al confrontar intensidades climáticas futuras, confirmando que las estrategias híbridas verde-gris son esenciales. Cuarto, la concentración espacial de la vulnerabilidad en conductos y nodos específicos —diez conductos y ocho nodos como puntos de falla universales— habilita estrategias de intervención focalizadas que optimizan el uso de recursos de inversión limitados.

Las recomendaciones de política derivadas de estos hallazgos son: (1) revisar los estándares de diseño del drenaje hacia periodos mínimos de retorno de 25 a 50 años; (2) establecer marcos regulatorios que combinen mandatos de infraestructura verde con financiamiento para rehabilitación de infraestructura gris en cuellos de botella identificados; (3) priorizar la inversión de corto plazo en los conductos 12, 74, 5 y 60 y los nodos n1450, n1471 y n1451; y (4) implementar SUDS con mayor densidad e intensidad en subcuencas norte-centrales de riesgo crítico-alto, con configuraciones adaptadas a las condiciones topográficas e hidrológicas de cada zona.

La contribución metodológica central es la demostración de que un marco multidimensional de evaluación de vulnerabilidad —integrando métricas nodales, de conductos y por velocidad— proporciona diagnósticos superiores a los enfoques de indicador único al capturar mecanismos de falla diferenciados que se distribuyen espacialmente de manera separada y que requieren intervenciones distintas. La transferibilidad de este marco a otras ciudades latinoamericanas con contextos de datos limitados similares constituye una aportación relevante para la práctica de la planificación urbana resiliente en la región.

Como líneas de investigación futura, el trabajo avanzará hacia la fase de optimización multiobjetivo que utilizará los diagnósticos generados como insumos para identificar portafolios óptimos de SUDS combinados

con mejoras de infraestructura gris, minimizando costos del ciclo de vida mientras se maximizan la reducción de inundaciones y los co-beneficios ambientales bajo incertidumbre climática. Adicionalmente, se incorporará la simulación continua para caracterizar efectos de humedad antecedente, la integración de componentes socioeconómicos para análisis costo-beneficio y la aplicación de proyecciones climáticas regionalizadas de alta resolución.

Referencias

Adnan, M., Khan, F. A. & Khan, A. U. (2025). Rising waters: Designing climate-resilient urban drainage system. *Water Conservation Science and Engineering*. https://doi.org/10.1007/s41101-026-00482-4

Addas, A. (2024). Optimizing urban green infrastructure using a highly detailed surface modeling approach. *Discover Sustainability*, *5*(75). https://doi.org/10.1007/s43621-024-00266-7

Ahmad, S., Jia, H., Ashraf, A., Yin, D., Chen, Z., Ahmed, R. & Israr, M. (2024). A novel GIS-SWMM-ABM approach for flood risk assessment in data-scarce urban drainage systems. *Water*, *16*(11), 1464. https://doi.org/10.3390/w16111464

Almeida, M. d. C., Brito, R. S. & Jorge, C. (2025). Inflows into wastewater and stormwater systems: Sources, causes, and assessment. *Water*, *17*(7), 1082. https://doi.org/10.3390/w17071082

Alves, A., Vojinovic, Z., Kapelan, Z., Sanchez, A. & Gersonius, B. (2020). Exploring trade-offs among the multiple benefits of green-blue-grey infrastructure for urban flood mitigation. *Science of the Total Environment*, *703*, 134980. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134980

Bakhshipour, A. E., Dittmer, U., Haghighi, A. & Nowak, W. (2019). Hybrid green-blue-gray decentralized urban drainage systems design: A simulation-optimization framework. *Journal of Environmental Management*, *249*, 109364. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109364

Campos Aranda, D. F. (2009). *¿Hidrólogo o hidráulico? Cálculos y diseños que hace cada uno*. Universitarios Potosinos, 8–13.

Cavadini, G. B., Rodriguez, M., Nguyen, T. & Cook, L. M. (2024). Can blue–green infrastructure counteract the effects of climate change on combined sewer overflows? *Environmental Research Letters*, *19*(9), 094025. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad6462

Chapman, C. & Hall, J. W. (2022). Designing green infrastructure and sustainable drainage systems in urban development to achieve multiple ecosystem benefits. *Sustainable Cities and Society, 85*, 104078. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104078

Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Dobson, B., Jovanovic, T., Alonso-Álvarez, D. & Chegini, T. (2025). SWMManywhere: A workflow for generation and sensitivity analysis of synthetic urban drainage models, anywhere. *Environmental Modelling and Software*, *186*, 106358. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106358

Dong, X., Huang, S. & Zeng, S. (2017). Design and evaluation of control strategies in urban drainage systems in Kunming city. *Frontiers in Environmental Science and Engineering*, *11*(4), 13. https://doi.org/10.1007/s11783-017-0968-9

Echavarría Alfaro, F. (2006). Propuesta para la especialidad en obras hidráulicas urbanas. *XIX Congreso Nacional de Hidráulica, Cuernavaca, Morelos*.

Ferrans, P., Torres, M. N., Temprano, J. & Rodríguez Sánchez, J. P. (2022). Sustainable urban drainage system (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review. *Science of the Total Environment*, *806*, 150447. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150447

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D. & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, *12*(7), 525–542. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314

Funke, F. & Kleidorfer, M. (2024). Sensitivity of sustainable urban drainage systems to precipitation events and malfunctions. *Blue-Green Systems*, *6*(1), 33–52. https://doi.org/10.2166/bgs.2024.046

Huang, Z., Sun, Y., Fan, Y., Guan, R., Zhang, H., Zhao, L. & Zhang, B. (2025). Toward urban micro-renewal: Integrating "BMP-Plan" and

"LID-Design" for enhanced stormwater control – A case study. *Water*, *17*(7), 992. https://doi.org/10.3390/w17070992

Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG). (2018). *Diagnóstico municipal: Guadalajara*. Gobierno del Estado de Jalisco. https://iieg.gob.mx/contenido/Municipios/Guadalajara.pdf

Jayasooriya, V. M., Ng, A. W. M., Muthukumaran, S. & Perera, C. B. J. (2020). Optimization of green infrastructure practices in industrial areas for runoff management: A review on issues, challenges, and opportunities. *Water*, *12*(4), 1024. https://doi.org/10.3390/w12041024

Kim, J., Park, J., Cha, S. & Kwon, S. (2024). Applying low-impact development techniques for improved water management in urban areas. *Water*, *16*(19), 2837. https://doi.org/10.3390/w16192837

Kirshen, P., Caputo, L., Vogel, R. M., Mathisen, P., Rosner, A. & Renaud, T. (2015). Adapting urban infrastructure to climate change: A drainage case study. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *141*(4), 04014064. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000443

Lee, J. G., Nietch, C. T. & Panguluri, S. (2018). Drainage area characterization for evaluating green infrastructure using the Storm Water Management Model. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(5), 2615–2635. https://doi.org/10.5194/hess-22-2615-2018

Lu, J., Liu, J., Yu, Y., Liu, C. & Su, X. (2022). Network structure optimization method for urban drainage systems considering pipeline redundancies. *International Journal of Disaster Risk Science*, *13*, 793–809. https://doi.org/10.1007/s13753-022-00445-y

Maglia, N. & Raimondi, A. (2025). A new approach on design and verification of integrated sustainable urban drainage systems for stormwater management in urban areas. J*ournal of Environmental Management, 373*, 123882. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123882

Maiolo, M., Palermo, S. A., Brusco, A. C., Pirouz, B., Turco, M., Vinci, A., Spezzano, G. & Piro, P. (2020). On the use of a real-time control approach for urban stormwater management. *Water*, *12*(10), 2842. https://doi.org/10.3390/w12102842

Marsalek, J. (2008). *Urban water cycle processes and interactions* (Vol. 2, pp. 1–7). UNESCO-Taylor & Francis Group.

Miguez, M. G., Gomes, M. V. R., Amback, B. C., Mello Neto, H., Thomaz, F. R., Mattos, R. R., Veról, A. P., Sousa, M. M., Rezende, O. M. & de Magalhães, P. C. (2024). Conceptual framework to incorporate drainage solutions in the urban open space system. *Frontiers in Wate*r, *6*, 1468975. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1468975

Monachese, A. P., Gómez-Villarino, M. T., López-Santiago, J., Sanz, E., Almeida-Ñauñay, A. F. & Zubelzu, S. (2024). Challenges and innovations in urban drainage systems: Sustainable drainage systems focus. *Water*, *17*(1), 76. https://doi.org/10.3390/w17010076

Piadeh, F., Behzadian, K., Chen, A. S., Alani, A. M., Dajani, A., Campos, L. C. & Ward, S. (2024). Urban water infrastructure: A critical review on climate change impacts and adaptation strategies. *Science of the Total Environment*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175916

Quintero Espinosa, I. A. (2006). Agua y medio ambiente. Memorias del XIX Congreso Nacional de Hidráulica, Cuernavaca, Morelos, México.

Radu, G., Ionescu, C., Stanciu, M. & Lazaroiu, G. (2024). A synthesis of climate change impacts on stormwater management systems: Designing for resiliency and future challenges. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, *10*(2). https://doi.org/10.1061/JSWBAY.SWENG-533

Rashetnia, S., Sharma, A. K., Ladson, A. R., Browne, D. & Yaghoubi, E. (2025). Effectiveness of water-sensitive urban design techniques on stormwater quantity management at a residential allotment scale. *Water*, *17*(6), 899. https://doi.org/10.3390/w17060899

Rodríguez-Rojas, M. I., Garrido-Jiménez, F. J., Abarca-Álvarez, F. J. & Vallecillos-Siles, M. R. (2024). Advances in the integration of sustainable drainage systems into urban planning: A case study. *Sustainability*, *16*(7), 2658. https://doi.org/10.3390/su16072658

Rossman, L. A. (2015). Storm water management model user's manual, version 5.1 (EPA/600/R-14/413b). U.S. Environmental Protection Agency.

Seyedashraf, O., Bottacin-Busolin, A. & Harou, J. J. (2021). Many-objective optimization of sustainable drainage systems in urban areas with different surface slopes. *Water Resources Management*, *35*(7), 2449–2464. https://doi.org/10.1007/s11269-021-02840-4

Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). (2008). *Programa de manejo de aguas pluviales*. Guadalajara, México.

Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). (2017). *Plan maestro de drenaje y saneamiento – Área metropolitana de Guadalajara*. Guadalajara, México.

Sun, C., Rao, Q., Wang, M., Liu, Y., Xiong, Z., Zhao, J., Fan, C., Rana, M. A. I., Li, J. & Zhang, M. (2024). Multi-stage optimization of drainage systems for integrated grey–green infrastructure under backward planning. *Water*, *16*(13), 1825. https://doi.org/10.3390/w16131825

van Oorschot, J., Slootweg, M., Remme, R. P., Sprecher, B. & van der Voet, E. (2024). Optimizing green and gray infrastructure planning for sustainable urban development. *npj Urban Sustainability*, *4*(41). https://doi.org/10.1038/s42949-024-00178-5

Wang, J., Liu, J., Mei, C., Wang, H. & Lu, J. (2022). A multi-objective optimization model for synergistic effect analysis of integrated green-gray-blue drainage system in urban inundation control. *Journal of Hydrology, 609*, 127725. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127725

Xing, Y., Shao, D., Yang, Y., Lin, Q. & Xu, Z. (2025). Evaluation of drainage efficiency via street inlets under the influence of terrain slope in the course of pluvial urban flood event. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *58*, 102243. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102243

Yan, S., Lv, M., Fang, Y., Li, J., Xu, H., Li, G., Huang, L., Li, Y. & Song, G. (2024). Rapid treatment of urban initial rainwater runoff by A/O–magnetic flocculation combined process. *Water*, *16*(23), 3392. https://doi.org/10.3390/w16233392

Yang, S., Paik, K., McGrath, G., Urich, C., Kruger, E., Kumar, P. & Rao, P. S. C. (2023). *Comparing topology of engineered and natural drainage networks.* Lyles School of Civil Engineering, Purdue University.

Yazdanfar, Z. & Sharma, A. (2015). Urban drainage system planning and design – Challenges with climate change and urbanization: A review. *Water Science & Technology*, *72*(2), 163–179. https://doi.org/10.2166/wst.2015.207

Zhang, C., Li, R., Dai, L. & Zhang, P. (2021). Restoration of urban water environment landscape system and SWMM technology integration in water-scarce cities. *Iranian Journal of Science and Technology,*

Transactions of Civil Engineering. https://doi.org/10.1007/s40996-021-00586-y

Zhang, Y., Wang, E. & Gong, Y. (2024). A structural optimization of urban drainage systems: An optimization approach for mitigating urban floods. *Water*, *16*(12), 1696. https://doi.org/10.3390/w16121696

Zhong, Y., Liao, X., Yi, L., Wang, D., Wu, L. & Li, Y. (2022). Design combination optimized approach for urban stormwater and drainage systems using copula-based method. *Water*, *14*(11), 1717. https://doi.org/10.3390/w14111717

Zubelzu, S., Rodríguez-Sinobas, L., Sordo-Ward, Á., Pérez-Durán, A. & Cisneros-Almazán, R. (2020). Multi-objective approach for determining optimal sustainable urban drainage systems combination at city scale: The case of San Luis Potosí (México). *Water*, *12*(3), 835. https://doi.org/10.3390/w12030835

Capítulo 5

Materiales fotocatalíticos para la inhibición bacteriana en cuerpos de agua

Angel Josue Iñiguez Hernandez[1]
Aida Alejandra Guerrero de León[2]
Jenny Arratia Quijada[3]
María Guadalupe Pérez García[1]
Edgar David Moreno Medrano[1]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008028

1 Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas. Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara.
2 Departamento de Estudios del Agua y la Energía. Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara.
3 Departamento de Ciencias Biomédicas, Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara

Resumen

Los seres vivos requieren del agua como recurso esencial para mantener la vida; no obstante, cada vez es más difícil contar con acceso a agua limpia debido a que a nivel mundial se enfrenta un problema de contaminación ocasionado por la propia actividad humana. De forma rutinaria, se utilizan compuestos químicos o tecnologías para disminuir la contaminación química y microbiológica en el agua, como la cloración. Sin embargo, el uso de estos compuestos puede generar otras sustancias que resultan incluso más dañinas. Una alternativa son los materiales avanzados con propiedades fotocatalíticas, semejantes a esponjas, que, al captar radiación ultravioleta, generan agentes químicos superoxidantes llamados radicales hidroxilos, capaces de destruir contaminantes químicos y microbiológicos. Estos materiales actúan como filtros y retienen microorganismos como las bacterias. Combinando el efecto de filtro y la acción de los radicales hidroxilos, es posible una eliminación de hasta un 99 % de la bacteria E. coli en tiempos relativamente cortos de tratamiento en aguas sintéticas. De este modo, el diseño de este tipo de sistemas puede ayudar a mitigar el problema de contaminación química y microbiológica de forma amigable con el medio ambiente.

Introducción

En los últimos años, nuestros ríos, lagos y cuerpos de agua están sufriendo un grave deterioro ambiental por la actividad humana. El crecimiento acelerado de las ciudades, la expansión de la industria y la mala práctica de tirar aguas residuales sin tratar están destruyendo los ecosistemas y enfermando a las comunidades. Así, se estima que para el año 2050 el 70 % de la población mundial vivirá en ciudades, lo que aumentará drásticamente la cantidad de desechos que terminan en los cuerpos de agua (Parky Lee, 2019).

Un ejemplo alarmante en México es el río Santiago. Este lugar recibe descargas de más de 300 empresas y lleva años siendo uno de los ríos más contaminados del país (Kutralam-Muniasamy et al., 2022; McCulligh y Fregoso, 2019). En su agua podemos encontrar metales pesados y tóxicos como plomo, zinc, mercurio y arsénico (Rizo-Decelis y Andreo, 2015); contaminantes orgánicos como bacterias fecales E. coli que superan en 10 000 veces el límite permitido para que la vida acuática pueda sobrevivir (Montes Rubio et al., 2021). Consumir esta agua, bañarse en ella o usarla para el riego es un peligro enorme. No solo causa infecciones estomacales o diarrea; la exposición a este cóctel tóxico está ligada a enfermedades del corazón, problemas en los riñones, asma, abortos, malformaciones al nacer y hasta varios tipos de cáncer (Diego García, 2024).

Para tratar, potabilizar y purificar el agua contaminada, solemos emplear métodos o tecnologías convencionales como:

- El cloro: Es el más común, pero las bacterias se están volviendo inmunes a él. Además, al mezclarse con la suciedad del agua, el cloro crea nuevos compuestos químicos que resultan peligrosos para la salud (Shekhawat et al., 2021).
- La luz UV: Aunque es buena, muchas bacterias usan los mismos contaminantes flotantes como "escudo" para protegerse de la radiación y sobrevivir.
- El ozono: Es un gas excelente para desinfectar, pero es tan inestable que no se puede guardar en tanques; hay que fabricarlo en el mismo lugar y momento en que se va a usar, lo que complica su manejo y uso.

Debido a las desventajas de estos métodos, la ciencia ha desarrollado nuevas tecnologías, como lo son los procesos de oxidación avanzada (POA), que emplean agentes superoxidantes capaces de degradar contaminantes orgánicos e inorgánicos. Estos procesos crean especies químicas llamadas radicales hidroxilo que funcionan de dos formas:

1. Desintegran la química invisible: Atacan los contaminantes más difíciles y los rompen hasta transformarlos en cosas totalmente inofensivas, como agua y dióxido de carbono.
2. Hacen estallar a los microbios: Rompen las paredes de las bacterias y destruyen su ADN por completo, asegurando que no puedan recuperarse (Regmi et al., 2018).

Para lograr esto, los científicos han diseñado sistemas que contienen el efluente contaminado en contacto con materiales avanzados catalíticos y fotocatalíticos que captan la radiación ultravioleta de una fuente para generar los radicales hidroxilos y poder degradar los contaminantes de interés. En este capítulo se hablará con mayor detalle sobre el desarrollo y aplicación de sistemas y materiales fotocatalíticos para la inhibición bacteriana, específicamente de la bacteria E. coli, tratando de resaltar su viabilidad y desempeño.

Desarrollo

Dentro de todos los problemas de contaminación ambiental que se enfrentan a nivel mundial, la contaminación del agua representa una mayor amenaza para el ser humano, considerando que el 70 % de la Tierra es agua; de esta, el 97.5 % se encuentra en los mares y océanos como agua salada, mientras que solo el 2.5 % corresponde a agua dulce superficial, de la cual menos del 1 % se encuentra disponible para el uso en actividades humanas (Shekhar et al., 2025).

Esta agua disponible para el uso del ser humano recibe descargas de aguas residuales de forma constante, alcanzando cerca del 80 % en vertientes de ríos y océanos, lo cual favorece la contaminación de este recurso vital. En particular, esto se ha ocasionado debido al rápido crecimiento de las zonas urbanas, la expansión industrial y diversas intervenciones humanas, como el vertido de residuos industriales y domésticos sin tratar (Reddy et al., 2017). La situación en general ha afectado negativamente a la ecología de las regiones impactadas y al bienestar de las comunidades cercanas (Singh et al., 2022). Además, según proyecciones de las Naciones Unidas, se espera que para 2050 el 70 % de la población mundial viva en áreas urbanas, lo que podría incrementar aún más la cantidad de vertidos contaminantes en cuerpos de agua adyacentes (Park y Lee, 2019). Toda esta carga de contaminantes impide que el ciclo natural de purificación del agua se vea rebasado y no sea posible neutralizar los contaminantes de forma natural. La contaminación ocurre cuando sustancias tóxicas como productos químicos, microorganismos y metales pesados entran en contacto con cuerpos de agua, degradando su calidad

y haciéndolos peligrosos para el consumo y uso humano (Singh et al., 2022).

Entre los principales contaminantes se encuentran compuestos químicos a base de nitrógeno, fósforo, hidrocarburos, materia orgánica, fármacos, metales pesados y microplásticos, todos ellos comunes en aguas residuales (ONU-Agua, 2021). Estos contaminantes no solo tienen efectos adversos en el medio ambiente, sino que también son peligrosos para la salud humana, especialmente cuando el agua contaminada sirve como caldo de cultivo para patógenos como bacterias, hongos, protozoos y virus (Akpor et al., 2014). Las poblaciones cercanas a los ríos se ven principalmente afectadas debido a que muchas veces dependen del agua para consumo diario, riego o actividades recreativas, con lo cual se ponen en mayor riesgo de desarrollar enfermedades gastrointestinales, infecciones de la piel, problemas respiratorios y, en casos graves, cáncer debido a la bioacumulación de agentes tóxicos en la cadena alimentaria (Montes Rubio et al., 2021). Particularmente, el consumo de peces y otros organismos acuáticos contaminados, así como el uso de agua contaminada para riego de cultivos, amplifica estos riesgos para la salud de estas comunidades. Cabe mencionar que, a través del uso de esta agua contaminada en las actividades de la vida diaria, se han provocado cerca del 80 % de enfermedades e inclusive se ha atribuido como la causa de muerte infantil en un 50 % de los casos, particularmente por presentar cuadros de diarrea asociados con agua contaminada (Lin et al., 2022). Para 2022, se estimó que a nivel mundial cerca de 1700 millones de personas ingerían agua potable contaminada con heces, lo cual se asocia a contaminación microbiológica (ONU-Agua, 2021).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que el agua contaminada causa más de 505 000 muertes anuales por cólera de un total de entre 3 y 5 millones afectados, mientras que la bacteria coliforme (E. coli) presente en el agua contaminada puede causar síntomas graves en población infantil de 0-5 años, adultos mayores y personas con sistemas inmunes débiles; fiebre tifoidea, poliomielitis y cuadros de disentería, un tipo de inflamación gastrointestinal, pueden presentarse con alta incidencia en comunidades rurales con servicios sanitarios deficientes (ONU-Agua, 2021; Shekhar et al., 2025).

En México, el río Santiago ejemplifica esta problemática, recibiendo descargas de más de 300 empresas (Kutralam-Muniasamy et al., 2022; McCulligh y Fregoso, 2019). Dentro de los contaminantes presentes en este río se encuentran grasas, aceites y metales pesados peligrosos como plomo, zinc, mercurio y arsénico (Rizo-Decelis y Andreo, 2015). Además, estudios han revelado altas concentraciones de coliformes fecales, particularmente *Escherichia coli* (E. coli) con potencial patogénico, es decir, causante de enfermedades, superando en 10 000 veces los límites permitidos para la vida acuática, lo que implica serios riesgos para la salud humana (Montes Rubio et al., 2021). La presencia de coliformes fecales, específicamente E. coli, en cuerpos de agua contaminados como el río Santiago, representa un riesgo significativo para la salud humana. Estos microorganismos son indicadores de contaminación fecal y, además, pueden incluir otros patógenos que causan enfermedades graves con altas tasas de mortalidad.

Desde hace casi 20 años se ha venido monitoreando la situación de salud de las comunidades aledañas al río Santiago; a través de diversos reportes se ha señalado que se atribuyen altas tasas de mortalidad a cuadros de diarrea y gastroenteritis infecciosa, enfermedades renales, cuadros de asma y enfermedades de vías respiratorias e insuficiencia renal, tanto no especificada como crónica e hipertensiva, además de diversos tipos de cáncer (Montes Rubio et al., 2021). Otras enfermedades asociadas al agua contaminada son enfermedades cardiovasculares, alta incidencia de abortos y malformaciones congénitas (Diego García, 2024; Guerrero-de-León et al., 2018). De acuerdo con el estudio de Álvarez-Moya (2015), muchos de los cuadros patológicos pueden estar asociados con daños acumulativos al material genético.

En particular, las medidas de control microbiológico del agua contaminada se han visto limitadas debido a la presencia de un elevado número de contaminantes industriales, como metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos, los cuales provocan que los patógenos sean más resistentes a los métodos de desinfección convencionales, como la cloración y la ozonización (Cai et al., 2024; Rilstone et al., 2021). Por ello, para apoyar a la limpieza de los cuerpos de agua y mejorar las condiciones de salud de las comunidades afectadas, es necesario desarrollar métodos

avanzados de desinfección a nivel terciario y que sean amigables con el ambiente, como los procesos de oxidación avanzada mediante materiales fotocatalíticos, los cuales se ha demostrado que pueden superar las limitaciones de los tratamientos tradicionales y garantizar una eliminación más efectiva de los patógenos en estas condiciones complejas.

Además, aunque a simple vista el agua de la naturaleza parezca limpia, suele venir acompañada de hojas, lodo, contaminantes químicos y microorganismos invisibles que la vuelven insegura para consumo humano, por lo que es necesario un tratamiento que permita su potabilización. Así, tanto estas aguas naturales como urbanas o industriales deben ser potabilizadas. Las plantas potabilizadoras siguen una serie de etapas o pasos, diseñados para limpiar el agua desde lo más grande hasta lo microscópico. Estas etapas incluyen los siguientes procesos:

El agua se toma de su fuente natural (un río, por ejemplo) y pasa por unas rejillas que retienen objetos de tamaño macro como ramas, hojas, bolsas de plástico, entre otros. Posteriormente, tenemos una etapa llamada de coagulación y floculación que va a separar y retener partículas de arcilla o tierra y otros contaminantes. Para ello se emplean químicos coagulantes que funcionan como un imán que hace que la suciedad microscópica se pegue entre sí, formando pelotitas más grandes y pesadas llamadas flóculos.

Una vez que estas partículas se han agrupado en estas pelotitas pesadas, el agua pasa a unos tanques enormes y se deja reposar. Por pura gravedad, toda esa suciedad agrupada precipita o se hunde al fondo del tanque, formando una capa de lodo. El agua limpia se queda arriba y pasa a la siguiente etapa. Aunque el agua ya se ve cristalina, todavía pueden quedar partículas rebeldes dispersas. Para eliminarlas, el agua atraviesa unas camas profundas formadas por arena, grava o incluso carbón activado. Estos materiales atrapan hasta la última impureza flotante y eliminan malos olores o sabores.

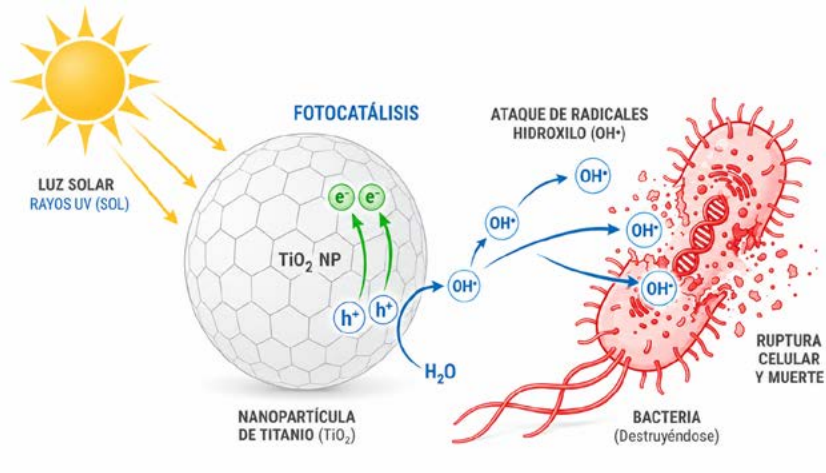
Ahora el agua ya está limpia y transparente, pero falta eliminar a los virus y bacterias, que son eliminados por un proceso de desinfección. En esta etapa se pueden emplear químicos como el cloro, que destruye los microbios y se queda en el agua para asegurarse de que siga desinfectada mientras viaja por las tuberías hasta el consumidor final. La

cloración es la forma más empleada y simple de desinfectar el agua; sin embargo, como se mencionó anteriormente, tiene algunas desventajas que pueden resolverse empleando otras tecnologías como los procesos de oxidación avanzada.

Los materiales fotocatalíticos presentan aplicaciones diversas, que van desde cuestiones de remediación ambiental e incluso la inhibición del crecimiento bacteriano. Para entender esta aplicación, es necesario explicar el principio de funcionamiento: estos materiales están compuestos por partículas que, al adsorber radiación ultravioleta, generan los radicales superoxidantes llamados hidroxilos, capaces de atacar y romper las paredes celulares de las bacterias, causando daños irreversibles en su interior hasta provocar su muerte.

Algunos ejemplos de partículas fotocatalíticas que son capaces de producir estos radicales son las de dióxido de titanio, magnetita, óxidos de zinc, entre otras, donde su tamaño y cómo se integran en un material soporte y poroso es fundamental. El material de soporte debe maximizar el área superficial expuesta para captar la radiación ultravioleta y así generar la mayor cantidad posible de estos radicales superoxidantes. En la figura 1 se muestra un diagrama esquemático de cómo podrían operar estos sistemas, donde, tras la captación de la luz ultravioleta, las nanopartículas (por ejemplo, dióxido de titanio, magnetita, óxidos de zinc) se activan e inician la producción de los radicales hidroxilo, los cuales comienzan a atacar a las bacterias, dañando todos sus componentes celulares, incluyendo el material genético, y eventualmente causando la muerte bacteriana.

Figura 1. *Diagrama representativo de funcionamiento de materiales fotocatalíticos*

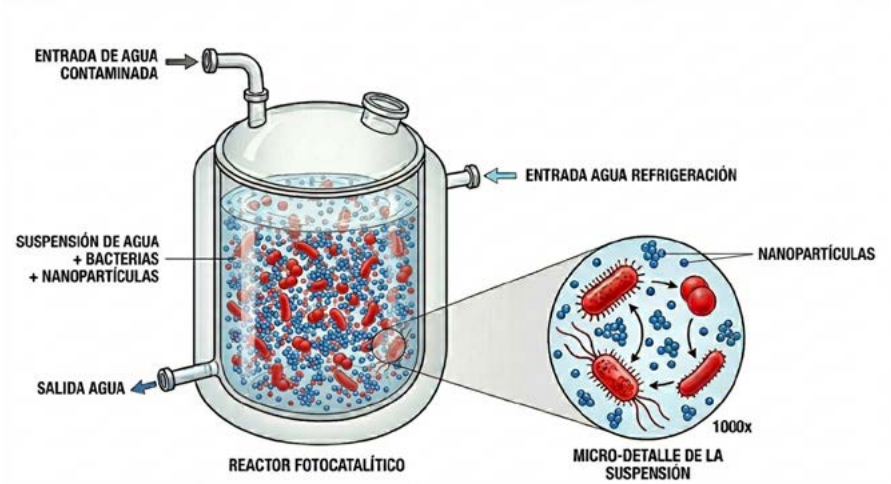


Así, existen muchos trabajos o estudios al respecto, por ejemplo, aquellos donde se emplean materiales fotocatalíticos a base de óxidos metálicos. Ejemplos de ello son los estudios de Ahmad y Zaidi (2020) y Brayner et al. (2006), quienes emplearon partículas de óxidos de zinc y óxidos de plata para inactivar E. coli en agua de consumo humano, alcanzando remociones de hasta el 97.5 %; mientras que Rafique et al. Al., (2020) emplearon nanopartículas de óxidos de cobre también para inactivar E. coli en aguas residuales. En otros trabajos, se emplearon nanopartículas de óxidos de magnesio sintetizadas por métodos verdes, esto es, que no fueron empleados agentes químicos durante su proceso de síntesis, lo que reduce su impacto ambiental (Adil et al., 2015; Li y Yang, 2011; Reddy et al., 2017). Algunas investigaciones reportan el uso de materiales fotocatalíticos a base de sulfuros metálicos de zinc, cadmio e indio, alcanzando una inactivación de E. coli de hasta el 99 % (Hojamberdiev et al., 2019; Wang et al., 2013).

Por otro lado, existen también estudios que emplean materiales avanzados fotocatalíticos que han sido funcionalizados o dopados con otras especies químicas que mejoran su capacidad de captar la radiación ultravioleta y así incrementar la cantidad de los superoxidantes hidroxilo y poder atacar a los contaminantes de una manera más eficiente y rápida.

Por ejemplo, Cho et. Al., (2021) sintetizaron un material de bismuto dopado con cobalto para inhibir E. coli de manera muy eficiente. Otros estudios demuestran que partículas de óxidos de titanio dopadas con oro tienen un mejor desempeño que aquellas sin el dopaje (Sagadevan et al., 2020). Similarmente, la plata puede emplearse para dopar óxidos de hierro e incrementar su capacidad fotocatalítica para la inhibición de bacterias como la E. coli (Khan et al., 2020).

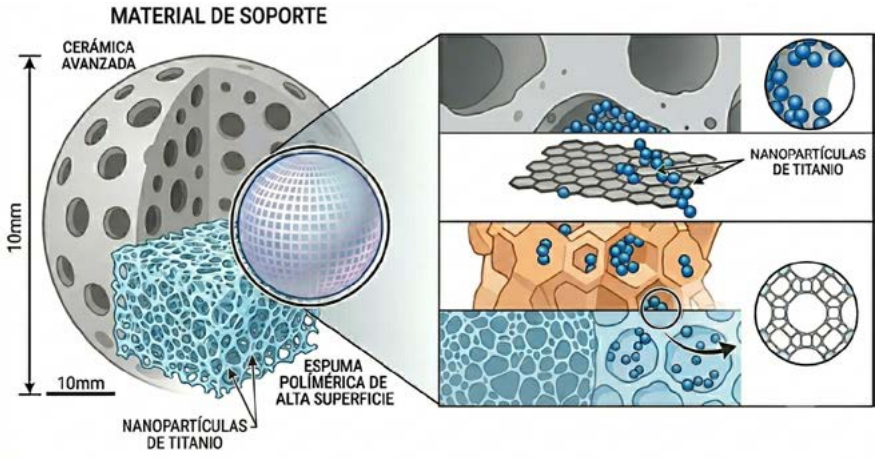
Figura 2. *Representación de nanopartículas con actividad fotocatalítica dispersadas, sin soporte*.



En los trabajos descritos anteriormente fueron empleados materiales fotocatalíticos dispersos en el efluente a tratar (Figura 2), lo que podría implicar algunas desventajas asociadas a su posterior recuperación. Esta desventaja podría resolverse soportando las partículas fotocatalíticas sobre otro material soporte, como, por ejemplo, materiales plásticos, zeolitas, materiales biodegradables, entre otros (Figura 3). Existen una gran cantidad de estudios y trabajos al respecto; por ejemplo, Guan et. Al., (2021) prepararon un material a base de quitosano como soporte de nanopartículas fotocatalíticas de óxidos de zinc y óxidos de cobre, alcanzando una inactivación de E. coli de hasta un 60 %. Similarmente, nanopartículas de dióxido de titanio fueron inmovilizadas o soportadas

en materiales plásticos de polietileno para degradar fenoles con radiación solar, alcanzando una descomposición del contaminante de hasta un 50 % (Tennakone et al., 1995). En trabajos como los publicados por Cámara et al., (2014) y Sadowski et al., (2019), inmovilizaron exitosamente nanopartículas de dióxido de titanio en películas plásticas con asistencia de tecnología de plasma.

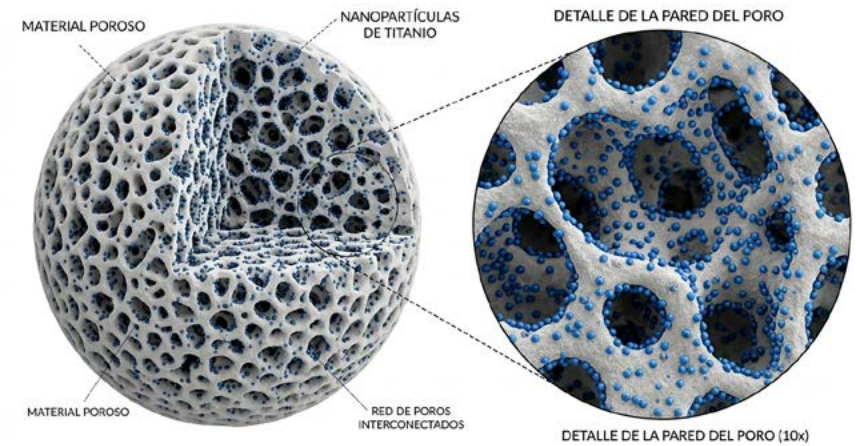
Figura 3. *Representación de nanopartículas con actividad fotocatalítica en materiales de soporte*.



Como puede verse, inmovilizar o soportar las partículas fotocatalíticas en otros materiales no es algo nuevo o novedoso; sin embargo, el desarrollo de estos materiales avanzados, tratando de mejorar sus capacidades de adsorción, filtración y, por supuesto, su actividad fotocatalítica, es de vital importancia. En este sentido, vamos a hablar con mayor detalle sobre el trabajo de Iñiguez Hernández (2024), quien en sus estudios de maestría propuso un material poroso a base de poliestireno como soporte de nanopartículas de dióxido de titanio. Estas nanopartículas quedaron dispuestas en las paredes de los huecos del material poroso, otorgando propiedades fotocatalíticas al material (Figura 4). Dichos materiales porosos se diseñaron en forma de perlas y se aplicaron para la limpieza de agua contaminada con coliformes a nivel de laboratorio, utilizando una

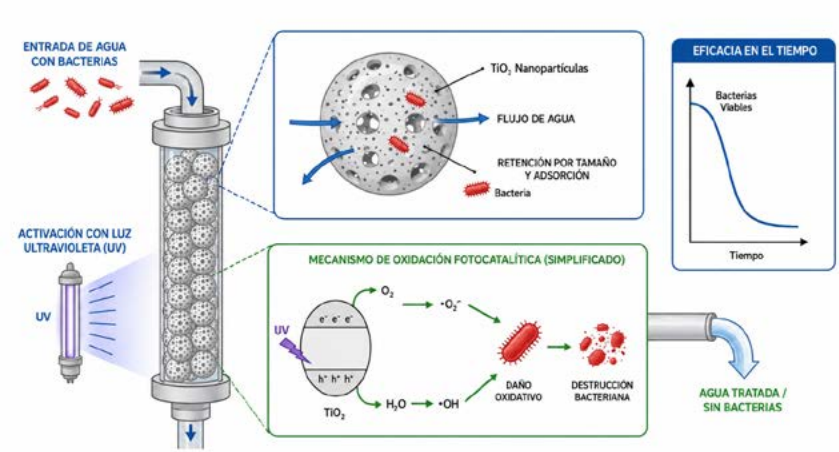
bacteria llamada E. coli ATCC25922 como modelo de estudio (Iñiguez Hernandez, 2024), ya que este tipo de bacteria coliforme puede encontrarse como contaminante de cuerpos de agua como el río Santiago en Jalisco (Iglesias Gonzales, 2024).

Figura 4. *Materiales porosos como soporte de nanopartículas de dióxido de titanio.*



La limpieza del agua contaminada se llevó a cabo en sistemas por lote y en flujo continuo (Figura 5). Los resultados señalaron que el sistema es capaz de funcionar como filtro al retener a las bacterias en los huecos del material poroso, mientras que la fotoactivación de las nanopartículas de dióxido de titanio mediante luz UV (como la luz solar) llevó a la inactivación y destrucción de las bacterias, dejando así libre de contaminación el agua. El material poroso aumentó la eficiencia del proceso de inactivación fotocatalítica de coliformes, logrando hasta un 99.99% de eliminación bacteriana en 30 minutos, con lo que se logró una desinfección más completa y efectiva que con los sistemas convencionales. En conjunto, el proceso de filtración y la actividad fotocatalítica facilitada por las perlas porosas pueden lograr casi un 100% de inactivación bacteriana cuando hay mayor concentración de nanopartículas fotocatalíticas (Iñiguez Hernandez, 2024).

Figura 5. *Representación de las perlas porosas con dióxido de titanio en un sistema en flujo para retener y destruir bacterias en agua contaminada.*



Tras la eliminación de las bacterias del agua contaminada, los materiales pueden limpiarse mediante procesos de esterilización sin perder sus características porosas y actividad fotocatalítica, lo que posibilito su reusó en al menos 10 ciclos de descontaminación biológica. Estos resultados demuestran el potencial de las perlas porosas con propiedades fotocatalíticas para su uso en procesos industriales de tratamiento de agua.

Conclusiones

En este capítulo se ha hablado sobre la problemática de la contaminación del agua por microorganismos y bacterias, lo que representa un grave problema para la salud humana. Dada esta problemática se ha discutido como los procesos de oxidación avanzada y la fotocatálisis podrían dar una solución eficiente a este problema. Así, los materiales avanzados porosos y diseñados con propiedades catalíticas y fotocatalíticas representan una alternativa eficiente para filtrar e inhibir contaminantes microbiológicos del agua.

En particular, las perlas porosas descritas son útiles para ayudar al proceso de eliminación de E. coli en agua modelo de laboratorio, tanto en sistemas en lote como en flujo continuo, logrando casi un 100 % de

inactivación bacteriana en 30 minutos. En el sistema en flujo continuo, las perlas son eficaces como filtros y fotocatalizadores para la inactivación de bacterias. Por otro lado, las perlas fueron reutilizadas en distintos ciclos de inactivación de bacterias, mostrando porcentajes de inactivación mayores al 99 % después de 10 ciclos de vida útil. Estos resultados destacan la potencial aplicación de este tipo de materiales en el tratamiento industrial de agua para la descontaminación de coliformes, siendo una solución prometedora para abordar los desafíos de la contaminación del agua. Además, las propiedades fotocatalíticas que presentan las perlas pueden aprovecharse para la degradación de compuestos orgánicos como colorantes, contaminantes emergentes como fármacos, pesticidas, etc., convirtiéndolas en un recurso valioso para el tratamiento de aguas y de remediación ambiental.

Referencias

Adil, S. F., Assal, M. E., Khan, M., Al-Warthan, A., Siddiqui, M. R. H. & Liz-Marzán, L. M. (2015). Biogenic synthesis of metallic nanoparticles and prospects toward green chemistry. *Dalton Transactions*, *44*(21), 9709–9717. https://doi.org/10.1039/C4DT03911J

Ahmad, M., Zaidi, S. J. A., Zoha, S., Khan, M. S., Shahid, M., Park, T. J. & Basit, M. A. (2020). Pseudo-SILAR assisted unique synthesis of ZnO/Ag2O nanocomposites for improved photocatalytic and antibacterial performance without cytotoxic effect. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *603*, 125200. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125200

Akpor, O. B., Otohinoyi, D. A., Olaolu, T. D. & Aderiye, J. B. I. (2014). Pollutants in wastewater effluents: Impacts and remediation processes. *International Journal of Environmental Research and Earth Science*.

Alvarez-Moya, C. (2015). Use of Comet Assay in Human Lymphocytes as a Molecular Biomarker for Simultaneous Monitoring of Genetic Damage and Genotoxicity in Residents Who Lived Nearby the Santiago River, Mexico, in 2012. *Global Journal of Biotechnology and Biomaterial Science*, *4*, 4–8. https://doi.org/10.17352/gjbbs.000002

Brayner, R., Ferrari-Iliou, R., Brivois, N., Djediat, S., Benedetti, M. F. & Fiévet, F. (2006). Toxicological impact studies based on Escherichia coli bacteria in ultrafine ZnO nanoparticles colloidal medium. *Nano Letters*, *6*(4), 866–870. https://doi.org/10.1021/nl052326h

Cai, Y., Zhao, Y., Wang, C., Yadav, A. K., Wei, T. & Kang, P. (2024). Ozone disinfection of waterborne pathogens: A review of mechanisms, applications, and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34991-3

Cámara, R. M., Crespo, E., Portela, R., Suárez, S., Bautista, L., Gutiérrez-Martín, F. & Sánchez, B. (2014). Enhanced photocatalytic activity of TiO2 thin films on plasma-pretreated organic polymers. *Catalysis Today*, *230*, 145–151. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.11.029

Cho, E.-C., Chang-Jian, C.-W., Huang, J.-H., Lee, G.-Y., Hung, W.-H., Sung, M.-Y., Lee, K.-C., Weng, H. C., Syu, W.-L., Hsiao, Y.-S., et al. (2021). Co2+-doped BiOBrxCl1-x hierarchical microspheres display enhanced visible-light photocatalytic performance in the degradation of rhodamine B and antibiotics and the inactivation of E. coli. *Journal of Hazardous Materials*, *402*, 123457. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123457

Diego García, J. F. (2024). Contaminación del agua. *Voces y Saberes*, *4*. https://online.pubhtml5.com/jots/xmna/

Guan, G., Zhang, L., Zhu, J., Wu, H., Li, W. & Sun, Q. (2021). Antibacterial properties and mechanism of biopolymer-based films functionalized by CuO/ZnO nanoparticles against Escherichia coli and Staphylococcus aureus. *Journal of Hazardous Materials*, *402*, 123542. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123542

Guerrero-de-León, A. A., Gerritsen, P. R. W., Arellano-Avelar, M. A. & Rocha-Muñoz, A. D. (2018). Salud y contaminación del río Santiago y río Ayuquila en México. En *Agua y ecología política en España y México*.

Hojamberdiev, M., Piccirillo, C., Cai, Y., Kadirova, Z. C., Yubuta, K. & Ruzimuradov, O. (2019). ZnS-containing industrial waste: Antibacterial activity and effects of thermal treatment temperature and atmosphere on photocatalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds*, *791*, 971–982. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.382

Iglesias Gonzales, G. (2024). *Relación entre las partículas suspendidas fraccionadas y sedimentos con los niveles de metales pesados en agua contaminada en el río Santiago* [Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara].

Iñiguez Hernandez, A. J. (2024). *Perlas porosas nanocompuestas para la actividad fotocatalítica de coliformes y su aplicación en agua proveniente del río Santiago* [Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara].

Khan, A. U., Rahman, A. U., Yuan, Q., Ahmad, A., Khan, Z. U. H., Mahnashi, M. H., Alyami, B. A., Alqahtani, Y. S., Ullah, S. & Wirman, A. P. (2020). Facile and eco-benign fabrication of Ag/Fe2O3 nanocomposite using Algaia Monozyga leaves extract and its' efficient biocidal and photocatalytic applications. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, *32*, 101970. https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.101970

Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., Elizalde-Martínez, I. & Chari, S. V. (2022). Surface water quality in the upstream of the highly contaminated Santiago River (Mexico) during the COVID-19 lockdown. *Environmental Earth Sciences*, *81*(11), 334. https://doi.org/10.1007/s12665-022-10430-9

Li, Z. & Yang, T. (2011). The application of biomolecules in the preparation of nanomaterials. *Biomedical Engineering: Frontiers and Challenges*, 319.

Lin, L., Yang, H. & Xu, X. (2022). Efectos de la contaminación del agua en la salud humana y la heterogeneidad de las enfermedades: una revisión. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 1–16. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246

Maduelosi, J. N. & Ezuluofor, M. U. (2023). La educación como vacuna contra el acoso escolar a niñas. *British Journal of Multi-Disciplinary Advanced Studies*, *4*, 1–8. https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0207

McCulligh, C. & Fregoso, G. V. (2019). Defiance from Down River: Deflection and dispute in the urban-industrial metabolism of pollution in Guadalajara. *Sustainability*, *11*(22), 6294. https://doi.org/10.3390/su11226294

Montes Rubio, P. Y., Castro Aguilar, N., Ávila Domínguez, R., Macbani Olvera, P., Raygoza Anaya, M., Garnica Guerrero, B., Reynoso Vázquez, J. & Ruvalcaba-Ledezma, J. C. (2021). Contaminación del

Río Santiago: Un problema epidemiológico ambiental persistente de Salud Pública en Jalisco, México. *Journal of Negative & No Positive Results*, *6*(9), 1222–1236.

ONU-Agua. (2021). Resumen actualizado de 2021 sobre los progresos en el ODS 6: agua y saneamiento para todos. https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2021/12/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021_SP.pdf

Park, K. & Lee, M. H. (2019). The development and application of the urban flood risk assessment model for reflecting upon urban planning elements. *Water*, *11*(5), 920. https://doi.org/10.3390/w11050920

Reddy, R., Appannagari, R. & Ramamohana, D. R. (2017). Environmental pollution causes and consequences: A study. N*orth Asian International Research Journal of Social Science & Humanities*, *3*.

Regmi, C., Joshi, B., Ray, S. K., Gyawali, G. & Pandey, R. P. (2018). Understanding mechanism of photocatalytic microbial decontamination of environmental wastewater. *Frontiers in Chemistry*, *6*, 33. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00033

Rilstone, V., Vignale, L., Craddock, J., Cushing, A., Filion, Y. & Champagne, P. (2021). The role of antibiotics and heavy metals on the development, promotion, and dissemination of antimicrobial resistance in drinking water biofilms. *Chemosphere*, *282*, 131048. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131048

Rizo-Decelis, L. D. & Andreo, B. (2015). Water quality assessment of the Santiago River and attenuation capacity of pollutants downstream Guadalajara City, Mexico. *River Research and Applications*, *32*(7), 1505–1516. https://doi.org/10.1002/rra.2988

Sadowski, R., Wach, A., Buchalska, M., Kuśtrowski, P. & Macyk, W. (2019). Photosensitized TiO2 films on polymers—Titania-polymer interactions and visible light induced photoactivity. *Applied Surface Science*, *475*, 710–719. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.036

Sagadevan, S., Vennila, S., Muthukrishnan, L., Murugan, B., Anita Lett, J., Shahid, M. M., Fatimah, I., Akbarzadeh, O., Mohammad, F. & Johan, M. R. (2020). Improved antimicrobial efficacy and photocatalytic performance of gold decorated titanium dioxide nanohybrid. *Optik*, *224*, 165515. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165515

Shekhawat, S. S., Kulshreshtha, N. M., Vivekanand, V. & Gupta, A. B. (2021). Impact of combined chlorine and UV technology on the bacterial diversity, antibiotic resistance genes and disinfection by-products in treated sewage. *Bioresource Technology*, *339*, 125615. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125615

Shekhar, C., Khosya, R., Sharma, A. K., Thakur, K., Mahajan, D., Kumar, R., Kumar, S. & Sharma, A. K. (2025). A systematic review on health risks of water pollutants: Classification, effects and innovative solutions for conservation. *Toxicology Research*, *14*(1), tfaf014. https://doi.org/10.1093/toxres/tfaf014

Singh, N., Poonia, T., Siwal, S. S., Srivastav, A. L., Sharma, H. K. & Mittal, S. K. (2022). Challenges of water contamination in urban areas. En *Current Directions in Water Scarcity Research* (Vol. 6, pp. 173–202). https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91838-1.00008-7

Tennakone, K., Tilakaratne, C. T. K. & Kottegoda, I. R. M. (1995). Photocatalytic degradation of organic contaminants in water with TiO2 supported on polythene films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *87*, 177–179.

Wang, W., Ng, T. W., Ho, W., Huang, J., Liang, S., An, T., Li, G., Yu, J. C. & Wong, P. K. (2013). CdIn2S4 microsphere as an efficient visible-light-driven photocatalyst for bacterial inactivation: Synthesis, characterizations and photocatalytic inactivation mechanisms. *Applied Catalysis B: Environmental*, *129*, 482–490.

Capítulo 6

Nanomateriales magnéticos y economía circular: Aplicaciones sostenibles para el tratamiento de agua. Un caso de estudio con ferritas de cobre y cobalto

Corazón Giovanna Morales Amaya[1]
Jorge Enrique Rivera Salinas[2]
Pablo Daniel Astudillo Sánchez[3]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008035

[1] Departamento de Química Macromolecular y Nanomateriales. Centro de Investigación en Química Aplicada. Enrique Reyna H.
[2] Departamento de Procesos de Transformación del Centro de Investigación en Química Aplicada. Enrique Reyna H.
[3] Departamento de Ciencias Básicas, Aplicadas e Ingenierías del Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara

Resumen

La contaminación del agua por metales pesados, microplásticos y otros contaminantes emergentes representa uno de los principales desafíos ambientales y de salud pública a nivel mundial. El crecimiento industrial, urbano y agrícola ha incrementado la presencia de sustancias tóxicas como arsénico, plomo, mercurio, colorantes y residuos plásticos en cuerpos de agua, afectando a ecosistemas y poniendo en riesgo la disponibilidad de agua segura para consumo humano. Frente a este panorama, la búsqueda de tecnologías sostenibles y eficientes para el tratamiento de agua se ha convertido en una prioridad científica y tecnológica. En los últimos años, la nanotecnología ha mostrado un gran potencial en el desarrollo de materiales avanzados capaces de mejorar los procesos de remoción de contaminantes. Entre ellos, los nanomateriales magnéticos, particularmente las ferritas de espinela, destacan por sus propiedades fisicoquímicas, alta estabilidad, facilidad de recuperación mediante campos magnéticos y capacidad de reutilización. Asimismo, el aprovechamiento de residuos agroindustriales para la obtención de materiales híbridos representa una alternativa alineada con los principios de economía circular y sustentabilidad ambiental. El presente capítulo aborda la problemática actual de la contaminación hídrica y el potencial de los nanomateriales magnéticos en aplicaciones ambientales, destacando sus ventajas, aplicaciones y retos actuales. Además, se presenta un caso de estudio basado en ferritas espinela de $CoCuFe_2O_4$ y $CuFe_2O_4$, utilizadas como ejemplo del desarrollo de materiales con potencial para aplicaciones en tratamiento de agua y remoción de contaminantes.

Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida, el desarrollo humano y las actividades productivas; sin embargo, su disponibilidad y calidad se han visto gravemente afectadas durante las últimas décadas debido al

crecimiento poblacional, la urbanización acelerada, la industrialización y el cambio climático. Actualmente, millones de personas en el mundo enfrentan problemas relacionados con el acceso limitado al agua potable y al saneamiento, situación que representa uno de los principales retos ambientales y sociales del siglo XXI (El-Khouri Vidarte, 2016).

Además de la escasez hídrica, existe una creciente preocupación por la contaminación de cuerpos de aguas superficiales y subterráneos debido a descargas industriales, actividades agrícolas y residuos urbanos (Alarcón-Herrera et al., 2013). Entre los contaminantes de mayor interés destacan los metales pesados, microplásticos, colorantes y residuos farmacéuticos, los cuales pueden persistir en el ambiente y representar riesgos para los ecosistemas y la salud humana (Bracamontes-Ruelas et al., 2025).

En México, regiones como la Comarca Lagunera, Sonora, Hidalgo y San Luis Potosí han reportado problemas asociados con contaminación por arsénico y otros metales pesados en agua destinada al consumo humano (Morales-Amaya et al., 2021a). Los tratamientos convencionales de purificación de agua presentan limitaciones frente a contaminantes emergentes y compuestos altamente persistentes, lo que ha impulsado la búsqueda de tecnologías más eficientes y sostenibles (Litter et al., 2010). En este contexto, la nanotecnología ha mostrado gran potencial debido a la capacidad de los nanomateriales para interactuar con contaminantes a escala molecular, favoreciendo procesos de adsorción, separación y degradación (Bhateria y Singh, 2019). Particularmente, los nanomateriales magnéticos tipo ferrita han despertado interés por su elevada área superficial, propiedades magnéticas y facilidad de recuperación mediante campos magnéticos externos (Morales-Amaya et al., 2021b, 2025). Además, la integración de biomasa y residuos agroindustriales en materiales híbridos representa una estrategia alineada con los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental. El presente capítulo aborda la problemática actual de la contaminación hídrica y el potencial de los nanomateriales magnéticos para aplicaciones ambientales, exponiendo un caso de estudio basado en ferritas de espinela de cobre y cobalto utilizadas en procesos de remoción de arsénico en agua.

Contaminantes emergentes y riesgos ambientales

La contaminación derivada de actividades industriales, agrícolas, mineras y urbanas ha provocado la liberación continua de sustancias tóxicas hacia los cuerpos de agua. Muchos de estos contaminantes presentan alta persistencia, movilidad y la capacidad de acumulación en organismos vivos, generando riesgos tanto para los ecosistemas como para la salud humana (Hernández, 2021). En las últimas décadas, estos contaminantes han sido detectados en agua potable, sedimentos, alimentos y organismos acuáticos, generando preocupación por sus posibles efectos ambientales y sanitarios. Además, muchos de ellos presentan limitada remoción mediante tratamientos convencionales, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías para su control y remoción (Litter et al., 2010). Algunos ejemplos se explican a continuación:

Los mestales

Los metales pesados constituyen uno de los grupos de contaminantes más preocupantes debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación. A diferencia de muchos compuestos orgánicos, estos elementos no se degradan fácilmente y pueden permanecer durante largos periodos en agua, suelo y sedimentos. En México, diversas regiones con actividad minera, industrial y agrícola han reportado concentraciones elevadas de metales pesados, representando un riesgo para los ecosistemas y la salud humana. La Tabla 1 resume las principales fuentes de contaminación, regiones afectadas y efectos en la salud asociados con algunos de los metales pesados de mayor relevancia ambiental.

Tabla 1. *Principales metales pesados de preocupación ambiental, fuentes de contaminación y efectos en la salud.*

Metal	Principales fuentes	Regiones afectas en México	Principales efectos en la salud
Arsénico (As)	Presencia natural en acuíferos, minería y actividades metalúrgicas	Comarca Lagunera (Coahuila-Durango), Hidalgo, Sonora y San Luis Potosi	Lesiones cutáneas, enfermedades cardiovasculares, alteraciones neurológicas y cáncer de piel, pulmón y vejiga (Huang et al., 2015; McClintock et al., 2012).
Plomo (Pb)	Bacterias, pinturas, residuos industriales, emisiones vehiculares y actividades mineras	Zonas urbanas e industriales; comunidades cercanas a distritos mineros	Daño neurológico, problemas de aprendizaje y desarrollo cognitivo en niños; efectos cardiovasculares y renales en adultos (Kanchelashvili et al., 2022).
Mercurio (Hg)	Minería, combustión de combustibles fósiles y procesos industriales	Cuerpos de agua asociados con actividades mineras e industriales	Alteraciones motoras, daño neurológico, problemas cognitivos y afectaciones durante el desarrollo fetal (Rice et al., 2014)
Cadmio (Cd)	Fertilizantes fosfatos, actividades metalúrgicas y residuos industriales	Zonas agrícolas e industriales con uso intensivo de fertilizantes	Daño renal, alteraciones óseas, problemas respiratorios y transferencia a la cadena alimenticia (Rasin et al., 2025).

Microplásticos y contaminantes orgánicos

En los últimos años, los microplásticos y diversos contaminantes orgánicos han cobrado gran relevancia debido a su presencia generalizada en ambientes acuáticos y a sus posibles efectos sobre los ecosistemas y la salud humana (Priya et al., 2023). A diferencia de los contaminantes tradicionales, muchos de estos compuestos no eran monitoreados de manera rutinaria décadas atrás, por lo que actualmente representan un desafío importante para los sistemas de tratamiento y regulación ambiental.

El crecimiento industrial, el aumento en el consumo de productos químicos y farmacéuticos, así como la producción masiva de materiales plásticos, han favorecido la liberación continua de estas sustancias hacia ríos, lagos, océanos y aguas subterráneas. Diversos estudios han reportado la presencia de contaminantes emergentes incluso en agua potable, alimentos y organismos acuáticos destinados al consumo humano, lo que ha incrementado la preocupación científica y social (Priya et al., 2023).

Colorantes

Los colorantes industriales son ampliamente utilizados en sectores textiles, alimentarios, farmacéuticos, cosméticos y de manufactura (Vallarasu et al., 2023). Muchos de estos compuestos presentan estructuras químicas complejas y alta estabilidad, lo que dificulta su degradación en sistemas convencionales de tratamiento.

La industria textil es considerada una de las principales fuentes de contaminación por colorantes debido al elevado volumen de agua utilizado durante procesos de teñido y acabado. La presencia de colorantes en sistemas acuáticos puede disminuir la penetración de luz solar y afectar procesos fotosintéticos esenciales para organismos acuáticos. Asimismo, algunos compuestos presentan elevada toxicidad y pueden generar efectos adversos sobre microorganismos, peces y plantas acuáticas (Arcon y Franco, 2021). En México, estados con importante actividad textil e industrial, como Puebla, Estado de México, Jalisco y Guanajuato, han reportado problemas relacionados con descargas de aguas residuales coloreadas en ríos y canales (Aguilar-Aguilar et al., 2023).

Fármacos

Los residuos farmacéuticos incluyen antibióticos, analgésicos, antinflamatorios y hormonas detectadas en aguas residuales, ríos e incluso agua potable (Aguilar-Aguilar et al., 2023). Aunque suelen encontrarse en bajas concentraciones, su liberación constante favorece la exposición crónica de organismos acuáticos.

Uno de los problemas más preocupantes asociados con la presencia de antibiótico en ambientes acuáticos es el desarrollo de resistencia bacteriana. Asimismo, hormonas y compuestos endocrinos presentes en aguas residuales han demostrado capacidad para alterar procesos reproductivos y hormonales en peces y otros organismos acuáticos. Debido a ello, organismos internacionales han incrementado el interés en monitorear y regular este tipo de contaminantes emergentes.

En México, investigaciones recientes han identificado residuos farmacéuticos en cuerpos de agua cercanos a grandes zonas urbanas y hospitalarias, particularmente en ríos receptores de aguas residuales parcialmente tratadas (Aguilar-Aguilar et al., 2023).

Microplásticos

Los microplásticos son partículas menores a 5 mm originadas por la fragmentación de residuos plásticos (Aguilar-Aguilar et al., 2023). La producción masiva de materiales plásticos durante las últimas décadas ha provocado una acumulación considerable de residuos en ecosistemas terrestres y acuáticos. Actualmente, los microplásticos son considerados uno de los contaminantes emergentes de mayor preocupación debido a su amplia distribución ambiental y dificultad de remoción.

La presencia de microplásticos en ambientes acuáticos representa un problema complejo debido a su capacidad para actuar como vectores de contaminantes químicos, metales pesados y microrganismos patógenos (Aguilar-Aguilar et al., 2023). Además, organismos acuáticos pueden ingerir estas partículas, favoreciendo su trasferencia a lo largo de la cadena alimentaria.

En México, diferentes investigaciones han identificado microplásticos en playas, ríos, lagunas y sistemas de abastecimiento de agua. Los efectos de la exposición humana a microplásticos continúan en estudio, investigaciones recientes sugieren posibles efectos relacionados con inflamación, estrés oxidativo y alteraciones celulares (Aguilar-Aguilar et al., 2023). Debido a ello, el monitoreo y desarrollo de tecnologías capaces de remover partículas plásticas y contaminantes asociados representa actualmente una prioridad ambiental y sanitaria.

Impacto en la salud y el ambiente

La presencia de metales pesados, contaminantes orgánicos y microplásticos en el ambiente representa uno de los principales problemas de salud pública y deterioro ecológico a nivel mundial. La creciente liberación de estas sustancias hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos ha provocado preocupación debido a su persistencia, movilidad y capacidad de incorporarse a cadenas alimenticias (Aguilar-Aguilar et al., 2023; Arias-Hoyos et al., 2023). Los ecosistemas acuáticos son particularmente vulnerables a este tipo de contaminación. La acumulación de metales pesados y compuestos orgánicos puede alterar parámetros fisicoquímicos del agua, afectar microorganismos esenciales para el equilibrio ecológico y generar toxicidad en peces, plantas acuáticas e invertebrados (Aguilar-Aguilar et al., 2023; Arias-Hoyos et al., 2023; Dulta et al., 2025). Asimismo, la presencia de contaminantes puede modificar procesos biológicos como la fotosíntesis, respiración y reproducción de diversas especies.

Desde el punto de vista sanitario, la exposición prolongada a contaminantes tóxicos puede ocurrir mediante consumo de agua contaminada, ingestión de alimentos, inhalación de partículas o contacto dérmico. Dependiendo del contaminante, los efectos sobre la salud pueden incluir alteraciones neurológicas, daños renales, enfermedades respiratorias, problemas cardiovasculares, afectaciones endocrinas y distintos tipos de cáncer (Aguilar-Aguilar et al., 2023; Arias-Hoyos et al., 2023).

En regiones donde existe contaminación de acuíferos o limitada infraestructura de tratamiento, el riesgo de exposición humana puede incrementarse considerablemente. Esto resulta especialmente preocupante en comunidades vulnerables que dependen directamente de fuentes de agua subterránea para consumo humano y actividades agrícolas.

La creciente preocupación por los efectos de estos contaminantes ha impulsado el desarrollo de nuevas estrategias para monitoreo, prevención y remoción en sistemas acuáticos. En este contexto, tecnologías basadas en materiales avanzados y nanotecnología han mostrado un gran potencial debido a su elevada eficiencia y capacidad de adaptarse a diferentes tipos de contaminantes.

Nanotecnología aplicada al tratamiento de agua

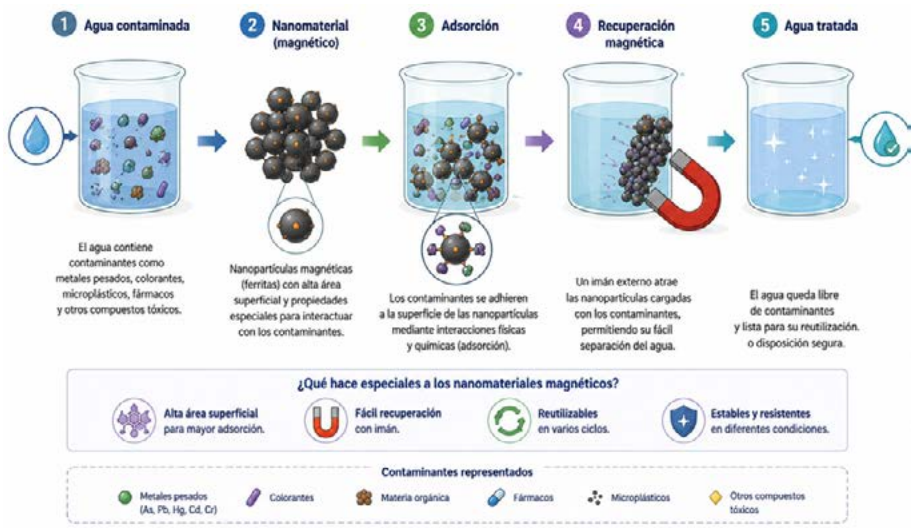
El desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de agua ha impulsado el interés en materiales avanzados capaces de remover contaminantes de manera más eficiente y sostenible. En este contexto, la nanotecnología ha surgido como una de las áreas científicas con mayor potencial debido a las propiedades que exhiben los materiales a escala nanométrica (Morales-Amaya et al., 2025).

Los nanomateriales poseen dimensiones menores a 100 nm, lo que les confiere características fisicoquímicas diferentes a las observadas en materiales convencionales (Morales-Amaya et al., 2021b, 2025). A esta escala, los materiales presentan una elevada relación área superficie-volumen, mayor reactividad química y propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas mejoradas. Estas características han permitido desarrollar aplicaciones en medicina, electrónica, energía y especialmente en remediación ambiental y tratamiento de agua.

En sistemas acuáticos contaminados, los nanomateriales pueden interactuar con contaminantes mediante procesos de adsorción, intercambio iónico, separación magnética, fotocatálisis y degradación química. Gracias a ello, han mostrado alta eficiencia para remover metales pesados, colorantes, compuestos farmacéuticos, pesticidas y microorganismos presentes en agua.

Dentro de los diferentes tipos de nanomateriales utilizados en aplicaciones ambientales, los nanomateriales magnéticos han despertado especial interés debido a su capacidad para ser recuperados fácilmente mediante campos magnéticos externos, facilitando su reutilización y disminuyendo la generación de residuos secundarios. En la Figura 2 se muestra el esquema general de nanotecnología aplicada al tratamiento de agua.

Figura 2. *Esquema ilustrativo sobre el funcionamiento de los nanomateriales magnéticos en el tratamiento de agua.*



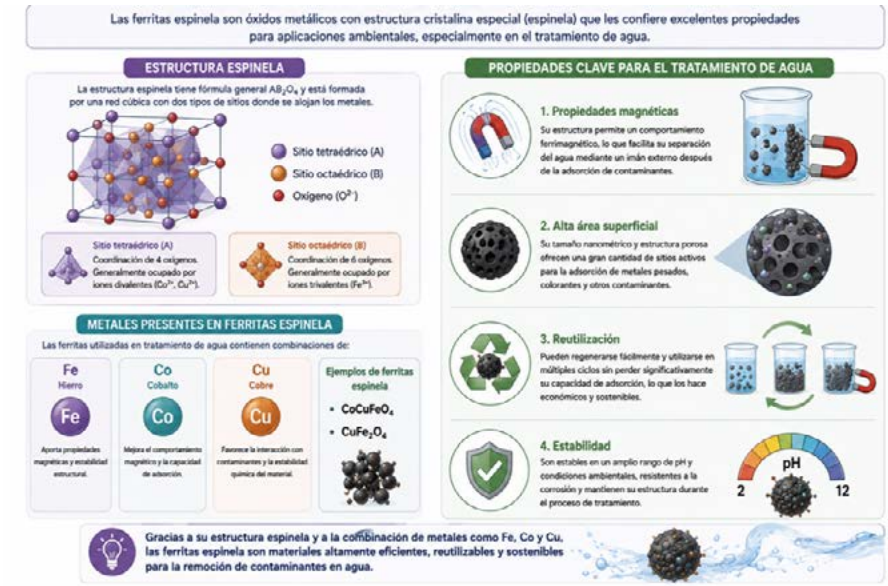
Las nanopartículas actúan como pequeñas "trampas" capaces de capturar metales pesados, colorantes, fármacos, microplásticos y otros contaminantes. Una vez saturadas, pueden retirarse fácilmente utilizando un imán, permitiendo obtener agua más limpia y favoreciendo la reutilización del material.

¿Qué son los nanomateriales magnéticos?

Los nanomateriales magnéticos son materiales que presentan propiedades magnéticas a escala nanométrica y que pueden responder a la presencia de un campo magnético externo. Entre los más estudiados se encuentran las ferritas espinela, óxidos metálicos formados generalmente por hierro combinado con otros metales como cobalto, cobre, níquel, manganeso o zinc, como se observa en la Figura 3 (Thanh et al., 2018; Tombácz et al., 2015).

Estos materiales han generado relevancia en aplicaciones ambientales debido a su estabilidad química, facilidad de síntesis y propiedades magnéticas, las cuales permiten separarlos rápidamente del agua después de un proceso de tratamiento. Además, presentan buena compatibilidad con otros materiales, favoreciendo la formación de materiales híbridos y compósitos con propiedades mejoradas.

Figura 3. *¿Por qué las ferritas espinela son tan interesantes para limpiar agua?*



Su estructura cristalina permite combinar metales como hierro, cobre y cobalto para obtener materiales con propiedades magnéticas, gran capacidad de captura de contaminantes, estabilidad y posibilidad de reutilización en múltiples ciclos de tratamiento

Ferritas

Las ferritas son materiales cerámicos compuestos principalmente por óxidos de hierro y otros metales de transición. Muchas de ellas presentan estructura cristalina tipo espinela, caracterizada por una distribución específica de cationes metálicos dentro de la red cristalina.

Entre las ferritas más utilizadas en aplicaciones ambientales destacan la ferrita de cobalto ($CoFe_2O_4$), ferrita de cobre ($CuFe_2O_4$), ferrita de manganeso ($MnFe_2O_4$) y ferrita de zinc ($ZnFe_2O_4$).

Estos materiales poseen propiedades magnéticas y alta estabilidad térmica y química, lo que los convierte en candidatos prometedores para procesos de adsorción y separación de contaminantes (Ma et al., 2018).

En años recientes, las ferritas han sido ampliamente investigadas para la remoción de arsénico, plomo, mercurio, colorantes y contaminantes orgánicos emergentes. Asimismo, algunos estudios han demostrado su potencial en procesos fotocatalíticos y aplicaciones antimicrobianas.

En comparación con adsorbentes convencionales, las ferritas presentan ventajas importantes relacionadas con su tamaño nanométrico, elevada área superficial y posibilidad de recuperación magnética. Estas características favorecen una mayor interacción con contaminantes y reducen costos asociados con la separación del material después del tratamiento.

Propiedades magnéticas

Las propiedades magnéticas de estos materiales dependen de factores como composición química, tamaño de partícula, estructura cristalina y método de síntesis. A escala nanométrica, muchas ferritas presentan comportamiento ferromagnético o superparamagnético, permitiendo responder rápidamente a campos magnéticos externos.

Una de las principales ventajas de los nanomateriales magnéticos es la posibilidad de separarlos fácilmente del agua mediante imanes externos, evitando procesos complejos de filtración o centrifugación. Esta propiedad facilita la recuperación del adsorbente y favorece su reutilización en múltiples ciclos de tratamiento.

Además, las propiedades magnéticas permiten desarrollar sistemas híbridos y tecnologías de separación más eficientes, particularmente en aplicaciones de tratamiento de agua y remediación ambiental.

Ventajas de remoción de contaminantes

Los nanomateriales magnéticos han mostrado gran potencial en aplicaciones ambientales debido a su elevada capacidad de adsorción, facilidad de recuperación y posibilidad de reutilización, características que los posicionan como alternativas prometedoras frente a tecnologías convencionales de tratamiento. La Tabla 2 resume las principales ventajas de estos materiales y los beneficios asociados con su aplicación en procesos de remoción de contaminantes.

Tabla 3. *Principales ventajas de los nanomateriales magnéticos y sus beneficios en aplicaciones de tratamiento de agua.*

Ventaja	Descripción	Beneficios en tratamiento de agua
Alta área superficial	El tamaño nanométrico incrementa considerablemente la relación área superficial-volumen, favoreciendo la interacción con contaminantes.	Mayor capacidad de adsorción, menor tiempo de tratamiento y mejor eficiencia de remoción incluso a bajas concentraciones.
Recuperación magnética	Las ferritas pueden separarse fácilmente mediante campos magnéticos externos después del proceso de adsorción.	Reducción de costos operativos, menor generación de residuos secundarios y simplificación de procesos de separación.
Reutilización	Muchos nanomateriales magnéticos pueden regenerarse y utilizarse nuevamente después de procesos de adsorción.	Disminución de costos asociados con reemplazo de materiales y mayor viabilidad para aplicaciones sostenibles y comunitarias.
Interacción química con contaminantes	La presencia de grupos funcionales y sitios activos superficiales favorecen procesos de adsorción y quimisorción.	Mejor desempeño en remoción de metales pesados, colorantes y contaminantes orgánicos emergentes.
Aplicaciones sostenibles	La combinación con biomasa y residuos agroindustriales permite desarrollar materiales híbridos de bajo impacto ambiental.	Desarrollo de tecnologías más sostenibles, reutilizables y alineadas con principios de economía circular.

A pesar de retos relacionados con estabilidad estructural y pérdida gradual de eficiencia después de varios ciclos de uso, los nanomateriales magnéticos continúan posicionándose como una de las alternativas más prometedoras para el tratamiento sostenible de agua y remediación ambiental.

Caso de estudio: Ferritas espinela $CoCuFe_2O_4$ y $CuFe_2O_4$ para aplicaciones ambientales

Uno de los principales retos en el desarrollo de tecnologías para tratamiento de agua consiste en encontrar materiales capaces de remover contaminantes tóxicos de manera eficiente, económica y sostenible. En este contexto, las ferritas magnéticas han despertado gran interés debido a su capacidad de adsorción y a la posibilidad de ser recuperadas fácilmente mediante campos magnéticos externos.

En este caso de estudio, se sintetizaron nanopartículas de ferrita de cobre ($CuFe_2O_4$) y ferrita mixta cobre-cobalto ($CuCoFe_2O_4$) para elevar su potencial en la remoción de arsénico trivalente (As III) y pentavalente (As V) en solución acuosa.

La investigación tuvo como objetivo desarrollar materiales magnéticos capaces de interactuar con las especies de arsénico y favorecer su remoción del agua. Para ello, las ferritas fueron sintetizadas mediante el método de coprecipitación, una técnica ampliamente utilizada debido a su bajo costo, simplicidad y capacidad para obtener nanopartículas en escala nanométrica.

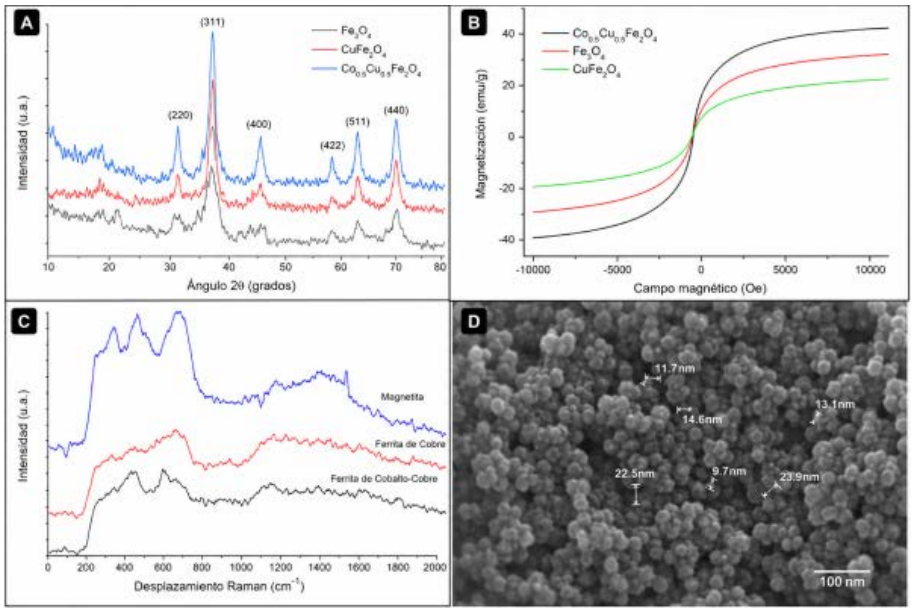
Después de la síntesis, los materiales fueron caracterizados mediante diferentes técnicas como difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y magnetometría. Los análisis confirmaron la formación de ferritas con propiedades magnéticas y tamaños de partícula menores a 20 nm. Particularmente, la ferrita $CuCoFe_2O_4$ presentó tamaños cercanos a 11.98 nm, mientras que $CuFe_2O_4$ mostró tamaños aproximados a 13.01 nm.

La Figura 4 resume los principales resultados de caracterización de las ferritas sintetizadas. Los patrones de difracción de rayos X (Fig. 4 A) confirman la formación de la estructura cristalina tipo espinela, mientras que los espectros Raman (Fig. 4 C) evidenciaron las vibraciones características asociadas a los enlaces metal-oxígeno presentes en la red cristalina. Por otra parte, las curvas de magnetización (Fig. 4 B) mostraron el comportamiento magnético de los materiales, propiedad fundamental para su posterior recuperación. Finalmente, las micrografías obtenidas por microscopia electrónica (Fig. 4 D) revelaron la formación de nano-

partículas aglomeradas con tamaño promedio de 20 nm, condición que favorece una elevada relación área superficie-volumen y, por ende, una mayor interacción con los contaminantes presentes en solución.

El tamaño nanométrico resulta fundamental en este tipo de materiales, ya que al disminuir el tamaño de partícula aumenta considerablemente el área superficial disponible para interactuar con contaminantes. Una forma sencilla de imaginarlo es pensar en un cubo de hielo: si el cubo se fragmenta en pequeños trozos, la superficie expuesta aumenta rápidamente. Algo similar ocurre con las nanopartículas; mientras más pequeñas son, mayor superficie tienen disponible para captar contaminantes.

Figura 4. *Caracterización fisicoquímica de las ferritas sintetizadas*



(a) patrones de difracción de rayos X (DRX), (b) curvas de magnetización obtenidas por VSM, (c) espectros Raman y (d) micrografía SEM representativa de las nanopartículas sintetizadas. Los resultados confirman la formación de ferritas tipo espinela con propiedades magnéticas y tamaños nanométricos adecuados para aplicaciones ambientales.

Las pruebas de adsorción mostraron que ambas ferritas presentaron capacidad para remover As (III) y As (V) del agua, observándose diferencias importantes entre los materiales sintetizados. En condiciones de

pH 7 y temperatura ambiente, la ferrita mixta $CuCoFe_2O_4$ mostró una mayor eficiencia de remoción respecto a $CuFe_2O_4$, particularmente en las soluciones con arsénico trivalente, especie considerada más tóxica y difícil de remover.

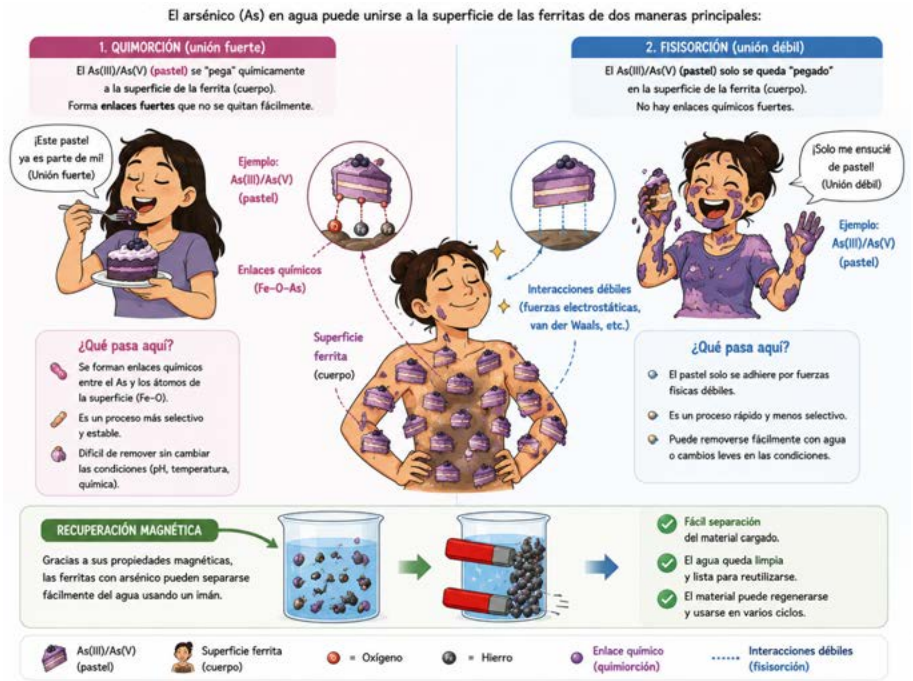
Los experimentos se realizaron utilizando concentraciones iniciales de arsénico entre 2 y 80 mg/L, con tiempos de contacto desde 1 hasta 480 minutos. Durante las primeras etapas del tratamiento se observó una rápida disminución de la concentración de arsénico, indicando una elevada afinidad inicial entre el contaminante y la superficie de las ferritas.

En las mejores condiciones experimentales, las ferritas lograron eficiencias de remoción superiores al 80 % para algunas concentraciones de As (III), mientras que para As (V) la eficiencia fue ligeramente menor debido posiblemente a la movilidad de esta especie en solución. La ferrita de $CoCuFe_2O_4$ presentó un comportamiento más eficiente comparado con $CuFe_2O_4$, atribuido principalmente 1) menor tamaño de partícula, 2) mayor área superficial y, 3) modificación en las propiedades magnéticas y superficiales derivadas de la incorporación de cobalto (Sarker y et. al., 2022).

Uno de los aspectos más interesantes observados durante la investigación fue el mecanismo de adsorción. De manera general, la captura de contaminantes puede ocurrir mediante fisisorción o quimisorción.

La fisisorción ocurre cuando el contaminante se adhiere superiormente al material mediante fuerzas débiles, similares a las fuerzas de atracción intermoleculares. Un ejemplo cotidiano sería imaginar que una persona se unta pastel sobre la ropa: el pastel queda adherido superficialmente y puede retirarse relativamente fácil, como se observa en la Figura 5.

Figura 5. *Representación esquemática de los mecanismos de adsorción de arsénico sobre ferritas magnéticas*



En la quimisorción, el arsénico forma enlaces químicos fuertes con la superficie del material, favoreciendo una unión más estable y selectiva. En la fisisorción, la interacción ocurre mediante fuerzas débiles, por lo que el contaminante puede desprenderse con mayor facilidad. La analogía del pastel permite visualizar la diferencia entre ambos procesos: "comer pastel" representa una unión fuerte (quimisorción), mientras que "solo embarrarse de pastel" representa una unión superficial (fisisorción).

En cambio, la quimisorción implica la formación de enlaces químicos más fuertes entre el contaminante y la superficie del material. Siguiendo con el mismo ejemplo, sería como ingerir el pastel: ahora el sistema interactúa internamente y el proceso es mucho más difícil de revertir. En adsorción, este tipo de interacción suele favorecer una unión más estable entre el contaminante y el adsorbente.

En el caso de las ferritas estudiadas, los resultados cinéticos mostraron un mejor ajuste al modelo Freundlich, asociado generalmente con superficies heterogéneas y procesos de adsorción multicapa. Esto resulta

relevante porque las superficies heterogéneas suelen ofrecer múltiples sitios activos capaces de interactuar con diferentes especies contaminantes.

Otro aspecto importante fue el comportamiento magnético de las ferritas. Las nanopartículas respondieron a campos magnéticos externos, permitiendo su separación rápida del agua tratada mediante el uso de imanes externos. Esta propiedad representa una ventaja importante frente a otros adsorbentes convencionales, ya que facilita la recuperación de material y reduce procesos complejos de filtración.

Desde el punto de vista ambiental, este tipo de materiales ofrece ventajas relevantes:

- Alta eficiencia de interacción contaminante-superficie,
- Recuperación magnética,
- Reducción de residuos secundarios,
- Potencial de reutilización,
- Aplicaciones en sistemas de tratamiento de agua a bojo costo.

Además, el desarrollo de ferritas magnéticas representa una alternativa interesante para regiones afectadas por contaminación de arsénico, particularmente comunidades rurales donde muchas veces el acceso a tecnologías avanzadas de tratamiento es limitado.

Aunque aún existen retos relacionados con escalamiento industrial, estabilidad a largo plazo y evaluación en sistemas reales complejos, las ferritas espinela continúan posicionándose como materiales prometedores para aplicaciones ambientales y tecnologías sostenibles de tratamiento de agua.

Economía circular y materiales híbridos

El concepto de economía circular ha cobrado gran relevancia en los últimos años como respuesta a los problemas ambientales derivados del modelo tradicional de consumo y generación de residuos. Mientras que el modelo lineal se basa en “extraer, producir, usar y desechar”, la economía circular busca mantener los materiales en uso durante el mayor tiempo posible mediante estrategias de reutilización, reciclaje y valorización de residuos (Morales-Amaya et al., 2025).

En el área ambiental, este enfoque ha impulsado el desarrollo de materiales sostenibles capaces de transformar residuos agroindustriales en productos de alto valor agregado para aplicaciones en tratamiento de agua. De esta manera, residuos que anteriormente eran considerados basura pueden convertirse en adsorbentes funcionales para remover contaminantes tóxicos.

Actualmente, la combinación entre nanotecnología y economía circular ha permitido desarrollar materiales híbridos con propiedades avanzadas para el tratamiento de agua, integrando biomasa residual y nanopartículas magnéticas. Estos materiales buscan no solo mejorar la eficiencia de remoción, sino también disminuir costos y reducir el impacto ambiental asociado con tecnologías convencionales.

Residuos agroindustriales como materia prima

Los residuos agroindustriales representan una fuente abundante y de bajo costo para la producción de materiales adsorbentes destinados al tratamiento de agua. Cada año se generan millones de toneladas de biomasa residual, incluyendo cáscaras, semillas, bagazos, fibras vegetales y residuos forestales que, en muchos casos, son desechados o incinerados, contribuyendo a la contaminación ambiental.

Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que estos materiales poseen estructuras ricas en carbono capaces de transformarse en adsorbentes altamente porosos mediante tratamientos térmicos y químicos. Entre los residuos más estudiados se encuentran la cáscara de nuez, la cáscara de arroz, bagazo de caña, residuos de maíz y diversas biomasas lignocelulósicas, las cuales han mostrado eficiencias de remoción superiores al 70-90 % para metales pesados, colorantes y otros contaminantes emergentes.

Una forma sencilla de comprender su funcionamiento es imaginar una “esponja microscópica”. Durante los procesos de activación se generan millones de poros capaces de atrapar contaminantes en el agua, incrementando significativamente la capacidad de adsorción. En algunos casos, los materiales obtenidos pueden alcanzar áreas superficiales superiores a 500 m^2/g, mientras que ciertos carbones activados comerciales superan

los 1000 m^2/g. En términos prácticos, esto significa que una pequeña cantidad de material puede contener una superficie interna equivalente a varias canchas microscópicas.

Particularmente, la cáscara de nuez ha despertado gran interés debido a su elevado contenido de carbono, resistencia mecánica y capacidad para generar estructuras altamente porosas. Diversos estudios han reportado resultados prometedores para la remoción de arsénico, plomo, cadmio y otros contaminantes cuando estos materiales son utilizados de forma individual o combinados con nanopartículas magnéticas (Hussain et al., 2021).

Además de sus propiedades adsorbentes, el aprovechamiento de residuos agroindustriales ofrece beneficios ambientales y económicos importantes, ya que permite valorizar materiales considerados desechos, reducir costos de producción y promover tecnologías alineadas con los principios de economía circular. En regiones agrícolas de México, donde existe una importante producción de nuez, este tipo de estrategias representa una oportunidad para valorizar residuos agroindustriales y generar tecnologías ambientales con impacto regional.

Materiales híbridos sostenibles

Los materiales híbridos sostenibles combinan dos o más componentes con propiedades complementarias para mejorar el desempeño en aplicaciones ambientales (Salama, 2017; Vrabič-Brodnjak, 2024). En tratamiento de agua, una de las estrategias más prometedoras consiste en integrar biomasa o carbón activado con nanopartículas magnéticas.

En estos sistemas, el carbón activado funciona como una plataforma altamente porosa capaz de adsorber contaminantes, mientras que las ferritas aportan propiedades magnéticas que facilitan la recuperación del material. Es decir, el material híbrido actúa simultáneamente como una "esponja microscópica" que captura contaminantes y un material magnético que puede recuperarse utilizando un imán.

Diversas investigaciones han mostrado que estos materiales híbridos pueden mejorar significativamente la eficiencia de remoción respecto a materiales individuales. Algunos estudios reportan remociones superiores

al 90 % para arsénico, colorantes y metales pesados utilizando compósitos magnéticos basados en biomasa y ferritas.

Además, la incorporación de nanopartículas magnéticas puede favorecer procesos de reutilización. En algunos casos, los adsorbentes híbridos han mantenido eficiencias elevadas después de varios ciclos de uso, reduciendo costos y generación de residuos.

Desde una perspectiva divulgativa, los materiales híbridos magnéticos pueden visualizarse como "nanopescadores" capaces de buscar, capturar y retirar contaminantes del agua mediante procesos de adsorción y recuperación magnética. La Figura 6 ilustra este concepto y resume las principales etapas involucradas en su funcionamiento.

Beneficios ambientales y económicos

El desarrollo de materiales híbridos sostenibles ofrece beneficios importantes tanto para el ambiente como para la economía.

Desde el punto de vista ambiental, estas tecnologías permiten:

- Aprovechar residuos agroindustriales
- Reducir acumulación de desechos
- Disminuir contaminación secundaria
- Reutilizar materiales
- Desarrollar procesos más sostenibles

En términos económicos, el empleo de residuos agroindustriales reduce considerablemente los costos de materia prima. Esto resulta particularmente importante en regiones rurales o comunidades con acceso limitado a tecnologías avanzadas de tratamiento de agua. Por ejemplo, producir adsorbentes a partir de biomasa residual puede representar costos significativamente menores comparados con materiales comerciales especializados. Asimismo, la capacidad de reutilización y recuperación magnética permite disminuir gastos operativos asociados con reemplazo y separación de materiales. Actualmente, los materiales híbridos sostenibles representan una de las áreas de mayor crecimiento dentro de la nanotecnología ambiental debido a su potencial para combinar alta eficiencia, bajo costo, reutilización y sostenibilidad ambiental. Por ello,

se consideran una alternativa prometedora para futuras tecnologías de purificación de agua y remediación ambiental, particularmente en regiones afectadas por contaminación hídrica y escasez de recursos.

Figura 6.



Los "nanopescadores" son una analogía para describir materiales híbridos capaces de buscar, capturar y retirar contaminantes del agua. Al igual que un pescador utiliza una red para atrapar peces, estas nanopartículas magnéticas capturan contaminantes sobre su superficie y posteriormente pueden recuperarse mediante magnetismo, facilitando la limpieza del agua y la reutilización del material.

Retos actuales y perspectivas futuras

La implementación de nanomateriales y materiales híbridos sostenibles en tecnologías de tratamiento de agua aún enfrenta diversos desafíos relacionados con aspectos técnicos, económicos, regulatorios y sociales. No obstante, los avances recientes sugieren importantes oportunidades para su escalamiento y aplicación en sistemas reales. La Tabla 3 resume algunos de los principales retos actuales y las perspectivas futuras asociadas con el desarrollo de estas tecnologías.

Tabla 3. *Retos y perspectivas futuras de los nanomateriales magnéticos y materiales híbridos para aplicaciones de tratamiento de agua.*

Área	Retos actuales	Perspectivas futuras
Escalamiento	Producción masiva de nanopartículas manteniendo tamaño, estabilidad y propiedad magnética homogéneas	Desarrollo de sistemas continuos y plantas piloto para tratamiento de grandes volúmenes de agua.
Costos	Uso de reactivos y equipos especializados que incrementan costos de producción	Empleo de biomasa y residuos agroindustriales para desarrollar adsorbentes más económicos y sostenibles
Regulación	Limitada regulación sobre nanopartículas y contaminantes emergentes	Fortalecimiento de normas ambientales y evaluación toxicológica de nanomateriales
Implementación en comunidades	Acceso limitado a infraestructura y tecnologías avanzadas en zonas rurales	Desarrollo de filtros y sistemas modulares de bajo costo adaptados a necesidades locales.
Reutilización	Pérdida gradual de eficiencia después de varios ciclos de adsorción	Diseño de materiales híbridos con mayor estabilidad y regeneración
Transferencia tecnológica	Dificultad para llevar desarrollos científicos desde laboratorio hacia aplicaciones reales	Vinculación entre universidades, industria y gobierno para generar prototipos y tecnologías comerciales
Contaminantes emergentes	Baja eficiencia de tratamientos convencionales frente a microplásticos y fármacos	Desarrollo de materiales híbridos multifuncionales capaces de remover distintos contaminantes simultáneamente

A pesar de los desafíos actuales, la nanotecnología y los materiales híbridos sostenibles continúan posicionándose como herramientas prometedoras para el desarrollo de tecnologías de purificación de agua más eficientes, accesibles y ambientalmente responsables.

Conclusiones

La contaminación del agua por metales pesados, microplásticos y contaminantes orgánicos emergentes representa uno de los principales desafíos ambientales y sanitarios de la actualidad. Sustancias como arsénico, plomo, mercurio, colorantes industriales y residuos farmacéuticos han sido detectadas en diferentes cuerpos de agua alrededor del mundo, incluyendo diversas regiones de México donde las concentraciones superan los límites permisibles establecidos para agua destinada al consumo humano.

Frente a esta problemática, la nanotecnología ha mostrado un gran potencial para el desarrollo de materiales avanzados orientados al tratamiento y remoción de contaminantes en sistemas acuáticos. Particularmente, los nanomateriales magnéticos tipo ferrita destacan por sus propiedades fisicoquímicas, elevada área superficial y facilidad de recuperación mediante campos magnéticos externos, características que favorecen su aplicación en procesos de adsorción y remediación ambiental.

El caso de estudio presente en este capítulo permitió ejemplificar el potencial de las ferritas espinas CoCuFe2O4 y CuFe2O4 para aplicaciones ambientales relacionadas con la remoción de arsénico en agua. Los resultados mostraron que estos materiales presentan comportamiento magnético, tamaños nanométricos y capacidad de interacción con especies contaminantes, evidenciando el interés creciente en el desarrollo de adsorbentes nanoestructurados para tratamiento de agua.

Asimismo, la integración de principios de economía circular mediante el aprovechamiento de residuos agroindustriales y biomasa representa una estrategia prometedora para disminuir costos y desarrollar tecnologías más sostenibles. Materiales híbridos basados en carbón activado y nanopartículas magnéticas permiten combinar alta eficiencia de adsorción con recuperación magnética y reutilización, contribuyendo al desarrollo de soluciones ambientalmente responsables. Aunque aún existen retos relacionados con escalamiento, regulación, costos e implementación en sistemas reales, los avances recientes sugieren que la combinación nanotecnología, materiales híbridos y economía circular continuará desempeñando un papel importante en futuras tecnologías de tratamiento de agua. Finalmente, el desarrollo de soluciones accesibles, sostenibles y

adaptadas a las necesidades locales será fundamental para enfrentar los problemas asociados con la contaminación hídrica y garantizar el acceso al agua segura en comunidades vulnerables.

Referencias

Aguilar-Aguilar, A., de León-Martínez, L. D., Forgionny, A., Acelas Soto, N. Y., Mendoza, S. R. & Zárate-Guzmán, A. I. (2023). A systematic review on the current situation of emerging pollutants in Mexico: A perspective on policies, regulation, detection, and elimination in water and wastewater. *Science of the Total Environment*, *905*, 167426. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167426

Alarcón-Herrera, M. T., Bundschuh, J., Nath, B., Nicolli, H. B., Gutierrez, M., Reyes-Gomez, V. M., Nuñez, D., Martín-Dominguez, I. R. & Sracek, O. (2013). Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, *262*, 96–106. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.005

Arcon, D. P. & Franco, F. C. (2021). A simple microextraction method for toxic industrial dyes using a fatty-acid solvent mixture. *Separations*, *8*(9), 135. https://doi.org/10.3390/separations8090135

Arias-Hoyos, A., Vela Rico, J. J. & Gómez Ortiz, C. S. (2023). Microplastics, environment, and human health: A global review. *Gestión y Ambiente*, *26*(2).

Bhateria, R. & Singh, R. (2019). A review on nanotechnological application of magnetic iron oxides for heavy metal removal. *Journal of Water Process Engineering*, *31*, 100845. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100845

Bracamontes-Ruelas, A. R., Ibarra-Rodríguez, D., Rodríguez-Campos, J., Velázquez-Fernández, J. B., Reyes-Vidal, Y. & Reynoso-Cuevas, L. (2025). Evaluation of the presence of emerging contaminants in a municipal wastewater treatment plant in Durango, Mexico. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *11*, 101218. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101218

Dulta, K., Shankdhar, D., Bhardwaj, V., Bhardwaj, N., Peter, L., Aman, J., Nagraik, R., Ravi, K. & Sharma, A. (2025). Microplastic: From marine pollution to the human food chain. *Food Bioscience*, *73*, 107613. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107613

El-Khouri Vidarte, N. (2016). A*daptación e implementación de un sistema autónomo de bajo coste de monitorización de calidad del agua en tiempo real* [Trabajo de fin de grado, Universidad no especificada en el documento original].

Hernández, J. H. C. (2021). Historical origin of water pollution and legal analysis of the Atoyac river. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *12*(1). https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-01-05

Huang, L., Wu, H. & Van Der Kuijp, T. J. (2015). The health effects of exposure to arsenic-contaminated drinking water: A review by global geographical distribution. *International Journal of Environmental Health Research*, *25*(4), 404–423. https://doi.org/10.1080/09603123.2014.958139

Hussain, M. M., Bibi, I., Niazi, N. K., Shahid, M., Iqbal, J., Shakoor, M. B., Ahmad, A., Shah, N. S., Bhattacharya, P., Mao, K., Bundschuh, J., Ok, Y. S. & Zhang, H. (2021). Arsenic biogeochemical cycling in paddy soil-rice system: Interaction with various factors, amendments and mineral nutrients. *Science of the Total Environment*, *773*, 145040. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145040

Kanchelashvili, G., Gulbiani, L., Dekanosidze, A., Kvachantiradze, L., Kamkamidze, G. & Sturua, L. (2022). Knowledge of Georgian population towards air pollution and health effects of lead contamination. *Georgian Medical News*, *322*(1), 112–118.

Litter, M. I., Morgada, M. E. & Bundschuh, J. (2010). Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption. *Environmental Pollution*, *158*(5), 1105–1118. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.01.028

Ma, M. D., Wu, H., Deng, Z. Y. & Zhao, X. (2018). Arsenic removal from water by nanometer iron oxide coated single-wall carbon nanotubes. *Journal of Molecular Liquids*, *259*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.052

McClintock, T. R., Chen, Y., Bundschuh, J., Oliver, J. T., Navoni, J., Olmos, V., Lepori, E. V., Ahsan, H. & Parvez, F. (2012). Arsenic

exposure in Latin America: Biomarkers, risk assessments and related health effects. *Science of the Total Environment*, *429*, 76–91. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.051

Morales-Amaya, C. G., Alarcón-Herrera, M. T., Astudillo-Sánchez, P. D., Lozano-Morales, S. A., Licea-Jiménez, L. & Reynoso-Cuevas, L. (2021). Ferrous magnetic nanoparticles for arsenic removal from groundwater. *Water*, *13*(18), 2511. https://doi.org/10.3390/w13182511

Morales-Amaya, C. G., Astudillo-Sánchez, P. D., Reynoso-Cuevas, L., Herrera-Mendoza, R. & Lozano-Morales, S. A. (2025). A short review of immobilized nanostructured systems for arsenic removal in water purification. *Environmental Research*, *285*, 122319. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122319

Priya, A. K., Muruganandam, M., Imran, M., Gill, R., Vasudeva Reddy, M. R., Shkir, M., Sayed, M. A., AlAbdulaal, T. H., Algarni, H., Arif, M., Jha, N. K. & Sehgal, S. S. (2023). A study on managing plastic waste to tackle the worldwide plastic contamination and environmental remediation. *Chemosphere*, *341*, 139979. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139979

Rasin, P., V, A. A., Basheer, S. M., Haribabu, J., Santibanez, J. F., Garrote, C. A., Arulraj, A. & Mangalaraja, R. V. (2025). Exposure to cadmium and its impacts on human health: A short review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *17*, 100608. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100608

Rice, K. M., Walker, E. M., Wu, M., Gillette, C. & Blough, E. R. (2014). Environmental mercury and its toxic effects. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, *47*(2), 74–85. https://doi.org/10.3961/jpmph.2014.47.2.74

Salama, A. (2017). New sustainable hybrid material as adsorbent for dye removal from aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, *487*, 408–416. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.10.034

Sarker, M. S. I., et al. (2022). Structural, morphological and magnetic properties of Sn doped CoFe2O4 nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *541*, 168542. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168542

Thanh, D. N., Novák, P., Vejpravova, J., Vu, H. N., Lederer, J. & Munshi, T. (2018). Removal of copper and nickel from water using nanocom-

posite of magnetic hydroxyapatite nanorods. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *456*, 149–157. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.064

Tombácz, E., Turcu, R., Socoliuc, V. & Vékás, L. (2015). Magnetic iron oxide nanoparticles: Recent trends in design and synthesis of magnetoresponsive nanosystems. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *468*(1–2), 404–410. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2015.08.030

Vallarasu, K., Sampathkumar, V., Manoj, S., Raja, K., Vijayalakshmi, V., Gopalakrishnan, K. M. & Navaneethan, K. S. (2023). Catalytical degradation of industrial dyes using biosynthesized nanoparticles: Review. *Journal of Environmental Nanotechnology*, *12*(4). https://doi.org/10.13074/jent.2023.12.234489

Vrabič-Brodnjak, U. (2024). Hybrid materials of bio-based aerogels for sustainable packaging solutions. *Gels*, *10*(1), 27. https://doi.org/10.3390/gels10010027

Capítulo 7

Polímeros inteligentes y nanomateriales para un agua más segura: Nuevas estrategias contra la contaminación por arsénico

Gualberto Iglesias González[1 2]
Aida Alejandra Guerrero de León[1]
Fernando Enrique Espínola Portilla[2]
José Benito Pelayo Vázquez[3]
Jenny Arratia Quijada[4]
María Guadalupe Pérez García[3]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008042

[1] Departemanto de Estudios del Agua y la Energía. Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara.
[2] Instituto Transdisciplinar de Investigación y Servicios – ITRANS. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad de Guadalajara
[3] Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingenierias, Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara.
[4] Departamento de Ciencias Biomédicas, Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara

Resumen

El agua dulce utilizada para consumo humano proviene principalmente de fuentes superficiales, como ríos, lagos y presas. Sin embargo, el crecimiento poblacional, la expansión urbana y la contaminación de estos cuerpos de agua han incrementado la dependencia de los acuíferos como fuente de abastecimiento. Esta situación ha puesto en evidencia diversos problemas relacionados con la calidad de las aguas subterráneas, entre ellos la presencia de arsénico, un contaminante tóxico que puede incorporarse al agua por procesos naturales o actividades humanas. La exposición prolongada al arsénico representa un riesgo importante para la salud pública, ya que se ha asociado con enfermedades cardiovasculares, trastornos neurológicos y diversos tipos de cáncer. Debido a que este elemento no altera significativamente el color, olor o sabor del agua, su detección requiere análisis especializados, lo que dificulta identificar el problema de manera oportuna. Ante este desafío, la ciencia de materiales ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías para la remoción eficiente de contaminantes. Entre ellas destacan los polímeros inteligentes y los nanomateriales, capaces de capturar selectivamente especies tóxicas mediante mecanismos de adsorción. En este capítulo se aborda la problemática de la contaminación por arsénico en aguas subterráneas y se presentan avances recientes del grupo de investigación en el uso de polímeros inteligentes y nanotecnología para el desarrollo de adsorbentes avanzados como alternativas prometedoras para obtener agua más segura y contribuir a la protección de los recursos hídricos.

Introducción

El agua dulce es un recurso indispensable para la vida, el desarrollo económico y el bienestar de las sociedades. Tradicionalmente, gran parte del agua utilizada para consumo humano, actividades agrícolas e indus-

triales ha provenido de fuentes superficiales como ríos, lagos y presas. Sin embargo, el crecimiento de la población, la expansión de las ciudades y el incremento de las actividades productivas han ejercido una presión cada vez mayor sobre estos cuerpos de agua. A ello se suma la contaminación generada por descargas urbanas, industriales y agrícolas, que ha reducido la disponibilidad de agua de buena calidad en muchas regiones. Como consecuencia, durante las últimas décadas se ha incrementado significativamente la extracción de agua subterránea, convirtiendo a los acuíferos en una fuente estratégica para garantizar el abastecimiento de millones de personas. En México, el sector público es el segundo mayor consumidor de agua, siendo los acuíferos su principal fuente de abastecimiento, con un 58 % del total consumido en 2017, lo que equivale a 7 378 hm^3 (SEMARNAT, 2018). Este incremento en la extracción de aguas subterráneas es notable; según la Conagua, entre 2001 y 2020 las concesiones para agua subterránea aumentaron un 42.4 %, mientras que las concesiones para agua superficial crecieron solo un 23.2 % en el mismo periodo (CONAGUA, 2022). Esto evidencia una creciente dependencia de las aguas subterráneas para satisfacer la demanda hídrica.

Aunque los acuíferos constituyen una alternativa fundamental para satisfacer la creciente demanda hídrica, su explotación intensiva también plantea importantes desafíos relacionados con su conservación y calidad. En muchas regiones, la extracción excesiva ha provocado problemas de sobreexplotación que comprometen la disponibilidad futura del recurso, mientras que el deterioro de la calidad del agua representa una amenaza adicional para la seguridad hídrica. Entre los contaminantes de mayor preocupación destaca el arsénico, un elemento tóxico que puede incorporarse de manera natural a las aguas subterráneas mediante procesos geológicos e hidrotermales asociados con determinadas formaciones rocosas y volcánicas. Sin embargo, esta problemática suele verse agravada por actividades humanas, como las descargas industriales, agrícolas y mineras, así como por las alteraciones hidrogeoquímicas derivadas de la explotación intensiva de los acuíferos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un límite máximo de 0.01 mg/L de arsénico en agua potable (Villaamil Lepori, 2024). En México, la NOM-201-SSA1-2015 adopta este estándar para

aguas de consumo humano, pero la NOM-127-SSA1-2021, que regula la calidad del agua potable, fija un límite general de 0.025 mg/L, salvo en poblaciones con más de 500 000 habitantes, donde se aplica el límite más estricto de 0.01 mg/L. Sin embargo, incluso en bajas concentraciones, la exposición continua al arsénico representa un riesgo significativo debido a su capacidad de bioacumularse en el organismo y su difícil eliminación (Patel et al., 2023).

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) señala que la exposición prolongada al arsénico puede provocar diversos efectos adversos para la salud, incluso cuando se encuentra en bajas concentraciones (Bhat et al., 2024). Una de las características más preocupantes de este contaminante es que es incoloro, inodoro e insípido, por lo que su presencia en el agua no puede detectarse mediante los sentidos y requiere análisis especializados para su identificación. El arsénico presente en el agua potable es absorbido a través del tracto gastrointestinal y posteriormente distribuido a diversos órganos y tejidos, incluyendo la piel, el hígado, los riñones y los pulmones. Debido a que su eliminación del organismo es limitada, la exposición continua favorece su acumulación gradual en el cuerpo. Con el tiempo, esta bioacumulación puede dar lugar a efectos tóxicos crónicos, como lesiones cutáneas, alteraciones neurológicas, neuropatías periféricas y un mayor riesgo de desarrollar cáncer en órganos como la piel, la vejiga y los pulmones (Patel et al., 2023).

Las concentraciones de arsénico en aguas subterráneas están relacionadas con la profundidad de extracción, alcanzando en algunas regiones niveles de 1-2 mg/L, significativamente por encima de los límites normativos. Estas concentraciones son especialmente elevadas en áreas con depósitos de sulfuros o formaciones geológicas asociadas a rocas volcánicas. En estos medios acuosos, el arsénico se encuentra principalmente en forma de especies inorgánicas, siendo las más relevantes el arseniato (As(V)) y el arsenito (As(III)), cuya distribución depende del pH y del potencial redox del sistema. Conocer la especie química predominante del arsénico es crucial para seleccionar el método de tratamiento adecuado (Nguyen, 2022).

La norma mexicana NOM-127-SSA1-2021 establece diversas estrategias para la remoción de arsénico en agua potable, entre las que

se incluyen la adsorción, coagulación-floculación y filtración, ósmosis inversa e intercambio iónico. La selección del método depende de diversos factores, como la concentración de arsénico, la calidad del agua cruda, el pH, la presencia de iones competidores y los costos operativos (Rahidul Hassan, 2023).

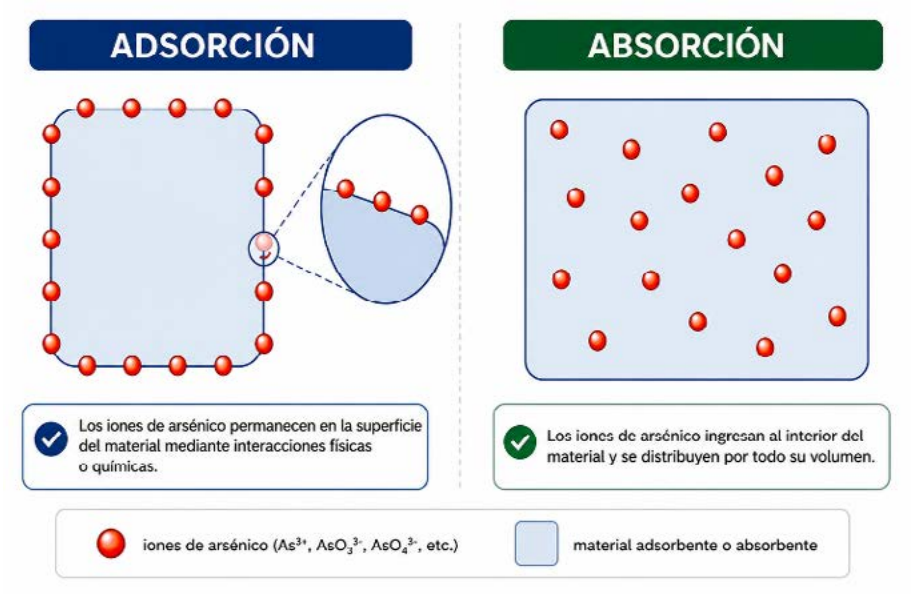
Debido a sus ventajas operativas y a su elevada eficiencia, la adsorción se ha consolidado como una de las estrategias más prometedoras para la remoción de arsénico en agua. Sin embargo, el desempeño de esta tecnología depende en gran medida de las propiedades de los materiales adsorbentes utilizados. Por ello, en los últimos años la comunidad científica ha enfocado importantes esfuerzos en el desarrollo de materiales capaces de capturar contaminantes de manera más selectiva, eficiente y sostenible (Fu et al., 2022). Entre las alternativas más innovadoras destacan los polímeros inteligentes y los nanomateriales, cuya estructura y composición pueden diseñarse para interactuar específicamente con determinadas sustancias presentes en el agua. Estos materiales combinan una elevada área superficial, una gran cantidad de sitios activos de adsorción y la capacidad de responder a estímulos externos, características que favorecen la captura de contaminantes incluso cuando se encuentran en concentraciones muy bajas (Abousalman-Rezvani et al., 2022; Jain, 2022).

En este contexto, el presente capítulo explora cómo los avances en polímeros inteligentes y nanotecnología pueden convertirse en herramientas clave para enfrentar la contaminación por arsénico y avanzar hacia un acceso más seguro y sostenible al agua potable. Asimismo, se presenta el potencial de una nueva generación de materiales adsorbentes basados en polímeros porosos magnéticos de poli(estireno-co-4-vinilpiridina) funcionalizados con nanopartículas de magnetita, desarrollados por nuestro grupo de investigación. Estos materiales combinan una estructura macroporosa altamente interconectada, grupos funcionales con afinidad por las especies de arsénico y propiedades magnéticas que facilitan su recuperación y reutilización, lo que los posiciona como una alternativa innovadora y prometedora para la remoción eficiente de arsénico en aguas contaminadas.

La adsorción como estrategia para remover arsénico del agua

El proceso de adsorción consiste en la acumulación de moléculas o iones sobre la superficie de un material sólido denominado adsorbente. A diferencia de la absorción, donde una sustancia penetra en el interior de un material, la adsorción ocurre únicamente en la superficie (Rahidul Hassan, 2023), como se observa en la Figura 1. Una forma sencilla de comprender este fenómeno es imaginar una esponja capaz de atrapar contaminantes disueltos en el agua. Sin embargo, a diferencia de una esponja convencional, los materiales adsorbentes poseen superficies diseñadas específicamente para retener determinadas sustancias mediante interacciones químicas y físicas.

Figura 1. *Representación esquemática de los procesos de adsorción y absorción de arsenico*



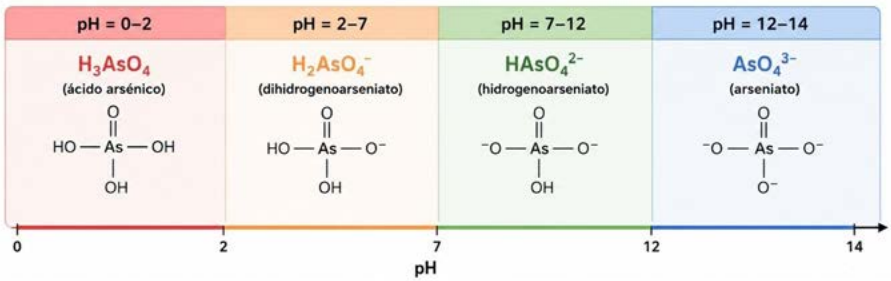
La efectividad de la adsorción para remover arsénico está estrechamente relacionada con la forma química en que este contaminante se encuen-

tra presente en el agua. El arsénico puede existir en diferentes especies químicas, siendo las más relevantes desde el punto de vista ambiental el arseniato [As(V)] y el arsenito [As(III)] (Ganie et al., 2024). La distribución entre ambas especies depende principalmente del pH y del potencial redox del medio acuoso. En ambientes oxidantes, ricos en oxígeno disuelto, predominan las especies de As(V), mientras que en condiciones reductoras es más frecuente encontrar As(III). Esta diferencia es de gran importancia debido a que ambas especies presentan propiedades fisicoquímicas distintas y, por lo tanto, comportamientos diferentes durante los procesos de tratamiento de agua (Samimi et al., 2023).

Como se muestra en la Figura 2, el As(V) puede presentarse en diversas formas químicas dependiendo del pH del medio (Li et al., 2010). En condiciones altamente ácidas (pH 0–2) predomina el ácido arsénico (H_3AsO_4), una especie neutra. A medida que aumenta el pH, esta molécula pierde protones de forma progresiva, dando lugar a especies aniónicas como el dihidrogenoarseniato ($H_2AsO_4^-$) en el intervalo de pH 2–7, el hidrogenoarseniato ($HAsO_4^{2-}$) entre pH 7–12 y, finalmente, el arseniato (AsO_4^{3-}) en medios fuertemente alcalinos (pH 12–14). En consecuencia, la carga negativa de las especies de As (V) aumenta conforme se incrementa el pH, modificando su interacción con las superficies adsorbentes.

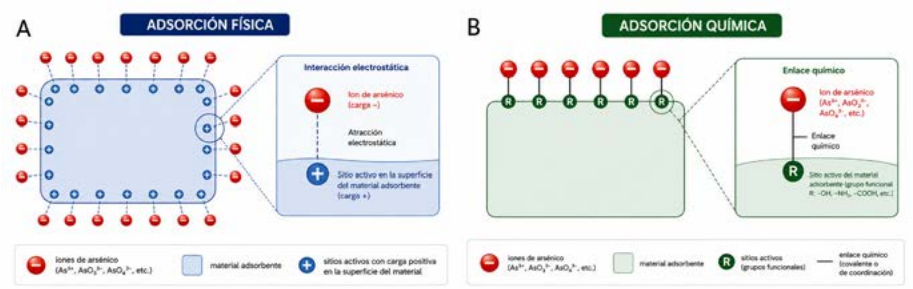
Por otro lado, el As(III) suele encontrarse predominantemente en forma de ácido arsenioso (H_3AsO_3), una especie neutra dentro del intervalo de pH característico de la mayoría de las aguas naturales. Debido a la ausencia de carga eléctrica, esta especie presenta una menor afinidad por los adsorbentes que dependen de interacciones electrostáticas, lo que dificulta su remoción. Además, el As(III) suele ser más móvil y tóxico que el As(V), razón por la cual muchos procesos de tratamiento incluyen una etapa previa de oxidación para transformar As(III) en As(V) antes de su eliminación (Ganie et al., 2024).

Figura 2. *Distribución de las principales especies químicas del arsénico pentavalente [As(V)] en función del pH del medio acuoso.*



La forma química del arsénico determina la manera en que interactúa con la superficie de los adsorbentes. Cuando las especies de arsénico presentes en el agua entran en contacto con un sólido, pueden producirse diferentes mecanismos de retención que favorecen su captura y posterior remoción. La Figura 3 muestra de manera esquemática los principales mecanismos de adsorción física y química involucrados en la retención de arsénico sobre superficies adsorbentes. Uno de los mecanismos más comunes corresponde a la adsorción física, la cual se basa en interacciones relativamente débiles, como las fuerzas electrostáticas. En este caso, las especies de arsénico son atraídas por superficies que presentan cargas opuestas, de manera similar a la atracción que ocurre entre los polos opuestos de un imán (Gallegos-Garcia et al., 2012). Por ejemplo, las especies aniónicas de arseniato, como $H_2AsO_4^-$ y $HAsO_4^{2-}$, pueden ser retenidas por materiales que contienen grupos funcionales con carga positiva en su superficie. Este tipo de interacción favorece la acumulación del contaminante sobre el adsorbente sin que se formen enlaces (Vashistha et al., 2026). En muchos materiales también tienen lugar mecanismos de adsorción química, en los cuales las especies de arsénico forman interacciones más fuertes y específicas con los sitios activos de la superficie. Estas interacciones pueden involucrar la formación de enlaces de coordinación, complejos superficiales o enlaces de hidrógeno entre el arsénico y grupos funcionales presentes en el adsorbente. Este tipo de adsorción suele proporcionar una mayor estabilidad en la retención del contaminante y, en consecuencia, una mayor eficiencia de remoción (DhanaRamalakshmi et al., 2020).

Figura 3. *Mecanismos de (A) adsorción física y (B) química involucrados en la remoción de arsénico.*



La naturaleza química de la superficie desempeña un papel fundamental en este proceso. Los materiales adsorbentes contienen grupos funcionales que actúan como sitios activos para la captura de contaminantes. Dependiendo de su composición, estos grupos pueden mostrar una mayor afinidad por determinadas especies químicas. Por ejemplo, grupos amino, hidroxilo, carboxilo, piridínicos y aquellos presentes en óxidos metálicos han demostrado una elevada capacidad para interactuar con especies de arsénico (Boruah et al., 2023). Cuanto mayor sea la cantidad de estos sitios activos disponibles, mayor será la probabilidad de retener el contaminante y, por lo tanto, mayor será la eficiencia del proceso de adsorción.

Polímeros inteligentes como adsorbentes en la remoción de arsénico

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión repetitiva de pequeñas unidades químicas denominadas monómeros. Estas largas cadenas moleculares pueden presentar estructuras y propiedades muy diversas, lo que ha permitido su utilización en una amplia variedad de aplicaciones que van desde envases y textiles hasta dispositivos biomédicos y materiales avanzados para la protección ambiental. Dependiendo de su composición química y arquitectura molecular, los polímeros pueden exhibir características como flexibilidad, resistencia mecánica, capacidad de absorción de agua o afinidad por determinadas sustancias

químicas. Gracias a esta versatilidad, los polímeros constituyen una de las familias de materiales más importantes y utilizadas en la actualidad (Masoom et al., 2024).

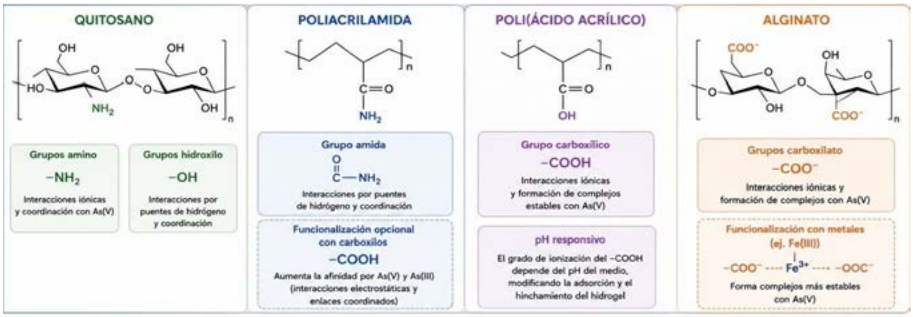
Una de las aplicaciones más importantes de los polímeros en el tratamiento de agua corresponde al desarrollo de hidrogeles, materiales tridimensionales capaces de absorber grandes cantidades de agua. Estos materiales combinan las ventajas de una elevada capacidad de hinchamiento con la presencia de grupos funcionales activos que pueden interactuar selectivamente con diferentes contaminantes. Además, su estructura tridimensional favorece el transporte de agua y maximiza el contacto entre las especies contaminantes y los sitios activos de adsorción, lo que ha impulsado su uso en procesos de remediación ambiental y purificación de agua (Darban et al., 2022).

Entre los hidrogeles más estudiados para la remoción de arsénico se encuentran aquellos basados en quitosano, poliacrilamida, poli(ácido acrílico) y alginato. En la Figura 4, se muestran los principales grupos funcionales presentes en hidrogeles inteligentes utilizados para la remoción de arsénico. Por ejemplo, el quitosano contiene grupos amino ($-NH_2$) e hidroxilo (-OH) que pueden protonarse en medios ácidos, favoreciendo la adsorción de especies aniónicas de As(V) mediante interacciones electrostáticas y mecanismos de complejación (Min et al., 2026). De manera similar, la poliacrilamida posee grupos amida ($-CONH_2$) que pueden ser funcionalizados con grupos carboxilo para incrementar su capacidad de interacción con As(V) y As(III) a través de enlaces coordinados e interacciones electrostáticas (ALSamman y Sánchez, 2023).

Por su parte, el poli(ácido acrílico) constituye uno de los ejemplos más representativos de hidrogel sensible al pH. La presencia de grupos carboxílicos (-COOH) permite que el material modifique su grado de hinchamiento y carga superficial dependiendo de las condiciones del medio, favoreciendo la formación de complejos estables con especies de As(V) y mejorando su capacidad de adsorción (ALSamman y Sánchez, 2023). De forma análoga, el alginato, un polisacárido natural rico en grupos carboxilato, ha demostrado una elevada eficiencia para la captura de arsénico, particularmente cuando se funcionaliza con iones metálicos como Fe(III), capaces de generar sitios activos adicionales

para la formación de complejos estables con las especies arsenicales (Safavi et al., 2025).

Figura 4. *Principales grupos funcionales presentes en hidrogeles inteligentes utilizados para la remoción de arsénico.*



A pesar de sus ventajas, los hidrogeles presentan algunas limitaciones que restringen su aplicación práctica a gran escala. Una de las más importantes es su baja resistencia mecánica cuando se encuentran altamente hinchados, condición que puede provocar deformación estructural, reducción de la estabilidad y pérdida de eficiencia en sistemas de tratamiento continuo (Choi y Lee, 2022). Este comportamiento se debe a que la absorción de grandes cantidades de agua aumenta la separación entre las cadenas poliméricas, disminuyendo la cohesión de la red tridimensional (Gitli y Silverstein, 2011). Para superar esta limitación, los hidrogeles suelen modificarse mediante procesos de entrecruzamiento químico que generan enlaces adicionales entre las cadenas poliméricas y fortalecen la estructura del material.

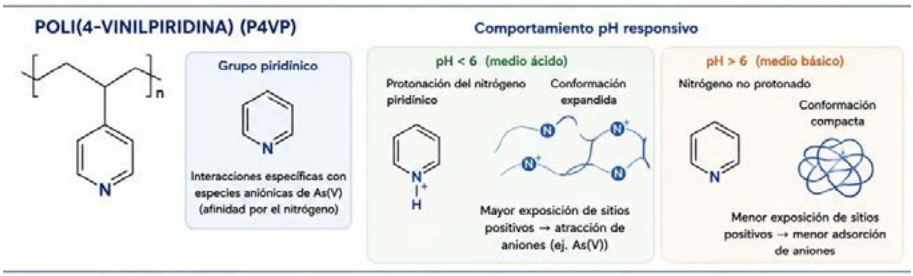
Sin embargo, el entrecruzamiento también puede afectar negativamente la capacidad de adsorción. En muchos casos, los agentes entrecruzantes reaccionan con los mismos grupos funcionales responsables de capturar los contaminantes, reduciendo el número de sitios activos disponibles. Por ejemplo, en hidrogeles de quitosano, el entrecruzamiento con glutaraldehído ocurre principalmente a través de los grupos amino ($-NH_2$), disminuyendo su disponibilidad para interactuar con las especies de As(V) presentes en solución (Darban et al., 2022). Este compromiso entre estabilidad mecánica y capacidad de adsorción constituye uno de

los principales desafíos en el diseño de hidrogeles para aplicaciones ambientales.

Debido a estas limitaciones, la investigación reciente ha explorado nuevas alternativas basadas en materiales poliméricos inteligentes que permitan conservar una elevada concentración de grupos funcionales activos, mejorar la estabilidad estructural y facilitar el transporte de agua hacia los sitios de adsorción. A diferencia de los polímeros convencionales, estos materiales son capaces de modificar algunas de sus propiedades físicas o químicas cuando son sometidos a estímulos externos como variaciones de pH, temperatura, luz, campos magnéticos o la presencia de determinadas moléculas. Esta capacidad de respuesta les permite realizar funciones específicas, como liberar sustancias de forma controlada, cambiar su estructura, reconocer compuestos de interés o capturar contaminantes selectivamente. En aplicaciones ambientales, los polímeros inteligentes han despertado un gran interés debido a que pueden incorporar grupos funcionales capaces de interactuar con especies tóxicas presentes en el agua, convirtiéndose en materiales prometedores para el desarrollo de tecnologías avanzadas de remoción de contaminantes, incluido el arsénico (Abousalman-Rezvani et al., 2022).

Dentro de estas alternativas, la poli(4-vinilpiridina) (P4VP) ha despertado un interés creciente como material adsorbente inteligente para la remoción de arsénico debido a las características únicas que aportan los grupos piridínicos presentes en su estructura. En la Figura 5 se muestra su estructura química y comportamiento pH-responsivo. A diferencia de los hidrogeles convencionales, cuya capacidad de adsorción depende principalmente de grupos amino, hidroxilo o carboxilo, la P4VP contiene átomos de nitrógeno localizados en anillos piridínicos que pueden interactuar de manera específica con diversas especies químicas presentes en solución. Esta característica le confiere una elevada afinidad por especies aniónicas de arsénico, particularmente As(V), favoreciendo mecanismos de adsorción más selectivos y eficientes (Liebenberg et al., 2021).

Figura 5. *Estructura química y comportamiento pH-responsivo de la poli(4-vinilpiridina) (P4VP).*

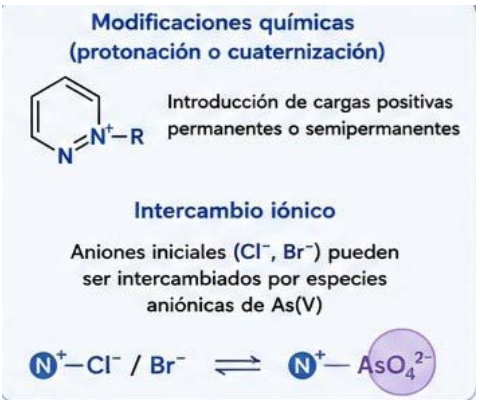


La P4VP presenta un comportamiento como polímero inteligente sensible al pH (Figura 5). Cuando el pH del medio es inferior a 6, los grupos piridínicos se protonan y adquieren carga positiva, provocando que las cadenas poliméricas se repelan entre sí y adopten una conformación expandida. Esta expansión favorece la exposición de un mayor número de sitios activos hacia el medio acuoso, facilitando la interacción con especies aniónicas presentes en solución. En estas condiciones, la superficie del material presenta una elevada densidad de cargas positivas capaces de atraer electrostáticamente diversos contaminantes, incluyendo especies de As(V), así como otros iones metálicos como Pb(II), Cr(III), Zn(II) y Cd(II) (Mohammadnezhad y Keikavousi Behbahan, 2020). Por el contrario, cuando el pH aumenta y los grupos piridínicos pierden su protonación, el polímero adopta una conformación más compacta e hidrofóbica, modificando su comportamiento frente a los procesos de adsorción.

La capacidad de respuesta de la P4VP puede incrementarse aún más mediante modificaciones químicas específicas. En la Figura 6 se muestran las estrategias más utilizadas, entre las que destacan la protonación y la cuaternización de los grupos piridínicos, procesos que introducen cargas positivas permanentes o semipermanentes en la estructura polimérica. Estas modificaciones transforman a la P4VP en un material con características similares a las de una resina de intercambio iónico, capaz de capturar especies aniónicas presentes en el agua (Sahiner y Ozay, 2011). Para ello, se han empleado diferentes agentes protonantes y alquilantes, entre los que se encuentran HCl, bromoetano, 1-bromobutano, 1-bromo-

hexano, 1-bromooctano y 2-bromoetilamina. Como resultado de estos tratamientos, los grupos piridínicos generan sitios catiónicos asociados inicialmente con aniones como Cl^- o Br^-, los cuales pueden intercambiarse posteriormente por especies aniónicas de arsénico presentes en solución.

Figura 6. *Estrategias de funcionalización de la poli(4-vinilpiridina) (P4VP).*



Este mecanismo de intercambio iónico constituye una de las principales ventajas de la P4VP para aplicaciones de tratamiento de agua. Cuando el agua contaminada entra en contacto con el material, los aniones de arseniato pueden reemplazar a los aniones inicialmente asociados a los grupos piridínicos protonados o cuaternizados, quedando retenidos en la estructura polimérica. Diversos estudios han demostrado que este proceso puede mantenerse eficiente incluso en presencia de otros aniones comúnmente encontrados en aguas subterráneas y superficiales, tales como sulfato, cloruro, nitrato y fosfato, los cuales suelen competir por los sitios de adsorción. Esta capacidad de operar bajo condiciones competitivas evidencia la elevada selectividad y afinidad de la P4VP por las especies de arsénico, convirtiéndola en una plataforma particularmente atractiva para el desarrollo de adsorbentes avanzados (Sahiner y Ozay, 2011).

Para lograr la remoción eficiente de especies aniónicas de As, es necesaria la protonación de los grupos piridínicos presentes en la P4VP, lo cual se facilita en condiciones ácidas, particularmente a pH menores a 6 (Behbahani et al., 2016). Sin embargo, en medios ácidos el grado de hinchamiento de la P4VP puede ser difícil de controlar, lo que afecta ne-

gativamente tanto la accesibilidad de los sitios activos de adsorción como la estabilidad estructural del material (Sahiner y Ozay, 2011). Además, la fragilidad mecánica de la P4VP en su forma hinchada limita su aplicación en procesos prolongados o en sistemas de tratamiento de agua que requieren materiales más robustos. Estas limitaciones resaltan la importancia de optimizar tanto las propiedades mecánicas como el control del hinchamiento de la P4VP para mejorar su rendimiento en la remoción de arsénico.

La copolimerización de 4VP y estireno (St) ofrece una solución efectiva para mejorar tanto las propiedades mecánicas como controlar el grado de hinchamiento para favorecer la capacidad de remoción de arsénico y la reutilización de los materiales adsorbentes. En el copolímero de poli(4VP-co-St), el poliestireno aporta rigidez y estabilidad mecánica a la red polimérica, lo que reduce la fragilidad inherente del P4VP y mejora la durabilidad del material en condiciones de flujo continuo (Yanovska et al., 2017). Por su parte, los grupos piridínicos de la P4VP, responsables de la adsorción de arsénico, mantienen su funcionalidad química, facilitando la interacción con especies de arsénico (Chen et al., 2017).

Nanomateriales como adsorbentes en la remoción de arsénico

El desarrollo de la nanotecnología ha abierto nuevas oportunidades para el diseño de materiales más eficientes en la remoción de contaminantes presentes en el agua. Los nanomateriales son estructuras cuyas dimensiones se encuentran en la escala de los nanómetros, es decir, entre una y cien mil millonésimas de metro. A esta escala, los materiales pueden exhibir propiedades físicas y químicas diferentes a las observadas en sus contrapartes de mayor tamaño, lo que ha despertado un gran interés en áreas como la medicina, la energía y la remediación ambiental.

Una de las principales ventajas de los nanomateriales para aplicaciones de tratamiento de agua es su elevada relación área superficial-volumen. A medida que el tamaño de las partículas disminuye, una mayor proporción de sus átomos queda expuesta en la superficie, aumentando significativamente el número de sitios disponibles para interactuar con los contaminantes. Como consecuencia, los nanomateriales suelen pre-

sentar capacidades de adsorción superiores a las de muchos materiales convencionales, permitiendo remover contaminantes incluso cuando se encuentran en concentraciones muy bajas (Baby et al., 2022).

Diversos tipos de nanomateriales han sido evaluados para la captura de arsénico, incluyendo nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono, óxidos metálicos, materiales mesoporosos y nanocompuestos poliméricos. Entre ellos, los materiales basados en óxidos metálicos han demostrado una especial relevancia debido a su elevada afinidad química por las especies de arsénico presentes en solución (Baby et al., 2022). En particular, los óxidos de hierro han sido ampliamente estudiados debido a su abundancia, bajo costo, baja toxicidad y excelente desempeño (Boruah et al., 2023).

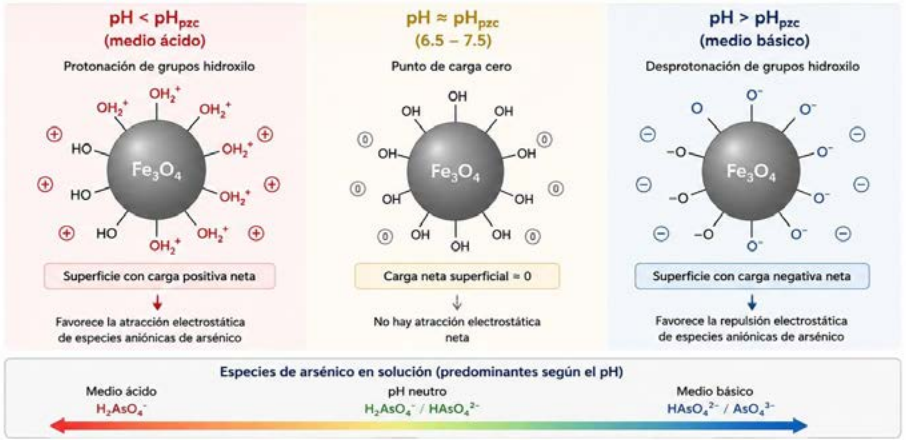
Dentro de esta familia de materiales, las nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) destacan como una de las alternativas más prometedoras para la remoción de arsénico. La magnetita es un óxido de hierro mixto que contiene hierro en estados de oxidación Fe(II) y Fe(III), lo que le confiere propiedades magnéticas únicas (Jain, 2022).

La elevada eficiencia de las nanopartículas de magnetita para la remoción de arsénico no solo está relacionada con su gran área superficial, sino también con las propiedades químicas de su superficie. Un aspecto particularmente importante es su punto de carga cero (pHpzc), el cual se encuentra generalmente en el intervalo de pH 6.5–7.5, dependiendo del método de síntesis y de las características específicas del material. El punto de carga cero corresponde al valor de pH en el cual la superficie de la magnetita presenta una carga neta igual a cero. Cuando el pH de la solución es inferior al pHpzc, los grupos hidroxilo superficiales (≡Fe–OH) tienden a protonarse, formando especies con carga positiva ($\equiv Fe–OH_2^+$). En contraste, cuando el pH es superior al pHpzc, estos grupos se desprotonan y generan sitios con carga negativa ($\equiv Fe–O^-$). Como consecuencia, la carga superficial de la magnetita puede modificarse en función de las condiciones del medio, influyendo directamente en sus interacciones con las especies de arsénico presentes en solución (Boruah et al., 2023), lo cual se muestra en la Figura 7.

Esta propiedad resulta especialmente relevante debido a que las especies de arseniato [As(V)] predominan como aniones en la mayoría de los sistemas acuosos naturales. A valores de pH inferiores al punto de

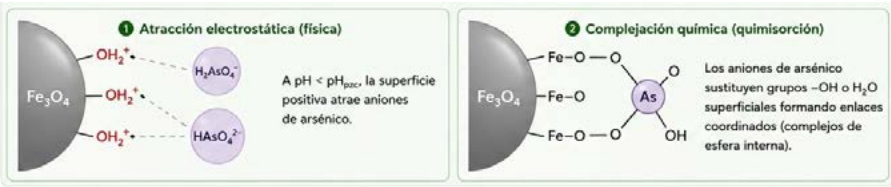
carga cero, la superficie protonada de la magnetita adquiere carga positiva, favoreciendo la atracción electrostática de especies como $H_2AsO_4^-$ y $HAsO_4^{2-}$. Este mecanismo de adsorción física facilita el acercamiento del arsénico hacia la superficie del material y contribuye a incrementar la eficiencia de captura (Boruah et al., 2023).

Figura 7. *Influencia del pH sobre la carga superficial de las nanopartículas de magnetita y su interacción con especies de arsénico*



Las interacciones electrostáticas por sí solas no explican completamente la elevada afinidad observada entre la magnetita y las especies de arsénico. Diversos estudios han demostrado que el mecanismo predominante de remoción corresponde a la adsorción química por complejación superficial, como se muestra en la Figura 8. Una vez que las especies de arsénico alcanzan la superficie del adsorbente, los grupos hidroxilo asociados a los átomos de hierro participan en reacciones de intercambio ligando, donde el arsénico reemplaza moléculas de agua o grupos hidroxilo previamente adsorbidos. Como resultado, se forman complejos estables entre las especies arsenicales y los centros metálicos presentes en la superficie de la magnetita. Estos complejos pueden clasificarse como complejos de esfera interna, caracterizados por la formación de enlaces químicos directos entre el arsénico y los átomos de hierro superficiales, lo que proporciona una retención mucho más fuerte que la obtenida mediante simples interacciones electrostáticas (Boruah et al., 2023).

Figura 8. *Mecanismo de adsorción física mediante atracción electrostática y química mediante complejación superficial de arsénico sobre nanopartículas de magnetita*



Por lo tanto, la adsorción de arsénico sobre nanopartículas de magnetita ocurre generalmente mediante la combinación de dos mecanismos complementarios. En una primera etapa, las interacciones electrostáticas favorecen el transporte y acercamiento de las especies arsenicales hacia la superficie del adsorbente, especialmente cuando esta presenta carga positiva. Posteriormente, tiene lugar la formación de complejos químicos estables entre el arsénico y los grupos hidroxilo superficiales asociados al hierro. Esta acción combinada de adsorción física y adsorción química explica la elevada capacidad de captura de la magnetita y constituye una de las principales razones por las que este nanomaterial se ha convertido en uno de los adsorbentes más estudiados para la remoción de arsénico en sistemas de tratamiento de agua.

Polímeros porosos magnéticos de poli(estireno-co-4-vinilpiridina) funcionalizados con nanopartículas de magnetita como una nueva generación de adsorbentes de arsénico

La incorporación de nanopartículas en matrices poliméricas porosas potencia significativamente su aplicación en sistemas de flujo continuo. Mientras que las nanopartículas dispersas pueden ser arrastradas por el flujo de agua o presentar dificultades de recuperación después del tratamiento, su anclaje a una estructura macroporosa permite mantenerlas confinadas dentro del adsorbente, minimizando las pérdidas de material y evitando problemas de percolación (Nikić et al., 2024). Como resultado, se facilita la operación en columnas de adsorción y otros sistemas

continuos, al tiempo que se simplifican los procesos de recuperación y reutilización del material. Esta combinación de elevada área superficial, porosidad interconectada y presencia de sitios activos mediante los grupos funcionales del polímero y de las nanopartículas constituye una estrategia altamente prometedora para el desarrollo de adsorbentes avanzados destinados a la remoción eficiente de contaminantes de agua.

Un ejemplo de esta estrategia es el trabajo desarrollado por nuestro grupo de investigación, enfocado en la síntesis de materiales adsorbentes basados en monolitos macroporosos magnéticos de poli(estireno-co-4-vinilpiridina) [P(St-co-4VP)] funcionalizados con nanopartículas de magnetita depositadas sobre su superficie porosa. Estos materiales combinan las ventajas de una estructura tridimensional altamente interconectada, característica de los polímeros porosos, con las propiedades adsorbentes de los grupos piridínicos de la P4VP y la elevada afinidad química de las nanopartículas de magnetita por las especies de arsénico. En la Figura 9 se muestra el método de síntesis empleado para obtenerlos.

Figura 9. *Esquema del método de síntesis de monolitos macroporosos magnéticos de poli(estireno-co-4-vinilpiridina) [P(St-co-4VP)] funcionalizados con nanopartículas de magnetita mediante polimerización de emulsiones Pickering de alta fase interna (Pickering HIPE).*

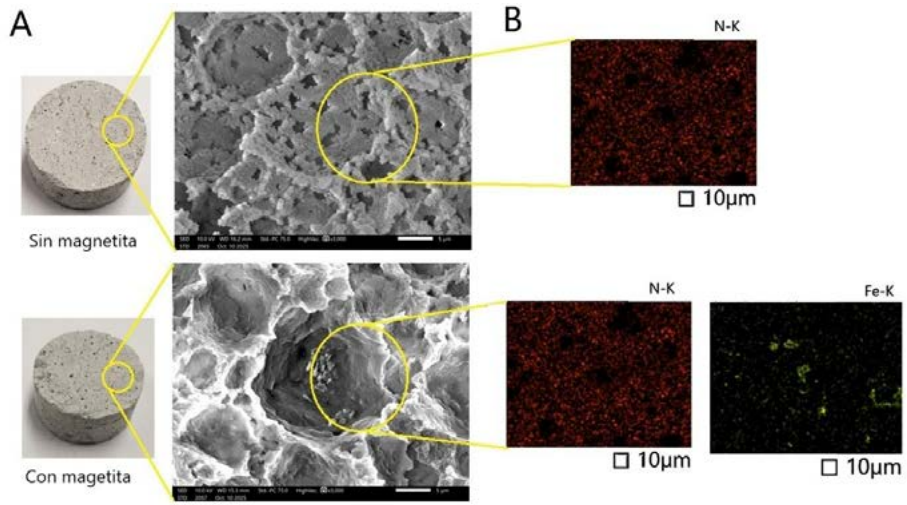


La preparación del material inicia con la formulación de una fase orgánica compuesta por estireno, 4-vinilpiridina, divinilbenceno como agente entrecruzante y un iniciador de polimerización. Posteriormente, esta fase se mezcla con nanopartículas de magnetita y se utiliza para estabilizar una emulsión Pickering de alta fase interna (Pickering HIPE), obtenida mediante la incorporación gradual de una fase acuosa bajo agitación controlada. Durante este proceso, las nanopartículas de magnetita migran hacia la interfaz entre la fase acuosa y la fase orgánica, donde se adsorben y estabilizan las gotas dispersas de la emulsión. A diferencia de los surfactantes convencionales, las nanopartículas permanecen firmemente ancladas en la interfaz, lo que proporciona una elevada estabilidad al sistema y determina la distribución final de las partículas dentro del material.

Una vez formada la emulsión, se induce la polimerización de la fase continua mediante calentamiento. Durante esta etapa, los monómeros de estireno y 4-vinilpiridina reaccionan formando una red tridimensional reticulada alrededor de las gotas de la fase acuosa. Debido a que las nanopartículas de magnetita se encuentran localizadas en la interfaz de las gotas, estas quedan incorporadas sobre las paredes de los poros que se generan durante la polimerización. Posteriormente, la fase acuosa es eliminada mediante procesos de lavado y extracción, dejando como resultado una estructura sólida altamente porosa con cavidades macroscópicas interconectadas.

La Figura 10A presenta imágenes de los monolitos macroporosos sintetizados con y sin nanopartículas de magnetita. Además, se incluyen micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido, las cuales permiten apreciar la estructura tridimensional altamente porosa del material, formada por una red de cavidades y canales interconectados. Estas imágenes también evidencian la presencia de nanopartículas de magnetita distribuidas sobre la superficie de los poros, una característica clave que favorece la interacción con las especies de arsénico y contribuye a mejorar el desempeño adsorbente del material.

Figura 10. *Caracterización morfológica y química de los monolitos macroporosos magnéticos de poli(estireno-co-4-vinilpiridina).*



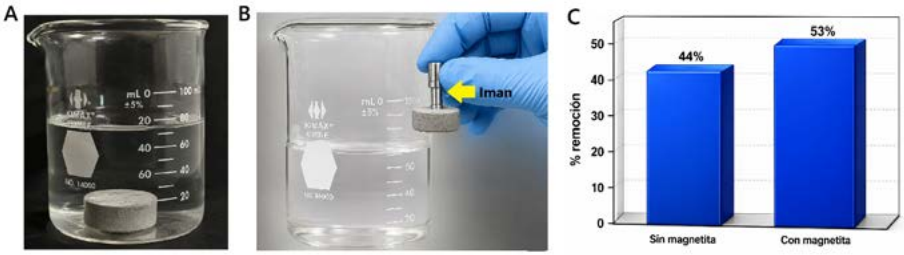
(A) Fotografías de los monolitos sintetizados en ausencia y presencia de nanopartículas de magnetita, junto con micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). (B) Mapas elementales obtenidos mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) acoplada a SEM.

La Figura 10B muestra un mapeo elemental obtenido mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés) acoplada a microscopía electrónica de barrido. Esta técnica permite identificar y visualizar la distribución espacial de los elementos químicos presentes en un material mediante la detección de los rayos X característicos emitidos por los átomos cuando son excitados por un haz de electrones. De esta manera, es posible determinar no solo qué elementos están presentes, sino también cómo se distribuyen sobre la superficie analizada. Los mapas elementales obtenidos revelan una distribución homogénea del hierro (Fe) sobre toda la superficie del material, confirmando la incorporación y dispersión de las nanopartículas de magnetita en las paredes de la estructura porosa. Asimismo, se observa la distribución del nitrógeno (N), proveniente de los grupos piridínicos de la 4-vinilpiridina, evidenciando la presencia de sitios funcionales accesibles a lo largo de la superficie porosa del monolito.

Con el fin de evaluar su desempeño como adsorbente, los monolitos fueron utilizados en la remoción de As(V) a pH 6, como se muestra en la Figura 11. Este valor de pH fue seleccionado debido a que se encuentra dentro del intervalo característico de muchas aguas naturales y porque favorece simultáneamente los mecanismos de adsorción proporcionados por el polímero y las nanopartículas de magnetita. A este pH, los grupos piridínicos de la P4VP se encuentran parcialmente protonados, generando cargas positivas capaces de atraer electrostáticamente las especies aniónicas de arseniato predominantes en solución. Asimismo, el pH se encuentra por debajo o cercano al punto de carga cero de la magnetita, lo que favorece la protonación de los grupos hidroxilo superficiales y potencia las interacciones electrostáticas con las especies de As(V). Además, en estas condiciones predominan especies como $H_2AsO_4^-$, las cuales presentan una elevada afinidad por los sitios activos presentes en el material.

Los experimentos se realizaron en condiciones batch, sumergiendo los monolitos en vasos de precipitados que contenían 100 mL de una solución acuosa de As(V) con una concentración inicial de 20 ppm. Como se muestra en la Figura 11, se obtuvieron porcentajes de remoción de aproximadamente 44 % y 52 % para los monolitos sin y con nanopartículas de magnetita, respectivamente, evidenciando el efecto positivo de la incorporación de las nanopartículas sobre la capacidad de adsorción del material. Estos resultados fueron competitivos con adsorbentes similares reportados en la literatura (Chowdhury y Yanful, 2011; Sahiner et al., 2011).

Figura 11.



(A) Experimento de adsorción realizado en condiciones batch, utilizando monolitos sumergidos en 100 mL de una solución acuosa de As(V) con una concentración inicial de 20 ppm a pH 6. (B) Recuperación del monolito magnético mediante la aplicación de un campo magnético externo. (C) Porcentaje de remoción de As(V) obtenido mediante ICP-MS.

La concentración residual de arsénico en solución se determinó mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, por sus siglas en inglés). Esta técnica analítica se basa en la introducción de la muestra en un plasma de argón a alta temperatura, donde los átomos e iones presentes son excitados y emiten radiación electromagnética a longitudes de onda características de cada elemento. La intensidad de la emisión generada es proporcional a la concentración del elemento analizado, lo que permite realizar determinaciones cuantitativas con alta sensibilidad y precisión. Gracias a estas características, el ICP-MS es una de las técnicas más utilizadas para la cuantificación de elementos traza en muestras ambientales y de agua (Bhat et al., 2022).

Además de mejorar la eficiencia de remoción, la incorporación de nanopartículas de magnetita confiere propiedades magnéticas al material, permitiendo su manipulación mediante la aplicación de un campo magnético externo (Figura 11B). Esta característica facilita el manejo, recuperación y reutilización del adsorbente después del tratamiento. Asimismo, la combinación de una estructura macroporosa altamente interconectada, estabilidad mecánica y propiedades magnéticas hace posible extender esta tecnología hacia sistemas de flujo continuo, como columnas de adsorción, donde el agua contaminada puede circular a través del material de manera eficiente. Estas características convierten a los monolitos magnéticos de poli(estireno-co-4-vinilpiridina) funciona-

lizados con magnetita en una alternativa prometedora para el desarrollo de tecnologías sostenibles destinadas a la remoción de arsénico en agua.

Sin embargo, para avanzar hacia una aplicación práctica a mayor escala, es necesario evaluar el desempeño de estos materiales en sistemas de flujo continuo, donde las condiciones de operación difieren significativamente de las empleadas en experimentos batch. Estudios futuros deberán considerar el efecto de variables como el pH de la solución, la cantidad y distribución de nanopartículas de magnetita incorporadas al material, así como las características de la estructura porosa, incluyendo el tamaño de poro, la interconectividad y el área superficial disponible. La optimización de estos parámetros podría incrementar la accesibilidad de los sitios activos, mejorar el transporte de masa dentro del adsorbente y favorecer la interacción entre las especies de arsénico y el material. En consecuencia, estas modificaciones tienen el potencial de aumentar significativamente la capacidad y eficiencia de remoción de arsénico, contribuyendo al desarrollo de sistemas de tratamiento más efectivos para aplicaciones reales de purificación de agua.

Conclusiones

La contaminación por arsénico en aguas subterráneas representa uno de los mayores desafíos para la seguridad hídrica y la salud pública a nivel mundial. Debido a su elevada toxicidad, capacidad de bioacumulación y difícil detección por medios convencionales, la presencia de este contaminante exige el desarrollo de tecnologías cada vez más eficientes para su remoción. En este contexto, la adsorción se ha consolidado como una de las estrategias más prometedoras, especialmente cuando se emplean materiales avanzados diseñados para interactuar selectivamente con las especies arsenicales. Los polímeros inteligentes ofrecen ventajas importantes gracias a su capacidad de responder a estímulos externos y a la presencia de grupos funcionales capaces de capturar contaminantes, mientras que las nanopartículas de magnetita aportan una elevada afinidad química por el arsénico y propiedades magnéticas que facilitan su recuperación. La combinación de ambos componentes en matrices poliméricas porosas permite potenciar sus ventajas individuales, incrementando el área

superficial, mejorando la accesibilidad a los sitios activos y favoreciendo el transporte de agua a través de estructuras altamente interconectadas.

Como ejemplo de esta estrategia, en este capítulo se presentaron los monolitos macroporosos magnéticos de poli(estireno-co-4-vinilpiridina) funcionalizados con nanopartículas de magnetita desarrollados por nuestro grupo de investigación. Estos materiales integran grupos piridínicos capaces de interactuar con especies de arsénico, nanopartículas de magnetita distribuidas sobre la superficie porosa y una arquitectura tridimensional que favorece la adsorción y el flujo de agua a través del material. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de esta aproximación para el desarrollo de adsorbentes avanzados destinados al tratamiento de agua. Sin embargo, aún existen retos importantes para su implementación a escala real, entre ellos la optimización de las condiciones de operación, la evaluación de su desempeño en sistemas de flujo continuo, el estudio de la influencia del pH y de los iones competidores presentes en aguas naturales, así como la optimización de la cantidad de magnetita y de la estructura porosa. Superar estos desafíos permitirá avanzar hacia tecnologías más eficientes, sostenibles y escalables, capaces de contribuir de manera significativa a la obtención de agua más segura y a la protección de los recursos hídricos frente a la contaminación por arsénico.

Referencias.

Abousalman-Rezvani, Z., Roghani-Mamaqani, H., Riazi, H. & Abousalman-Rezvani, O. (2022). Water treatment using stimuli-responsive polymers. *Polymer Chemistry*, *13*(42), 5940–5964. https://doi.org/10.1039/d2py00992g

ALSamman, M. T. & Sánchez, J. (2023). Adsorption of copper and arsenic from water using a semi-interpenetrating polymer network based on alginate and chitosan. *Polymers*, *15*(9), 2192. https://doi.org/10.3390/polym15092192

Baby, R., Hussein, M. Z., Abdullah, A. H. & Zainal, Z. (2022). Nanomaterials for the treatment of heavy metal contaminated water. *Polymers*, *14*(3), 583. https://doi.org/10.3390/polym14030583

Behbahani, M., Bide, Y., Bagheri, S., Salarian, M., Omidi, F. & Nabid, M. R. (2016). A pH responsive nanogel composed of magnetite, silica and poly(4-vinylpyridine) for extraction of Cd(II), Cu(II), Ni(II) and Pb(II). *Microchimica Acta*, *183*(1), 111–121. https://doi.org/10.1007/s00604-015-1603-8

Bhat, A., Hara, T. O., Tian, F. & Singh, B. (2022). Review of analytical techniques for arsenic detection and determination in drinking water. Environmental Science: *Advances*, *2*(2), 171–195. https://doi.org/10.1039/d2va00218c

Bhat, A., Ravi, K., Tian, F. & Singh, B. (2024). Arsenic contamination needs serious attention: An opinion and global scenario. *Pollutants*, *4*(2), 196–211. https://doi.org/10.3390/pollutants4020013

Boruah, H., Tyagi, N., Gupta, S. K., Chabukdhara, M. & Malik, T. (2023). Understanding the adsorption of iron oxide nanomaterials in magnetite and bimetallic form for the removal of arsenic from water. *Frontiers in Environmental Science*, *11*, 1104320. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1104320

Chen, Y., Zhao, W. & Zhang, J. (2017). Preparation of 4-vinylpyridine (4VP) resin and its adsorption performance for heavy metal ions. *RSC Advances*, *7*(8), 4226–4236. https://doi.org/10.1039/c6ra26813g

Choi, W. S. & Lee, H. J. (2022). Nanostructured materials for water purification: Adsorption of heavy metal ions and organic dyes. *Polymers*, *14*(11), 2183. https://doi.org/10.3390/polym14112183

Chowdhury, S. R. & Yanful, E. K. (2011). Arsenic removal from aqueous solutions by adsorption on magnetite nanoparticles. *Water and Environment Journal*, *25*(3), 429–437. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00242.x

Comisión Nacional del Agua. (2022). *Estadísticas del agua en México 2021*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Darban, Z., Shahabuddin, S., Gaur, R., Ahmad, I. & Sridewi, N. (2022). Hydrogel-based adsorbent material for the effective removal of heavy metals from wastewater: A comprehensive review. *Gels*, *8*(5), 263. https://doi.org/10.3390/gels8050263

DhanaRamalakshmi, R., Murugan, M. & Jeyabal, V. (2020). Arsenic removal using Prosopis spicigera L. wood (PsLw) carbon–iron oxide

composite. *Applied Water Science*, *10*(9), 212. https://doi.org/10.1007/s13201-020-01298-w

Fu, X., Song, X., Zheng, Q., Liu, C., Li, K., Luo, Q., Chen, J., Wang, Z. & Luo, J. (2022). Frontier materials for adsorption of antimony and arsenic in aqueous environments: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(17), 10824. https://doi.org/10.3390/ijerph191710824

Gallegos-Garcia, M., Ramírez-Muñiz, K. & Song, S. (2012). Arsenic removal from water by adsorption using iron oxide minerals as adsorbents: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, *33*(5), 301–315. https://doi.org/10.1080/08827508.2011.584219

Ganie, S. Y., Javaid, D., Hajam, Y. A. & Reshi, M. S. (2024). Arsenic toxicity: Sources, pathophysiology and mechanism. *Toxicology Research*, *13*(1), tfad111. https://doi.org/10.1093/toxres/tfad111

Gitli, T. & Silverstein, M. S. (2011). Emulsion templated bicontinuous hydrophobic-hydrophilic polymers: Loading and release. *Polymer*, *52*(1), 107–115. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.11.006

Jain, R. (2022). Recent advances of magnetite nanomaterials to remove arsenic from water. *RSC Advances*, *12*(50), 32197–32209. https://doi.org/10.1039/d2ra05832d

Li, Y., Wang, J., Luan, Z. & Liang, Z. (2010). Arsenic removal from aqueous solution using ferrous based red mud sludge. *Journal of Hazardous Materials*, *177*(1–3), 131–137. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.006

Liebenberg, K. E., Ambushe, A. A. & Zinyemba, O. (2021). Adsorption of selected heavy and precious metals from simulated wastewater using fabricated polyacrylonitrile (PAN) and poly(4-vinylpyridine) (P4VP) monoliths. *Minerals*, *11*(8), 884. https://doi.org/10.3390/min11080884

Masoom, W., Khan, A., Sarwar, A., Musaddiq, S., Farooqi, Z. H. & Iqbal, S. (2024). Removal of arsenic (III) and (V) from water bodies by using biopolymers via adsorption: A review. *Express Polymer Letters*, *18*(3), 260–281. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2024.19

Min, L., Wang, S., Li, Y., Lin, Y. & Chi, Y. (2026). Chitosan-based adsorbents: A versatile platform for the removal of arsenate and copper

ions from water. *Nanomaterials*, *16*(8), 458. https://doi.org/10.3390/nano16080458

Mohammadnezhad, G. & Keikavousi Behbahan, A. (2020). Polymer matrix nanocomposites for heavy metal adsorption: A review. *Journal of the Iranian Chemical Society*, *17*(6), 1259–1281. https://doi.org/10.1007/s13738-020-01864-8

Nguyen, T. H. (2022). *Arsenic removal from water by novel iron-based adsorbents* [Tesis o informe técnico no publicado].

Nikić, J., Watson, M., Jokić Govedarica, J., Vujić, M., Pešić, J., Rončević, S. & Agbaba, J. (2024). Adsorption performance of Fe–Mn polymer nanocomposites for arsenic removal: Insights from kinetic and isotherm models. *Materials*, *17*(20), 5089. https://doi.org/10.3390/ma17205089

Patel, K. S., Pandey, P. K., Martín-Ramos, P., Corns, W. T., Varol, S., Bhattacharya, P. & Zhu, Y. (2023). A review on arsenic in the environment: Bio-accumulation, remediation, and disposal. *RSC Advances*, *13*(22), 14914–14929. https://doi.org/10.1039/d3ra02018e

Rahidul Hassan, H. (2023). A review on different arsenic removal techniques used for decontamination of drinking water. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, *35*(1), 2165964. https://doi.org/10.1080/26395940.2023.2165964

Safavi, S., Raouf, F. & Naghavi, A. (2025). Fe-Mn-alginate: A highly effective adsorbent for arsenic removal. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, *37*(1), 2556181. https://doi.org/10.1080/26395940.2025.2556181

Sahiner, N. & Ozay, O. (2011). Responsive tunable colloidal soft materials based on p(4-VP) for potential biomedical and environmental applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *378*(1–3), 50–59. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.01.053

Sahiner, N., Ozay, O., Aktas, N., Blake, D. A. & John, V. T. (2011). Arsenic (V) removal with modifiable bulk and nano p(4-vinylpyridine)-based hydrogels: The effect of hydrogel sizes and quarternization agents. *Desalination*, *279*(1–3), 344–352. https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.06.028

Samimi, M., Zakeri, M., Alobaid, F. & Aghel, B. (2023). A brief review of recent results in arsenic adsorption process from aquatic environments by metal-organic frameworks: Classification based on kinetics, isotherms and thermodynamics behaviors. *Nanomaterials*, *13*(1), 60. https://doi.org/10.3390/nano13010060

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales, edición 2018*. SEMARNAT. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap6_Agua.pdf

Vashistha, S., Bhatt, E. & Gauba, P. (2026). Green synthesis of tea tree oil-mediated iron oxide nanoparticles for efficient arsenate [As(V)] removal: Synthesis, characterization and adsorption mechanism. *BIO Web of Conferences*, *233*, 03001. https://doi.org/10.1051/bioconf/202623303001

Villaamil Lepori, E. C. (2024). El arsénico en los alimentos. ¿Debemos preocuparnos? *Actualización en Nutrición*, *25*(1). https://doi.org/10.48061/san.2024.25.1.24

Yanovska, E. S., Vretik, L. O., Nikolaeva, O. A., Polonska, Y., Sternik, D. & Kichkiruk, O. Y. (2017). Synthesis and adsorption properties of 4-vinylpyridine and styrene copolymer in situ immobilized on silica surface. *Nanoscale Research Letters*, *12*(1), 196. https://doi.org/10.1186/s11671-017-1991-2

Capítulo 8

Transformando la luz solar en agua limpia y energía: El potencial de los evaporadores solares interfaciales

Rolando Alonso Guerra Santopietro[1]
Víctor Hugo Romero Arellano[2]
María Guadalupe Pérez García[2]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008059

[1] Departamento de Estudios del Agua y la Energía. Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara
[2] Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingenierias. Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara.

Resumen

La evaporación es un fenómeno cotidiano en el que el agua pasa del estado líquido al gaseoso mediante un intercambio simultáneo de energía y masa. A partir de este principio se han desarrollado los evaporadores solares interfaciales, sistemas que aprovechan la radiación solar para calentar principalmente la superficie donde el agua entra en contacto con el aire, evitando calentar todo el volumen del líquido. Su funcionamiento depende de tres aspectos fundamentales: captar la luz y transformarla en calor, transportar agua de manera continua hacia la zona de evaporación y reducir las pérdidas térmicas mientras se facilita la salida del vapor. Para cumplir estas funciones, se han desarrollado diversas estrategias que combinan materiales fototérmicos a escala nanométrica, estructuras porosas y diseños innovadores tanto bidimensionales como tridimensionales. Entre ellas, destacan los polyHIPEs, materiales similares a esponjas ultraligeras que poseen una red de poros altamente interconectados, cuya estructura puede modificarse para favorecer el transporte continuo de agua y la liberación de vapor generado. Además, su superficie porosa puede recubrirse o funcionalizarse con nanomateriales fototérmicos que captan la energía solar y la transforman en calor de manera eficiente. Gracias a esta combinación de propiedades, los polyHIPEs representan una alternativa innovadora para desarrollar evaporadores solares interfaciales más eficientes y sostenibles. Una de las principales aplicaciones de estos sistemas de evaporación es el tratamiento y la recuperación de agua mediante un proceso semejante a la destilación, en el que el vapor se condensa para obtener nuevamente agua líquida. Por otro lado, pueden también integrarse con dispositivos termoeléctricos para aprovechar las diferencias de temperatura y producir pequeñas cantidades de electricidad. Aunque esta tecnología presenta oportunidades importantes, todavía deben atenderse retos relacionados con la acumulación de sales, la durabilidad, la condensación del vapor, el costo y su funcionamiento bajo condiciones ambientales reales.

Introducción

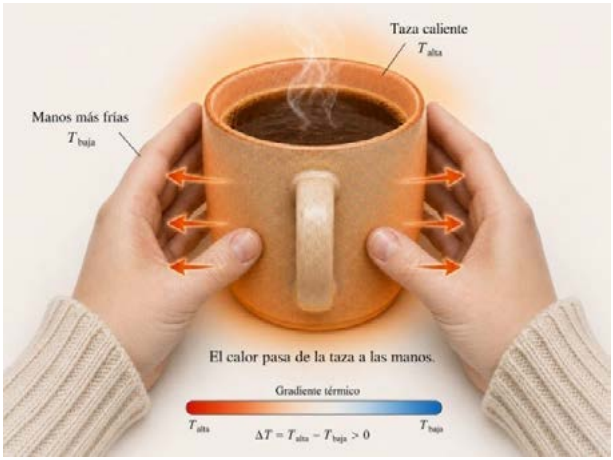
Muchos de nosotros conocemos o, al menos, hemos escuchado hablar del fenómeno físico de la evaporación. Sin embargo, ¿entendemos realmente qué sucede cuando hablamos de ella? Existen distintas maneras de definir este proceso. Por ejemplo, Manzur y Cardoso (2015) describen que: "La evaporación es el paso continuo de una sustancia del estado líquido al de vapor; se efectúa en la superficie del líquido y ocurre a cualquier temperatura hasta que se satura de vapor el espacio inmediato al líquido".

Puede resultar un poco extraño leer de esta manera algo que, en apariencia, conocemos desde pequeños. Generalmente, relacionamos la evaporación con el ciclo natural del agua: evaporación, condensación y precipitación. Algunos autores incluyen más etapas —y no se equivocan—, pero, para facilitar su comprensión, por ahora nos quedaremos con estas tres.

Desglosemos un poco más la definición de Manzur y Cardoso (2015). Cuando se menciona que la evaporación es un paso continuo, podemos entenderlo como un flujo que puede seguir ocurriendo mientras existan las condiciones necesarias, aunque su velocidad puede cambiar con el tiempo, es decir, como algo que se mueve de un lugar a otro. A este movimiento también se le conoce como transferencia y, para que exista una transferencia, generalmente debe haber una diferencia entre dos zonas. En otras palabras, debe haber una parte en la que exista mayor cantidad de algo y otra en la que exista menos. Esa diferencia es la que provoca el movimiento.

Veámoslo con un ejemplo sencillo, el cual se representa en la Figura 1. Piensa ahora en una taza de café caliente. Al sostenerla, poco a poco sientes el calor en tus manos. El calor se mueve desde la taza, que está más caliente, hacia tus manos, que están más frías. Cuando existe una diferencia de temperatura, la energía tiende a pasar de la zona más caliente a la más fría. Ahí hubo una transferencia de calor.

Figura 1. *Transferencia de calor de una taza de café a nuestras manos.*



¿Sabías que soplar sobre la superficie de una taza de café puede aumentar su velocidad de evaporación y favorecer su enfriamiento? Con el agua ocurre algo similar. En la superficie, algunas moléculas reciben suficiente energía para salir del líquido y pasar al aire en forma de vapor (una transferencia de masa). Cuando el aire está seco, puede recibir una mayor cantidad de ese vapor y el agua se evapora con mayor rapidez. En cambio, cuando el aire ya contiene mucha humedad, recibe menos vapor y la evaporación se vuelve más lenta. Es parecido a intentar secar una toalla: en un día seco, el agua pasa con mayor facilidad al aire y la toalla se seca rápido; en un día húmedo, el aire ya contiene mucha agua y la toalla tarda más en secarse. Por eso, la evaporación depende de muchas variables, no solamente de la energía que absorbe ni de la humedad inmediata. Con todo esto podemos observar que la evaporación es un proceso en donde sucede una transferencia simultánea de masa y de calor, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. *Esquema de los procesos de transferencia de calor y masa que intervienen en la evaporación del agua.*



Es importante no confundir evaporación y ebullición. La evaporación ocurre únicamente en la superficie; la ebullición ocurre en todo el líquido y forma burbujas.

Evaporación ≠ Ebullición

La ebullición se manifiesta cuando el líquido alcanza una temperatura específica denominada punto de ebullición, momento en el cual su presión de vapor se iguala a la presión atmosférica (Bergman y Levine, 2019; Yunus A. Çengel, 2007). Recordemos que la evaporación sucede en cualquier momento, mientras la ebullición tiene que cumplir la condición anterior.

Ahora que conocemos los principios básicos de la evaporación, es importante entender cuáles son las variables que influyen en este proceso. La velocidad con la que el agua se transforma en vapor depende tanto de las propiedades del líquido como de las condiciones del entorno. Factores como la temperatura del agua y del aire, la humedad ambiental, las corrientes de aire, la superficie expuesta, la presión atmosférica y la presencia de sustancias disueltas pueden acelerar o disminuir la evaporación. La Figura 3 resume de manera esquemática los principales factores que intervienen en este fenómeno.

Figura 3. *Factores que afectan el fenómeno de evaporación del agua.*



Un ejemplo cotidiano de aplicación de un proceso de evaporación se encuentra en los perfumes, los cuales suelen contener etanol y distintas sustancias aromáticas. Al aplicarlos sobre la piel, el etanol se evapora rápidamente debido a su alta volatilidad y la temperatura del cuerpo, mientras que los compuestos responsables del aroma lo hacen a diferentes velocidades. Por esta razón, el olor de un perfume puede cambiar con el paso del tiempo: algunas sustancias desaparecen primero y otras permanecen durante más horas.

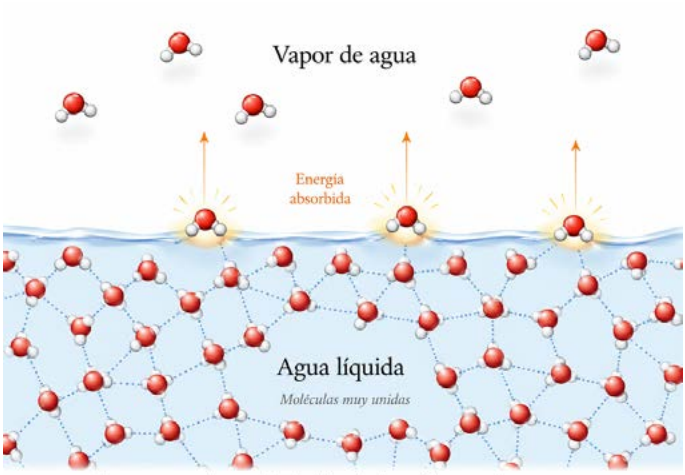
En nuestro caso, interesa favorecer la evaporación del agua para después recuperar el vapor mediante condensación. Este proceso se parece a una destilación sencilla: el agua cambia de líquido a vapor y posteriormente vuelve al estado líquido. De esta manera, pueden separarse sales y muchos contaminantes que no se evaporan junto con ella.

Regresemos ahora a la parte en la que las moléculas de agua necesitan recibir energía para abandonar el líquido y pasar al estado gaseoso. Esta energía se conoce como calor latente de vaporización y representa la cantidad de energía necesaria para transformar una determinada cantidad de agua líquida en vapor, sin que durante ese cambio aumente su temperatura.

A una temperatura cercana a los 25 °C, se necesitan aproximadamente 2,440 kilojulios, o cerca de 580 kilocalorías, para evaporar un kilogramo de agua (Bergman y Levine, 2019; Yunus A. Çengel, 2007). Para imaginar la magnitud de esta energía, puede compararse, únicamente como referencia, con la energía alimentaria que aporta una hamburguesa grande. Sin embargo, durante la evaporación, esta energía no se utiliza para calentar más el agua, sino para vencer las fuerzas de atracción entre sus moléculas y permitir que se separen en forma de vapor. Como las moléculas que escapan se llevan parte de la energía, la evaporación puede enfriar la superficie cuando ese calor no se repone con la misma rapidez.

Dicho de una manera sencilla, las moléculas de agua se mantienen muy unidas entre sí. No es que "no quieran soltarse", pero las fuerzas que las atraen hacen necesario aportar una cantidad considerable de energía para separarlas, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. *Representación esquemática del proceso de evaporación de agua a nivel molecular*



Para evaporarse, algunas moléculas deben absorber suficiente energía para separarse.

Aquí aparece otro término que podría causar confusión: el calor sensible. Aunque su nombre suene parecido, cumple una función distinta. El calor sensible es la energía que aumenta o disminuye la temperatura del agua sin cambiar su estado (Bergman y Levine, 2019; Yunus A. Çengel, 2007).

Por ejemplo, cuando calentamos agua de 20 a 40 °C, estamos aportando calor sensible. En cambio, cuando esa energía se emplea para que el agua pase de líquido a vapor, hablamos de calor latente de vaporización. Uno aumenta la temperatura del líquido y el otro permite que ocurra el cambio de fase. En la evaporación se usan ambas energías.

Ya vimos que para que el agua pueda evaporarse necesita recibir energía. Sin embargo, esa energía no llega siempre de la misma manera. El calor puede viajar desde el Sol, desde el aire, desde el recipiente o incluso desde el mismo volumen de agua hacia la superficie donde ocurre la evaporación. A estas distintas formas de movimiento de la energía se les conoce como mecanismos de transferencia de calor. Aunque sus nombres pueden sonar un poco técnicos, en realidad los observamos todos los días: cuando sostenemos una taza caliente, cuando sentimos una corriente de aire o cuando el Sol calienta nuestra piel.

Es importante no confundir estos mecanismos con el calor latente de vaporización. La conducción, la convección y la radiación describen cómo llega la energía hasta el agua; el calor latente representa la energía que finalmente se utiliza para separar sus moléculas y transformarlas en vapor. En la Tabla 1 se describen los distintos mecanismos de transferencia de calor. Entonces recordemos que para que sucedan las transferencias tiene que haber una diferencia que "empuje" a dicho intercambio (Poós y Varju, 2020).

Tabla 1. *Mecanismos de transferencia de calor*.

Mecanismo de transferencia de calor	**¿Qué sucede?**
Conducción	El calor pasa entre zonas o materiales que están en contacto.
Convección	El calor es transportado por el movimiento del agua o del aire.
Radiación	La energía viaja en forma de ondas, sin necesidad de contacto directo.

Es por ello que la evaporación constituye uno de los principios físicos utilizados en diversos procesos de tratamiento y recuperación de agua. A partir de este fenómeno se han desarrollado distintas tecnologías capaces

de separar el agua de sales y otros contaminantes mediante su transformación en vapor y su posterior condensación.

Estas tecnologías pueden diferenciarse de acuerdo con la fuente de energía utilizada, la manera en que el calor llega al agua y la forma en que se recupera el vapor. A grandes rasgos, pueden agruparse en sistemas solares y sistemas térmicos convencionales (Dashputre et al., 2023). Dentro de los sistemas solares se encuentran los destiladores solares tradicionales, que calientan un volumen de agua mediante la radiación solar, y los evaporadores solares interfaciales, que concentran la energía principalmente en la superficie donde ocurre la evaporación. Por otro lado, a escala industrial se utilizan tecnologías térmicas como: destilación de múltiple efecto, destilación flash multietapa, destilación al vacío, destilación por membranas (Carolina Yabroudi et al., 2011; S. Chen et al., 2025; Curto et al., 2021; Dashputre et al., 2023).

Pero estos sistemas no solo pueden ayudar a obtener agua limpia. Al aprovechar las diferencias de temperatura que se generan durante la evaporación, también es posible producir pequeñas cantidades de electricidad. Para ello se emplean dispositivos termoeléctricos, capaces de convertir directamente el calor en energía eléctrica. De esta manera, mientras la superficie del evaporador se calienta con la luz solar y el agua de las capas inferiores permanece más fría, se crea una diferencia de temperatura que puede aprovecharse para generar electricidad. Aunque la energía obtenida no es suficiente para alimentar grandes equipos, sí puede utilizarse para sensores, sistemas de comunicación o dispositivos de bajo consumo, especialmente en comunidades aisladas donde el acceso al agua y a la energía es limitado.

Aunque los evaporadores solares interfaciales han demostrado ser una alternativa prometedora para la producción sostenible de agua y energía, aún existen desafíos relacionados con la eficiencia de conversión fototérmica, el transporte continuo de agua, la gestión térmica y la estabilidad a largo plazo. Por ello, la investigación reciente se ha enfocado en el desarrollo de estrategias que permitan mejorar su desempeño. Entre ellas destacan el diseño de estructuras porosas capaces de favorecer el transporte capilar de agua y la liberación eficiente del vapor, la incorporación de materiales fototérmicos avanzados que maximicen

la absorción de la radiación solar y la implementación de arquitecturas bidimensionales y tridimensionales que optimicen el aprovechamiento de la energía disponible. Gracias a estos avances, los evaporadores solares interfaciales han evolucionado rápidamente y se perfilan como una de las tecnologías más prometedoras para abordar los desafíos relacionados con el acceso al agua y el aprovechamiento sostenible de la energía. A continuación, en este capítulo se presentan los principios fundamentales de funcionamiento de estos sistemas, así como los principales avances en el diseño de materiales, estructuras y configuraciones desarrollados en los últimos años. Asimismo, se describen sus aplicaciones más relevantes en el tratamiento y recuperación de agua, incluyendo procesos de desalinización y purificación, así como su integración con dispositivos para la generación y aprovechamiento de energía.

Evaporadores solares interfaciales

Ya hablamos sobre qué es la evaporación, algunos de los principios físicos que la explican y varias tecnologías que aprovechan este fenómeno para tratar agua o generar energía. Ahora nos enfocaremos en una alternativa más reciente, descentralizada y con una baja demanda de energía externa: los evaporadores solares interfaciales.

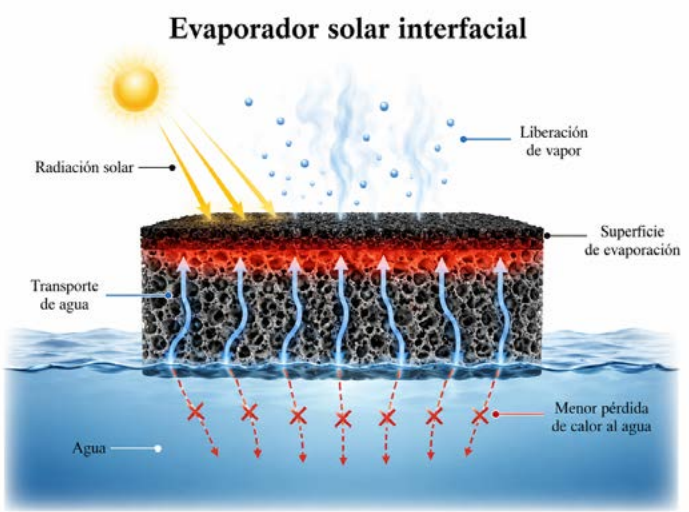
El término "interfacial" puede sonar un poco extraño. ¿A qué nos referimos con él? Básicamente, hablamos de sistemas que aprovechan la energía solar y concentran el calentamiento cerca de la superficie donde el agua entra en contacto con el aire (interfase agua-aire). En lugar de utilizar la energía para calentar todo el volumen de agua, buscan llevar el calor principalmente a una zona pequeña y controlada, justo donde ocurre la evaporación. Para lograrlo, estos sistemas integran materiales capaces de absorber la radiación solar y transformarla en calor, junto con otros componentes que transportan el agua hacia la superficie. Dependiendo de su composición, porosidad y forma, también pueden aportar aislamiento térmico, estabilidad mecánica y caminos para que el vapor se libere con mayor facilidad (Balu et al., 2024; J. Chen et al., 2020; Ren et al., 2026; Srishti et al., 2023; Wu et al., 2021; Zhao et al., 2023).

Recordemos lo que hablamos sobre las transferencias de calor y de masa. En un evaporador solar interfacial, el agua se desplaza hacia la superficie, la energía se concentra cerca de esa zona y, finalmente, el vapor se aleja hacia el aire. Al mismo tiempo, el diseño busca reducir la cantidad de calor que se pierde hacia el agua que permanece debajo. En otras palabras, se intenta utilizar la energía solar justo donde más se necesita: en la superficie de evaporación.

La Figura 5 muestra de manera esquemática los principales procesos que tienen lugar en un evaporador solar interfacial. Debido a que en estos sistemas ocurren simultáneamente fenómenos de absorción de luz, transferencia de calor, transporte de agua y liberación de vapor, diversos autores (S. Chen et al., 2025; Srishti et al., 2023; Zhan et al., 2024) coinciden en que su diseño debe satisfacer tres requisitos fundamentales:

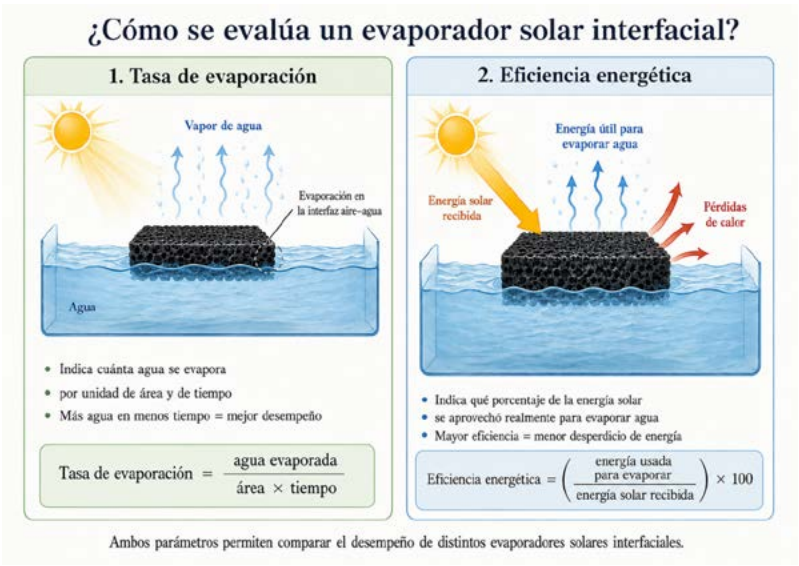
1. Captar la mayor cantidad posible de luz solar y transformarla en calor.
2. Llevar agua de manera continua hasta la superficie donde ocurre la evaporación.
3. Mantener el calor concentrado en esa zona y permitir que el vapor salga con facilidad.

Figura 5. *Esquema de los procesos fundamentales que ocurren en un evaporador solar interfacial.*



Al controlar y mejorar estos tres aspectos, es posible alcanzar tasas de evaporación más altas. Pero ¿cómo podemos saber qué tan bien funciona un evaporador solar interfacial? Su desempeño se evalúa principalmente de dos maneras. La primera es mediante la tasa de evaporación, que indica cuánta agua se transforma en vapor por unidad de área y de tiempo. La segunda es la eficiencia energética, que expresa qué porcentaje de la energía solar recibida se aprovechó realmente para evaporar el agua y cuánto se perdió hacia el ambiente o hacia el resto del sistema. Lo anterior se muestra en la Figura 6.

Figura 6. *Principales parámetros utilizados para evaluar el desempeño de un evaporador solar interfacial.*



Ambos parámetros permiten comparar el desempeño de distintos evaporadores solares interfaciales. Para construir nuestro sistema, regresaremos ahora al primer requisito: captar la luz del Sol y transformarla en calor. Los materiales capaces de realizar esta tarea se conocen como materiales fototérmicos (Cui et al., 2023; Wu et al., 2021). Su función puede entenderse con un ejemplo sencillo. Cuando dejamos un objeto oscuro bajo el sol, suele calentarse más que uno de color claro, porque absorbe una mayor cantidad de radiación. En un evaporador solar ocurre

algo parecido: el material recibe la luz, transforma parte de esa energía en calor y la utiliza para favorecer la evaporación del agua.

Para cumplir esta función se han utilizado distintos materiales. Algunos están basados en carbono, como el carbón activado, el grafito o la madera carbonizada. Otros contienen minerales y compuestos metálicos, como la magnetita. También existen polímeros que pueden formar capas oscuras sobre telas, espumas o materiales porosos. Incluso se han utilizado partículas muy pequeñas de metales como el oro, la plata o el cobre, capaces de interactuar con la luz y producir calor (Cui et al., 2023; Kim et al., 2021; Wu et al., 2021; Zhao et al., 2023).

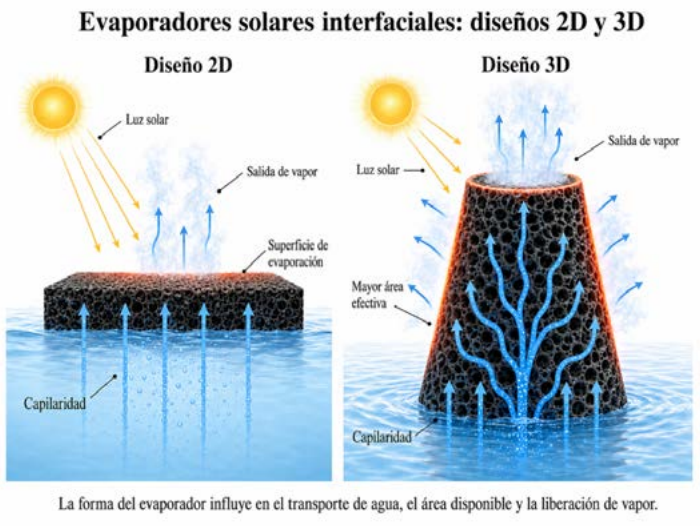
La elección del material no depende únicamente de cuánto puede calentarse. También se deben considerar su costo, resistencia, seguridad y facilidad de fabricación. Un material puede absorber mucha luz, pero si es demasiado caro, frágil o difícil de producir, su aplicación fuera del laboratorio será limitada.

Después de elegir el material encargado de captar la luz y convertirla en calor, debemos avanzar hacia los otros dos requerimientos: mantener un suministro continuo de agua hacia la zona de evaporación y conservar el calor cerca de esa superficie, permitiendo al mismo tiempo que el vapor pueda salir con facilidad.

Una forma de lograrlo es utilizar materiales hidrofílicos, es decir, materiales que tienen afinidad por el agua. Cuando además poseen poros conectados, el líquido puede desplazarse por su interior mediante capilaridad, de manera similar a como una servilleta absorbe el agua de una mesa. Sin embargo, no solamente importa el material utilizado; también es necesario considerar su forma y su estructura.

De acuerdo con su arquitectura, los evaporadores solares interfaciales pueden clasificarse principalmente en sistemas bidimensionales y tridimensionales. Los evaporadores 2D cuentan con una superficie plana en la que se concentra el calor y ocurre la evaporación. En cambio, los sistemas 3D incorporan superficies laterales y diferentes formas, como cilindros, conos o estructuras plegadas, que aumentan el área disponible para producir vapor (Kim et al., 2021; J. Li y Sun, 2025; Liang et al., 2024). En la figura 7 se muestran ejemplos de distintas geometrías.

Figura 7. *Clasificación general de los evaporadores solares interfaciales en configuraciones bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D).*



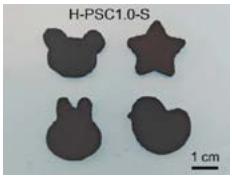
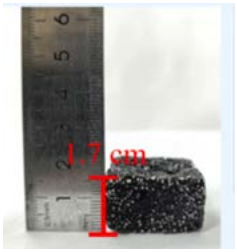
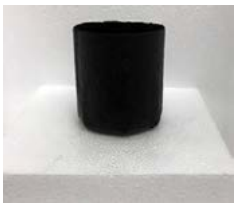
Por esta razón, la geometría del evaporador influye directamente en su funcionamiento. Puede modificar la cantidad de luz que recibe, la manera en que el agua llega hasta la superficie, la distribución del calor y la facilidad con la que el vapor se libera. En otras palabras, no solo importa de qué está hecho el evaporador, sino también la forma que se le da.

Como puede observarse, no existe una única forma de diseñar un evaporador solar interfacial. Diferentes investigaciones han combinado materiales fototérmicos, matrices de soporte y formas estructurales para mejorar la absorción de luz, el transporte de agua y la liberación de vapor. Algunos diseños son planos o bidimensionales, mientras que otros adoptan formas tridimensionales, como conos o cilindros, con el propósito de aumentar el área disponible para la evaporación. La Tabla 2 presenta algunos ejemplos representativos de evaporadores solares interfaciales y muestra cómo la combinación entre material y diseño estructural determina las características y el funcionamiento de estos dispositivos.

En el primer ejemplo mostrado en la Tabla 2, la capa fototérmica está compuesta por nanotubos de carbono y pintura negra, materiales

capaces de absorber eficientemente la radiación solar y convertirla en calor. Estos materiales se encuentran soportados sobre una estructura porosa de poliestireno obtenida mediante la polimerización de una emulsión altamente concentrada, conocida como HIPE (High Internal Phase Emulsion). Los materiales resultantes, denominados polyHIPEs, se caracterizan por presentar una elevada porosidad interconectada, baja densidad y una estructura fácilmente modificable, características que los hacen especialmente atractivos para aplicaciones en evaporación solar interfacial. La Figura 8 muestra de manera esquemática el proceso de obtención de los polyHIPEs a partir de emulsiones utilizadas como plantillas para generar su estructura porosa.

Tabla 2. *Ejemplos representativos de evaporadores solares interfaciales reportados en la literatura, incluyendo los materiales empleados y las configuraciones geométricas utilizadas*.

Material fototérmico	Matriz de soporte	Morfología	Imagen	Referencia
Nanotubos de carbono y pintura negra	Polímero de estireno obtenido por emulsiones altamente concentradas	2D		(M. Li et al., 2025)
Nanocristales de ferrita de cobalto soportados sobre nanotubos de carbono	Aerogel de quitosano	2D		(M. Li et al., 2025)
Óxido de grafeno	Papel filtro de celulosa	3D		(M. Li et al., 2025)
Óxido mixto de cobre, hierro y manganeso	Membrana fibrosa de vidrio de cuarzo	3D		(M. Li et al., 2025)

Para entender cómo se fabrica, podemos imaginar una mezcla parecida a agua y aceite, en la que una gran cantidad de pequeñas gotas queda distribuida dentro de otra fase. Una de estas fases se transforma en un polímero sólido y, posteriormente, la fase interna se retira. Las gotas

dejan entonces espacios vacíos que forman una red de poros, similar a la estructura de una esponja.

Figura 8. *Representación esquemática de la obtención de materiales porosos tipo polyHIPE a partir de emulsiones altamente concentradas (High Internal Phase Emulsions, HIPEs).*



Una de las principales ventajas de esta técnica es que permite modificar características como el tamaño de los poros, su conexión y la forma final del material al cambiar la composición de la emulsión o utilizar moldes diferentes (Recio-Colmenares et al., 2022; Vallejo-Macías et al., 2020). Estos poros pueden convertirse en pequeños caminos por los que se desplazan el agua y el vapor.

Al mismo tiempo, la estructura sólida sirve como soporte para incorporar materiales a escala nanométrica capaces de absorber la luz solar y transformarla en calor. Por ello, los polyHIPEs resultan interesantes para fabricar evaporadores ligeros, porosos y con formas que pueden adaptarse a las necesidades de cada diseño.

Aplicaciones de los evaporadores solares interfaciales

Los evaporadores solares interfaciales también cuentan con una amplia variedad de aplicaciones, las cuales se resumen en la Figura 9. Entre ellas, destacan el tratamiento y la recuperación de agua. Para entender cómo funcionan en este campo, recordemos un poco el proceso de destilación del que hablamos al inicio. Cuando el agua contaminada llega hasta la superficie del evaporador, recibe energía y una parte de ella se transforma en vapor. Durante este proceso, muchas de las sustancias disueltas, como sales, metales, colorantes y agentes biológicos (Srishti et al., 2023), permanecen en el recipiente o en el evaporador, ya que no se evaporan junto con el agua.

Figura 9. *Aplicaciones de los evaporadores solares interfaciales.*



Una vez generado, el vapor de agua puede enfriarse y condensarse sobre una superficie fría, transformándose nuevamente en agua líquida. De esta manera, es posible recuperar agua con una menor cantidad de contami-

nantes. Por ello, estos sistemas se han estudiado para la desalación de agua de mar, el tratamiento de aguas salobres y la recuperación de agua proveniente de distintas corrientes contaminadas. La Figura 10 ilustra de manera sencilla cómo se lleva a cabo este proceso de purificación utilizando únicamente la energía del Sol.

Figura 10. *Representación esquemática del proceso de tratamiento y recuperación de agua mediante evaporación solar interfacial.*



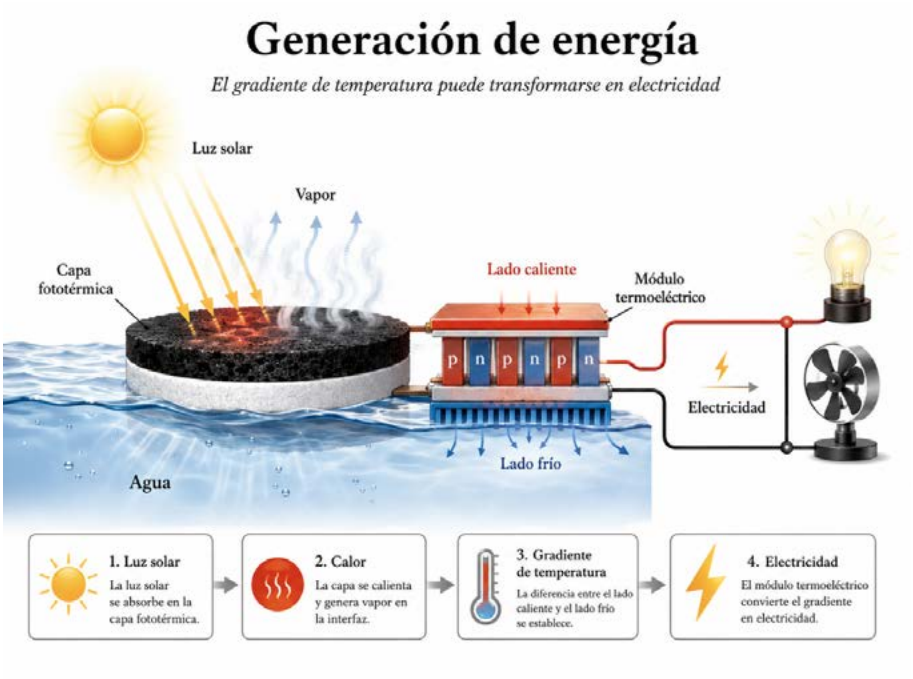
Además del tratamiento y la recuperación de agua, estos evaporadores solares interfaciales también pueden integrarse con otros dispositivos para generar electricidad. Pero no nos confundamos: el evaporador por sí solo no siempre produce energía eléctrica. Su función principal sigue siendo captar la luz solar, transformarla en calor y favorecer la formación de vapor.

Durante este proceso se genera una diferencia de temperatura. La superficie del evaporador se calienta al recibir la radiación solar, mientras que el agua y la parte inferior del sistema suelen mantenerse a una temperatura menor. Esta diferencia puede aprovecharse mediante un módulo termoeléctrico, un pequeño dispositivo capaz de transformar un

gradiente de temperatura en electricidad (S. Chen et al., 2025; Srishti et al., 2023). En otras palabras, un lado permanece caliente y el otro frío; esa diferencia provoca el movimiento de cargas eléctricas y genera un voltaje.

Podemos imaginarlo como una manera de recuperar parte del calor disponible en el sistema. Mientras una parte de la energía solar se utiliza para evaporar el agua, otra puede aprovecharse para producir pequeñas cantidades de electricidad. Esta energía todavía no sería suficiente para abastecer una vivienda, pero podría utilizarse para alimentar sensores, luces pequeñas, ventiladores u otros dispositivos de bajo consumo (Srishti et al., 2023). La Figura 11 ilustra de manera sencilla cómo se puede utilizar un evaporador solar interfacial para la generación de energía eléctrica.

Figura 11. *Representación esquemática de la generación de energía eléctrica mediante la integración de un evaporador solar interfacial con un dispositivo termoeléctrico.*



Un ejemplo de generación eléctrica fue presentado por S. Chen et al. (2025), quienes integraron un evaporador elaborado con materiales de-

rivados de biomasa a un módulo termoeléctrico. Bajo radiación solar, la diferencia entre la superficie caliente y la zona fría permitió generar electricidad y, al aumentar la intensidad de la luz, el sistema logró incluso encender un pequeño ventilador.

De esta manera, un mismo sistema puede desempeñar una doble función: producir vapor para la recuperación y purificación de agua, al tiempo que aprovecha las diferencias de temperatura generadas durante el proceso para producir electricidad. Esta capacidad resulta especialmente atractiva para comunidades aisladas o regiones con acceso limitado tanto al agua potable como a fuentes convencionales de energía. En conjunto, estas características convierten a los evaporadores solares interfaciales en una tecnología descentralizada, versátil y sostenible, con un amplio potencial para contribuir a la gestión eficiente de los recursos hídricos y energéticos. Aunque aún existen desafíos relacionados con su escalamiento y desempeño a largo plazo, los avances recientes en materiales, diseños estructurales y estrategias de aprovechamiento energético continúan ampliando las posibilidades de aplicación de estos sistemas en diversos escenarios.

Conclusiones

Los evaporadores solares interfaciales representan una manera diferente de aprovechar la energía del Sol para favorecer la evaporación del agua. A diferencia de otros sistemas que calientan grandes volúmenes de líquido, estos dispositivos buscan concentrar el calentamiento cerca de la interfase agua-aire. Para lograrlo, deben captar la radiación solar, transformarla en calor, transportar agua de manera continua y reducir las pérdidas de energía hacia el resto del sistema. Como vimos a lo largo del capítulo, su funcionamiento no depende solamente del material fototérmico. También intervienen la porosidad, la afinidad con el agua, la forma del evaporador, entre otras más.

Una de sus aplicaciones más importantes se encuentra en el tratamiento y la recuperación de agua, como también la generación de electricidad. Sin embargo, todavía existen retos importantes. Es necesario evitar la acumulación de sales y contaminantes sobre y dentro del evaporador, con-

servar el transporte de agua, mejorar su duración frente al uso continuo y asegurar que los materiales empleados sean seguros, económicos y fáciles de fabricar. También debe mejorarse la recolección y condensación del vapor, ya que evaporar agua no significa recuperarla automáticamente. A esto se suman las variaciones naturales de la radiación solar, la temperatura, el viento y la humedad, que pueden modificar el funcionamiento fuera del laboratorio.

En el futuro, el avance de esta tecnología dependerá de diseñar sistemas más completos, resistentes y sencillos de utilizar. Más que sustituir por sí solos a las grandes plantas de tratamiento, los evaporadores solares interfaciales pueden convertirse en una alternativa complementaria y descentralizada para lugares donde el acceso al agua y a la energía es limitado. En pocas palabras, su mayor potencial se encuentra en aprovechar mejor un recurso abundante como la luz solar para responder, de manera conjunta, a dos necesidades cada vez más importantes: disponer de agua de mejor calidad y utilizar la energía de una forma más sostenible.

Referencias

Balu, S. K., Cheng, S., Latthe, S. S., Xing, R. & Liu, S. (2024). Solar-driven interfacial evaporation: Materials design and device assembly. *Energy Materials*, *4*(2). https://doi.org/10.20517/energymater.2023.74

Bergman, T. L. & Lavine, A. S. (2019). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8.ª ed.). John Wiley & Sons.

Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico* (3.ª ed.). McGraw-Hill/Interamericana Editores.

Chen, J., Li, B., Hu, G., Aleisa, R., Lei, S., Yang, F., Liu, D., Lyu, F., Wang, M., Ge, X., Qian, F., Zhang, Q. & Yin, Y. (2020). Integrated evaporator for efficient solar-driven interfacial steam generation. *Nano Letters*, *20*(8), 6051–6058. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01999

Chen, S., Yang, B., Yang, D., Qiu, X. & Zheng, D. (2025). Multifunctional fully biomass-derived bilayer aerogel for efficient solar-driven desalination and thermoelectricity generation. *ACS Nano*, *19*(21), 19681–19696. https://doi.org/10.1021/acsnano.5c01360

Cui, X., Ruan, Q., Zhuo, X., Xia, X., Hu, J., Fu, R., Li, Y., Wang, J. & Xu, H. (2023). Photothermal nanomaterials: A powerful light-to-heat converter. *Chemical Reviews*, *123*(11), 6891–6952. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00159

Curto, D., Franzitta, V. & Guercio, A. (2021). A review of the water desalination technologies. *Applied Sciences*, *11*(2), 670. https://doi.org/10.3390/app11020670

Dashputre, A., Kaushik, A., Pal, A., Jariwala, D., Yadav, K. & Shah, M. (2023). Geothermal energy integrated multi-effect evaporator (MEE) and multi-effect distillation (MED)-based desalination systems: An ecofriendly and sustainable solution. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(26), 67941–67952. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26858-w

Kim, J., Hwang, J., Kim, S., Cho, S. H., Choi, H., Kim, H. Y. & Lee, Y. S. (2021). Interfacial solar evaporator: Physical principles and fabrication methods. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, *8*(4), 1347–1367. https://doi.org/10.1007/s40684-021-00337-4

Li, J. & Sun, Y. (2025). Solar-driven interfacial evaporators. En *Photothermal materials and membranes for solar-driven water treatment* (pp. 173–209). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21788-3.00007-X

Li, M., Sun, H., Zhao, J., Du, Q., Yang, M., Xiong, T., Nan, Y., Zhang, Z., Li, D. & Sun, D. (2025). Hydrophilic polystyrene porous skeleton prepared via high internal phase emulsion template for efficient solar-driven interfacial evaporation. *Chemical Engineering Journal*, *504*, 158254. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158254

Li, X., Lin, R., Ni, G., Xu, N., Hu, X., Zhu, B., Lv, G., Li, J., Zhu, S. & Zhu, J. (2018). Three-dimensional artificial transpiration for efficient solar waste-water treatment. *National Science Review*, *5*(1), 70–77. https://doi.org/10.1093/nsr/nwx051

Liang, Y., Wang, D., Yu, H., Wu, X., Lu, Y., Yang, X., Owens, G. & Xu, H. (2024). Recent innovations in 3D solar evaporators and their functionalities. *Science Bulletin*, *69*(22), 3590–3617. https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.09.015

Manzur, A. & Cardoso, J. (2015). Velocidad de evaporación del agua. *Revista Mexicana de Física*, *61*(1), 59–65.

Poós, T. & Varju, E. (2020). Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *153*, 119500. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119500

Recio-Colmenares, C. L., Ortíz-Ríos, D., Pelayo-Vázquez, J. B., Moreno-Medrano, E. D., Arratia-Quijada, J., Torres-Lubian, J. R., Huerta-Marcial, S. T., Mota-Morales, J. D. & Pérez-García, M. G. (2022). Polystyrene macroporous magnetic nanocomposites synthesized through deep eutectic solvent-in-oil high internal phase emulsions and Fe3O4 nanoparticles for oil sorption. *ACS Omega*, *7*(25), 21763–21774. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01836

Ren, X., Li, X., He, H., Chen, G., Li, D., Lv, J., Zhang, Y., Yu, J., Guan, Y., Qu, Y., Xu, R. & Wu, Y. (2026). Solar-driven interfacial evaporation technologies: Materials, optimization strategies, applications, and research progress. *eScience Energy*, 100028. https://doi.org/10.1016/j.esen.2026.100028

Shi, Y., Li, R., Jin, Y., Zhuo, S., Shi, L., Chang, J., Hong, S., Ng, K. C. & Wang, P. (2018). A 3D photothermal structure toward improved energy efficiency in solar steam generation. *Joule*, *2*(6), 1171–1186. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.013

Srishti, N., Sinhamahapatra, A. & Kumar, A. (2023). Review of the progress of solar-driven interfacial water evaporation (SIWE) toward a practical approach. *Energy Advances*, *2*(1), 100–118. https://doi.org/10.1039/d3ya00028a

Vallejo-Macías, M. T., Recio-Colmenares, C. L., Pelayo-Vázquez, J. B., Gómez-Salazar, S., Carvajal-Ramos, F., Soltero-Martínez, J. F., Vázquez-Lepe, M., Mota-Morales, J. D. & Pérez-García, M. G. (2020). Macroporous polyacrylamide γ-Fe2O3 nanoparticle composites as methylene blue dye adsorbents. *ACS Applied Nano Materials*, *3*(6), 5794–5806. https://doi.org/10.1021/acsanm.0c00951

Wu, S. L., Chen, H., Wang, H. L., Chen, X., Yang, H. C. & Darling, S. B. (2021). Solar-driven evaporators for water treatment: Challenges and opportunities. *Environmental Science: Water Research & Technology*, *7*(1), 24–39. https://doi.org/10.1039/d0ew00725k

Yabroudi, C., Cárdenas, C., Aldana, L. & Núñez, J. (2011). Desalinización de agua empleando un destilador solar tubular. *Interciencia*, *36*(10), 731–736. https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/731-YABROUDI-2-7.pdf

Zhan, Z., Su, Y., Xie, M., Li, Y., Shuai, Y. & Wang, Z. (2024). Recent advances and challenges for bionic solar water evaporation. *Materials Today*, *81*, 103–115. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.08.018

Zhao, X., Meng, X., Zou, H., Zhang, Y., Ma, Y., Du, Y., Shao, Y., Qi, J. & Qiu, J. (2023). Nano-enabled solar-driven interfacial evaporation: Advanced design and opportunities. *Nano Research*, *16*(5), 6015–6038. https://doi.org/10.1007/s12274-023-5488-2

Zhu, J., Yuan, Z., Zhang, J., Zhao, X., Liu, S., Yu, H., Ren, J., Su, M., Liu, S. & Yi, X. (2026). Structurally engineered chitosan aerogel enable solar-driven interfacial evaporation coupled with PMS activated catalysis for dual-functional water remediation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *733*, 139307. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.139307

Capítulo 9

Celdas fotosensibles para la generación sostenible de energía: Materiales, costos y avances actuales

Jean Flores Gómez[1]
Juan Morales Rivera[1]
Celina Sanchez Sanchez[2]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008066

[1] Departamento de Estudios del Agua y la Energía, Centro Universitario de Tonalá Universidad de Guadalajara.
[2] División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Culiacán. Departamento de Ingeniería y Tecnología. Universidad Autónoma de Occidente.

Resumen

Los sistemas fotovoltaicos constituyen uno de los sectores energéticos con mayor crecimiento a nivel mundial. Nuevos sistemas fotovoltaicos se siguen desarrollando con el fin de optimizar costos, aumentar su eficiencia y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero de tecnologías convencionales. Las celdas fotosensibles son una tecnología fotovoltaica prometedora que destaca por ofrecer un bajo costo potencial, versatilidad en el diseño y uso de materiales abundantes y sostenibles. Su desarrollo basado en nuevos compuestos como el dióxido de titanio (TiO_2), los puntos cuánticos y materiales de origen natural busca contribuir a una transición energética basada en energía limpia que satisfaga la demanda energética, reduzca los costos de fabricación y amplíe las aplicaciones de la energía solar en el futuro, fomentando la sostenibilidad a largo plazo. Los avances recientes en nanoestructuras y síntesis verde evidencian que estas tecnologías evolucionan rápidamente y podrían desempeñar un papel clave en la transición hacia sistemas energéticos más limpios, accesibles y sostenibles en las próximas décadas.

Introducción

El crecimiento de la población mundial, la urbanización y el desarrollo tecnológico han provocado un aumento constante en la demanda de energía. Históricamente, gran parte de esta demanda ha sido cubierta mediante combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural, cuya utilización ha contribuido al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero y al cambio climático (Kabir et al., 2018; García-Gutiérrez, 2010). Ante este escenario, las energías renovables han adquirido un papel fundamental al ofrecer alternativas más limpias y sostenibles para la generación de electricidad (Figura 1). Entre ellas, la energía solar destaca por su abundancia y amplia disponibilidad, lo

que ha impulsado el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas capaces de aprovechar la radiación solar para producir energía sin generar emisiones durante su operación.

En este contexto, las investigaciones en nuevos materiales y dispositivos, como las celdas fotosensibles, buscan contribuir a una transición energética que permita satisfacer las necesidades actuales de energía reduciendo el impacto ambiental asociado a las fuentes convencionales (O'Regan y Grätzel, 1991; García-Gutiérrez, 2010). Además, el desarrollo de tecnologías solares avanzadas no solo constituye una alternativa tecnológica, sino también una estrategia fundamental para construir un modelo energético más limpio, resiliente y compatible con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo.

Figura 1. *Principales fuentes de energía utilizadas en el mundo*



La energía solar como alternativa sostenible

La energía solar es una de las fuentes de energía renovable más abundantes y prometedoras para enfrentar la creciente demanda energética mundial y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Su amplia disponibilidad y la ausencia de emisiones durante su operación han impulsado el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas cada vez más eficientes (Kabir et al., 2018; García-Gutiérrez, 2010). Desde las primeras celdas de silicio hasta tecnologías emergentes como las celdas fotosensibles basadas en dióxido de titanio (TiO_2) y puntos cuánticos, la investigación científica en materiales previa y reciente ha buscado mejorar el aprovechamiento de la luz solar y reducir los costos de fabricación (O'Regan y Grätzel, 1991; Jun et al., 2013). Actualmente, el avance de los nanomateriales y de métodos de síntesis más sostenibles está ampliando las posibilidades de aplicación de estas tecnologías, consolidando a la energía solar como una alternativa estratégica para un futuro energético más limpio y sostenible.

Actualmente, la industria fotovoltaica es uno de los sectores energéticos con mayor crecimiento en el mundo. La reducción de costos, el aumento de la eficiencia y la necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero han impulsado la instalación de sistemas solares en hogares, empresas y grandes plantas de generación eléctrica. Aunque todavía existen desafíos relacionados con el almacenamiento de energía y la eficiencia de algunos materiales emergentes, la investigación continúa avanzando hacia tecnologías más accesibles, sostenibles y eficientes. En este sentido, el presente capítulo pretende mostrar una visión general de las celdas fotosensibles como una tecnología en constante desarrollo para la generación de energía limpia. A continuación, se describen sus fundamentos, los materiales utilizados para su fabricación, los avances recientes, su viabilidad económica y las perspectivas futuras para su implementación a gran escala.

¿Qué son las celdas fotosensibles?

Las celdas fotosensibles son dispositivos capaces de transformar la energía de la luz solar en energía eléctrica mediante materiales semiconductores innovadores. A diferencia de las celdas fotovoltaicas convencionales

basadas en silicio, estas tecnologías utilizan materiales semiconductores combinados con colorantes o puntos cuánticos que absorben la luz y facilitan la generación de corriente eléctrica. Su principal atractivo radica en que pueden fabricarse mediante procesos más sencillos, utilizando materiales abundantes y potencialmente más económicos, lo que las convierte en una alternativa prometedora para la producción sostenible de energía (O'Regan y Grätzel, 1991; García-Gutiérrez, 2010).

El principio general de funcionamiento se basa en la interacción entre la radiación solar y un material semiconductor. Cuando la luz incide sobre la celda, parte de su energía es absorbida y utilizada para movilizar electrones dentro de la misma, dando lugar a una corriente eléctrica aprovechable. Este fenómeno, conocido como efecto fotoeléctrico o fotovoltaico, constituye la base de la generación eléctrica solar moderna (Jun et al., 2013). Una diferencia importante entre las celdas fotosensibles y los paneles solares convencionales es el tipo de materiales empleados. Mientras que los dispositivos tradicionales utilizan obleas de silicio de alta pureza, las celdas fotosensibles incorporan materiales como TiO_2, colorantes orgánicos o puntos cuánticos. Esta característica permite diseñar dispositivos más ligeros, potencialmente flexibles y con costos de fabricación menores, aunque actualmente presentan eficiencias inferiores a las alcanzadas por los paneles comerciales de silicio (Zumeta, 2004; Maggi, 2014).

¿Cómo funcionan las celdas fotosensibles?

Aunque su estructura interna puede parecer compleja, el funcionamiento de una celda fotosensible puede entenderse como una cadena de procesos en la que la luz solar pone en movimiento electrones para producir electricidad. El proceso inicia cuando la luz solar llega a la superficie de la celda. Los materiales fotosensibles, como los colorantes especiales o los puntos cuánticos, tienen la capacidad de absorber una parte importante de la radiación visible del Sol. Esta captación de energía es fundamental, ya que determina cuánta luz podrá aprovechar el dispositivo para generar electricidad (O'Regan y Grätzel, 1991; Vogel y Weller, 1994).

Una vez absorbida la luz, la energía transportada por los fotones provoca que algunos electrones aumenten su nivel energético. Dicho de

forma sencilla, los electrones reciben suficiente energía para "saltarse" la barrera energética natural del material semiconductor. Este fenómeno corresponde al efecto fotoeléctrico, considerado el fundamento físico de todas las tecnologías fotovoltaicas (Jun et al., 2013; Gutiérrez et al., 2010). Después de la excitación, los electrones liberados se desplazan a través de una red de materiales semiconductores, generalmente formada por nanopartículas de dióxido de titanio. La estructura porosa y nanoestructurada de este material favorece el movimiento de los electrones hacia el electrodo conductor, reduciendo pérdidas energéticas durante el trayecto (Zukalova et al., 2005; García-Gutiérrez, 2010).

Finalmente, los electrones llegan al circuito externo y comienzan a circular a través de él, generando una corriente eléctrica que puede ser utilizada para alimentar dispositivos eléctricos o almacenarse para su uso posterior. Mientras esto ocurre, un electrolito o sistema de transporte de carga ayuda a restablecer el equilibrio químico dentro de la celda, permitiendo que el proceso continúe de forma cíclica mientras exista iluminación solar (Jun et al., 2013; Qian et al., 2001). En conjunto, estos procesos permiten convertir directamente la energía del sol en electricidad sin necesidad de combustión ni emisiones contaminantes (O'Regan y Grätzel, 1991; Jun et al., 2013).

Evolución de las tecnologías fotosensibles

Primeras generaciones de celdas solares

El desarrollo de la energía fotovoltaica comenzó con las celdas solares de silicio, una tecnología que transformó la forma de aprovechar la energía solar. Estas primeras celdas aparecieron en la década de 1950 y fueron las responsables de demostrar que la luz del sol podía convertirse directamente en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Con el paso de los años, las mejoras en los materiales y en los procesos de fabricación permitieron aumentar significativamente su eficiencia y confiabilidad.

Dentro de esta primera generación destacan las celdas de silicio monocristalino, consideradas las más eficientes entre las tecnologías comerciales tradicionales. Se fabrican a partir de un único cristal de silicio altamente ordenado y puro, lo que facilita el movimiento de los electrones

y permite alcanzar eficiencias superiores al 20%. Sin embargo, su principal desventaja radica en que requieren procesos de fabricación más complejos y costosos (Maggi, 2014; Zumeta, 2004). Por otra parte, las celdas de silicio policristalino están compuestas por múltiples cristales de silicio unidos entre sí. Aunque presentan una eficiencia ligeramente menor, tienen la ventaja de requerir menos energía y recursos durante su fabricación, lo que reduce sus costos de producción. Debido a este equilibrio entre desempeño y costo, se han convertido en una de las tecnologías más utilizadas alrededor del mundo (Maggi, 2014; Zumeta, 2004). Finalmente, las celdas de silicio amorfo representan una alternativa más flexible y ligera. A diferencia de las anteriores, no poseen una estructura cristalina definida y pueden depositarse como películas delgadas sobre diferentes superficies. Aunque su eficiencia es menor, ofrecen ventajas para aplicaciones específicas donde el peso, la flexibilidad o el costo son factores importantes (Maggi, 2014; Zumeta, 2004).

La evolución de estas tecnologías permitió sentar las bases de la industria fotovoltaica moderna, impulsando el desarrollo de nuevas generaciones de celdas solares basadas en materiales alternativos.

Aparición de las celdas fotosensibles

A finales del siglo XX comenzó una nueva era en la investigación fotovoltaica con el surgimiento de las celdas solares fotosensibles o DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells). Estas tecnologías buscaban resolver algunas de las limitaciones asociadas al uso del silicio, especialmente los elevados costos de producción y la complejidad de fabricación. Aunque los principios electroquímicos detrás de estas celdas eran conocidos desde décadas atrás, fue en 1991 cuando Brian O'Regan y Michael Grätzel desarrollaron un diseño estable y eficiente basado en dióxido de titanio (TiO_2) sensibilizado con colorantes, marcando el nacimiento de las DSSC modernas (O'Regan y Grätzel, 1991).

Las DSSC emplean una capa porosa de TiO_2 cubierta por moléculas fotosensibles que absorben la radiación solar. Esta configuración permite fabricar dispositivos potencialmente más económicos, ligeros y versátiles, incluso con posibilidades de integración en ventanas, fachadas o superficies semitransparentes (O'Regan y Grätzel, 1991; García-Gutiérrez, 2010).

Con el objetivo de mejorar aún más la captación de la luz solar, surgió posteriormente una nueva generación de dispositivos conocidos como QDSSC (Quantum Dot Sensitized Solar Cells), o celdas solares sensibilizadas con puntos cuánticos. Estas tecnologías sustituyen a los colorantes convencionales por nanopartículas semiconductoras extremadamente pequeñas llamadas puntos cuánticos. Una de sus principales ventajas es que sus propiedades ópticas pueden modificarse simplemente cambiando el tamaño de las partículas, permitiendo captar una mayor porción del espectro solar (Vogel y Weller, 1994; Qian et al., 2001; Jun et al., 2013).

Los puntos cuánticos más estudiados incluyen materiales como sulfuro de cadmio (CdS), seleniuro de cadmio (CdSe) y sulfuro de zinc (ZnS), los cuales han demostrado mejorar la transferencia de electrones y aumentar la capacidad de aprovechamiento de la luz (Jun et al., 2013; Qian et al., 2001; Zukalova et al., 2005). La principal diferencia entre las tecnologías tradicionales de silicio y las DSSC o QDSSC radica en la forma en que captan y transforman la luz solar. Mientras las celdas convencionales dependen de semiconductores de alta pureza obtenidos mediante procesos complejos, las tecnologías fotosensibles utilizan materiales abundantes, técnicas de fabricación más sencillas y nanoestructuras especializadas. Aunque actualmente presentan eficiencias inferiores a las de los mejores módulos de silicio, ofrecen ventajas importantes en sostenibilidad, flexibilidad de diseño y potencial reducción de costos. Por esta razón, continúan siendo una de las áreas más activas de investigación dentro de la energía solar avanzada (O'Regan y Grätzel, 1991; Jun et al., 2013; García-Gutiérrez, 2010).

Materiales utilizados en las celdas fotosensibles

El dióxido de titanio (TiO_2)

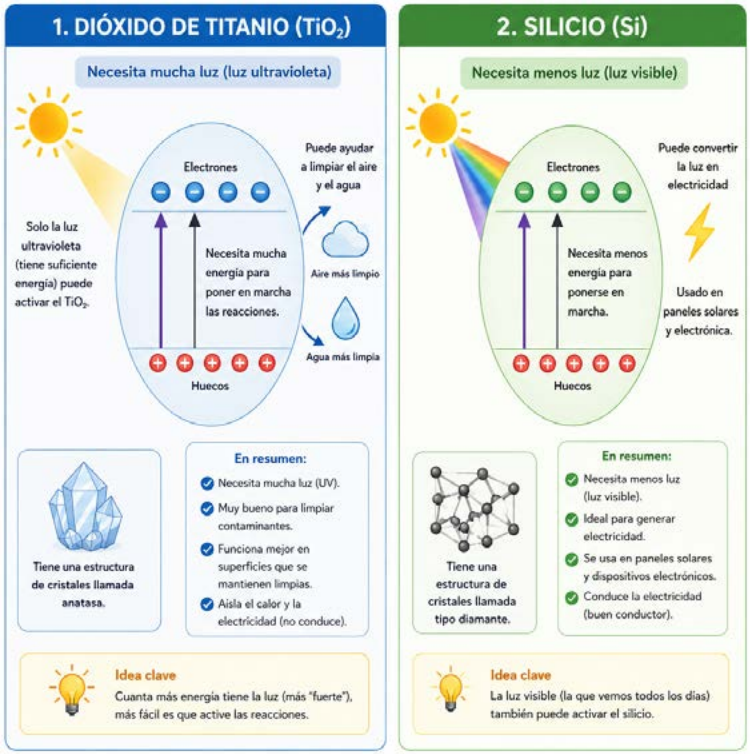
El dióxido de titanio (TiO_2) es uno de los materiales más utilizados en las celdas fotosensibles debido a que combina bajo costo, abundancia y buenas propiedades semiconductoras. Este material actúa como una plataforma que recibe y transporta los electrones generados cuando la luz solar es absorbida por los materiales fotosensibles de la celda. (O'Regan

y Grätzel, 1991; Chen y Mao, 2007). Una de sus principales propiedades es su estabilidad química, lo que le permite trabajar durante largos periodos sin degradarse fácilmente. Además, puede sintetizarse en forma de nanopartículas y estructuras porosas que aumentan considerablemente el área disponible para captar luz y favorecer el movimiento de electrones dentro del dispositivo (Carp et al., 2004; Zukalova et al., 2005). Entre sus ventajas más importantes destacan su abundancia en la naturaleza, su bajo costo de producción, su resistencia a la corrosión y su baja toxicidad. Estas características lo convierten en un material atractivo para tecnologías energéticas sostenibles, especialmente en comparación con otros semiconductores más costosos o difíciles de obtener (Chen y Mao, 2007; W. Li et al., 2003).

Aunque el TiO_2 es ampliamente conocido por su uso como pigmento blanco en pinturas, cosméticos y materiales de construcción, también tiene aplicaciones avanzadas en áreas como la fotocatálisis, la purificación de aire y agua, la producción de hidrógeno y las celdas solares fotosensibles. En estas últimas, su función es facilitar el transporte de los electrones generados por la luz solar, contribuyendo a la producción de electricidad limpia y renovable (Fujishima y Honda, 1972; García-Gutiérrez, 2010).

Gracias a esta combinación de propiedades, el dióxido de titanio continúa siendo uno de los materiales más prometedores para el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas más eficientes, económicas y amigables con el medio ambiente (Figura 2). En este contexto, los investigadores han buscado mejorar el desempeño de estos materiales mediante nuevas formas de preparación y diseño, con el objetivo de hacer las celdas solares más eficientes y económicas en el futuro (Miu et al., 2024).

Figura 2. *Comparación de los materiales TiO_2 y del silicio*



Síntesis verde de nanomateriales

La síntesis verde, también conocida como green synthesis, se basa en los principios de la química verde y consiste en utilizar sustancias de origen natural o renovable para producir nanomateriales. Este método se caracteriza por emplear desechos orgánicos, extractos vegetales o biopolímeros como agentes de reacción, evitando procesos que requieran reactivos peligrosos o condiciones extremas de operación. De esta forma, es posible obtener materiales como el TiO_2 mediante procedimientos más sencillos y sostenibles que los métodos tradicionales de síntesis química (Rao et al., 2015; Chen y Mao, 2007; Devasvaran y Lim, 2021).

Uno de los principales atractivos de la síntesis verde es la reducción del impacto ambiental asociado a la producción de nanomateriales. Los

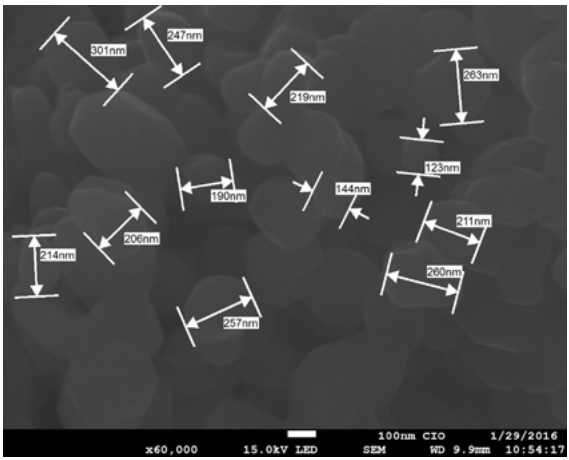
métodos convencionales suelen requerir solventes agresivos, altas temperaturas y grandes cantidades de energía. En contraste, los procesos verdes utilizan compuestos biodegradables y generan una menor cantidad de residuos contaminantes (Miu et al., 2024). Además, este enfoque favorece el aprovechamiento de recursos renovables y subproductos agrícolas que normalmente serían desechados. Esto no solo disminuye el consumo de materias primas de origen petroquímico, sino que también impulsa estrategias de economía circular y producción sostenible. Gracias a estas ventajas, la síntesis verde se ha convertido en una herramienta importante para el desarrollo de materiales destinados a energías renovables y aplicaciones ambientales (Shah et al., 2015; Rao et al., 2015), reduciendo el uso de sustancias tóxicas, el consumo de energía y la generación de residuos. En el caso de las celdas fotosensibles, la síntesis verde representa una alternativa prometedora para fabricar materiales semiconductores con menor impacto ambiental y costos potencialmente más bajos (Rao et al., 2015; Garnweitner et al., 2008).

Uso de pectina en la fabricación de materiales fotosensibles

La búsqueda de tecnologías solares más sostenibles ha impulsado el uso de materiales naturales que permitan reducir el impacto ambiental de los procesos de fabricación. Entre ellos destaca la pectina, un biopolímero presente de forma natural en frutas como la naranja, el limón y la manzana, ampliamente conocido por su uso en la elaboración de mermeladas y alimentos gelificados. Sin embargo, sus propiedades químicas también la convierten en una herramienta útil para la síntesis de materiales destinados a celdas fotosensibles (Thakur et al., 1997). La pectina está formada por largas cadenas moleculares capaces de interactuar con compuestos metálicos y actuar como una matriz natural durante la síntesis de materiales semiconductores. Una de las funciones más importantes de la pectina es su papel como agente estabilizante. Durante la formación de nanopartículas, es común que estas tiendan a agruparse, lo que puede afectar negativamente sus propiedades. La presencia de la pectina ayuda a controlar este proceso, manteniendo una distribución más uniforme de

las partículas y favoreciendo la obtención de materiales homogéneos. Este control resulta esencial porque el tamaño y la forma de las nanopartículas influyen directamente en la capacidad de captar y transportar energía dentro de una celda solar (Garnweitner et al., 2008). Otro aspecto especialmente interesante es su contribución a la formación de nanoestructuras porosas. Durante el proceso, la parte orgánica de la pectina se elimina gradualmente, dejando pequeños espacios vacíos o poros dentro de la estructura del TiO_2 (Figura 3) (Flores et al., 2024). Estos poros incrementan la superficie disponible para capturar moléculas fotosensibles y facilitar el transporte de electrones, dos características fundamentales para mejorar el desempeño de las celdas fotosensibles. En los materiales destinados a aplicaciones fotovoltaicas, una mayor área superficial se traduce en una mejor interacción con la luz solar (Zukalova et al., 2005).

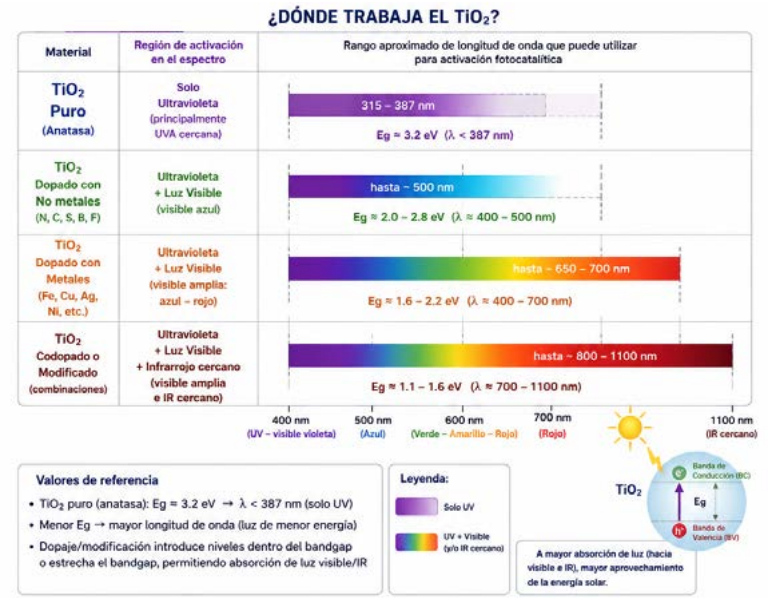
Figura 3. *Imagen de alta resolución con Microscopio Electrónico de Barrido que muestra nanoesferas de TiO_2 reducidas en pectina.*



Además de participar en la síntesis del semiconductor, la pectina fue estudiada como alternativa a aglutinantes convencionales utilizados en la formulación de pastas de TiO_2. Debido a sus propiedades gelificantes y adhesivas, puede contribuir a la formación de recubrimientos uniformes sobre los sustratos conductores empleados en los fotoelectrodos (Figura 4). Esto abre la posibilidad de sustituir algunos materiales sintéticos por compuestos biodegradables y renovables, alineándose con los principios

de la química verde y la fabricación sostenible (Ito et al., 2007; Thakur et al., 1997).

Figura 4. *Esquema donde se observa como cambios en la obtención de TiO_2 indican cambios energéticos en su región de trabajo en el espectro electromagnético*



De materiales simples a nanoestructuras avanzadas

El desarrollo de las celdas fotosensibles ha estado acompañado por una transformación constante en los materiales utilizados para captar y convertir la energía solar. En un inicio, los dispositivos fotovoltaicos empleaban materiales relativamente simples; sin embargo, con el avance de la nanotecnología fue posible controlar el tamaño, la forma y la organización de las partículas a escalas muy pequeñas, abriendo nuevas posibilidades para mejorar su desempeño (Jun et al., 2013; García-Gutiérrez, 2010).

Uno de los avances más importantes fue la incorporación de estructuras mesoporosas, materiales que contienen millones de pequeños poros distribuidos en su interior. Aunque estos poros son invisibles a simple vista, funcionan de manera similar a una esponja: proporcionan una

superficie mucho mayor para que la luz interactúe con el material fotosensible. Gracias a ello, se puede captar más energía solar y facilitar el movimiento de los electrones dentro de la celda. Diversos estudios han mostrado que estas estructuras porosas contribuyen a mejorar la eficiencia de conversión energética al aprovechar mejor la luz disponible (Zukalova et al., 2005; Hočevar et al., 2008).

En los últimos años, la forma en que se utiliza el TiO2 en las celdas solares ha cambiado significativamente. Antes se trabajaba principalmente con materiales porosos relativamente sencillos; sin embargo, actualmente se diseñan estructuras más complejas y organizadas en varios niveles, conocidas como nanoarquitecturas jerárquicas (Qaid et al., 2023). Estas estructuras combinan diferentes tamaños y formas de partículas para crear rutas más eficientes para el transporte de la electricidad. De esta manera, la energía generada por la luz solar puede desplazarse con menos pérdidas dentro del dispositivo, mejorando su rendimiento (Aboulouard et al., 2020; Zukalova et al., 2005). Paralelamente, ha surgido una nueva generación de materiales híbridos, obtenidos mediante la combinación de diferentes materiales con propiedades complementarias. En lugar de depender de un único componente, los investigadores integran semiconductores, puntos cuánticos, materiales orgánicos y biopolímeros para aprovechar las ventajas de cada uno (Qaid et al., 2023). Estas combinaciones permiten captar una mayor cantidad de luz y optimizar el transporte de carga dentro de la celda (Qian et al., 2001; Vogel y Weller, 1994).

Puntos cuánticos y nuevas generaciones de celdas fotosensibles

¿Qué son los puntos cuánticos?

Los puntos cuánticos son materiales extraordinariamente pequeños (a nivel nano) que han revolucionado la investigación en energía solar (Vogel y Weller, 1994; Jun et al., 2013). Una forma sencilla de entenderlos es imaginar que cada punto cuántico funciona como una pequeña antena capaz de captar la luz del sol. Cuando la luz llega a estas nanopartículas, parte de su energía es absorbida y posteriormente transformada en

movimiento de electrones, el primer paso para producir electricidad. Por esta razón, los puntos cuánticos se utilizan como materiales fotosensibles dentro de algunas de las tecnologías solares más recientes (Qian et al., 2001; Jun et al., 2013).

Lo que hace especiales a los puntos cuánticos es que sus propiedades cambian dependiendo de su tamaño. Aunque todos estén fabricados con el mismo material, una partícula más pequeña puede comportarse de manera diferente a una más grande. Esto permite a los investigadores diseñar materiales capaces de captar distintas regiones de la luz solar y aprovechar una mayor cantidad de energía disponible. En otras palabras, el tamaño de estas nanopartículas puede ajustarse para optimizar su capacidad de absorber luz (Vogel y Weller, 1994).

Por otra parte, los puntos cuánticos pueden captar luz en una amplia región del espectro solar, incluso más que algunos materiales utilizados tradicionalmente en las celdas solares. Gracias a ello, tienen el potencial de incrementar la cantidad de energía que puede transformarse en electricidad. Materiales como el sulfuro de cadmio (CdS), el seleniuro de cadmio (CdSe) o el sulfuro de zinc (ZnS) han sido ampliamente estudiados como puntos cuánticos por su capacidad para mejorar la captación de luz en dispositivos fotovoltaicos (Qian et al., 2001; Jun et al., 2013).

Ventajas de los puntos cuánticos frente a tecnologías anteriores

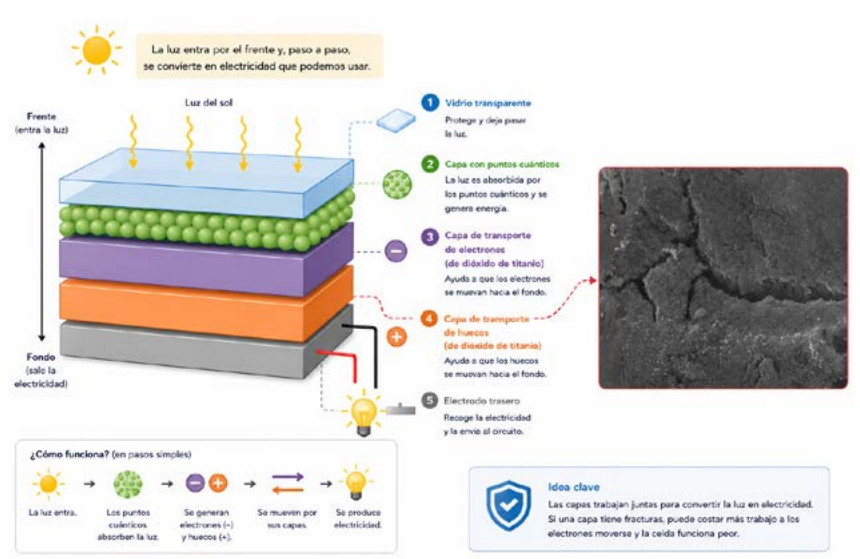
Los puntos cuánticos no solo absorben más luz, sino que también facilitan el movimiento de los electrones generados durante la conversión de energía solar, reduciendo pérdidas energéticas dentro de la celda (Qian et al., 2001; Jun et al., 2013). Diversas investigaciones han mostrado que este comportamiento favorece el aprovechamiento de la energía capturada e incrementa el rendimiento de las celdas solares sensibilizadas con puntos cuánticos (QDSSC). Por ello, estas tecnologías son consideradas una evolución importante respecto a generaciones anteriores de celdas fotosensibles.

En términos simples, los puntos cuánticos representan una nueva generación de materiales capaces de capturar mejor la luz solar gracias a

su tamaño nanométrico y a sus propiedades únicas. Su estudio continúa creciendo porque ofrecen la posibilidad de fabricar celdas solares más eficientes, accesibles y adaptables a diferentes aplicaciones. Actualmente, las investigaciones se enfocan no solamente en desarrollar nuevos puntos cuánticos, sino también en perfeccionar la forma en que estos materiales se incorporan dentro de las celdas solares. Es decir, se busca producirlos de manera más eficiente y colocarlos estratégicamente para minimizar pérdidas de energía y maximizar su desempeño (Devasvaran & Lim, 2021; Qaid et al., 2023; Jun et al., 2013).

Además, los avances recientes muestran que el rendimiento de una celda solar depende tanto de los materiales empleados como de la manera en que estos se organizan dentro del dispositivo. La combinación de puntos cuánticos con nanoestructuras avanzadas o jerarquizadas y materiales semiconductores ha permitido desarrollar sistemas cada vez más eficientes para captar la energía solar y transformarla en electricidad (Jakalase et al., 2026). De esta manera, las celdas fotosensibles (Figura 5) continúan evolucionando hacia tecnologías más sostenibles y competitivas, capaces de desempeñar un papel importante en el futuro de las energías renovables.

Figura 5. *Esquema simplificado de una celda fotosensible, así como de la fractura de un depósito de pasta de TiO_2.*



¿Cuánto cuesta fabricar una celda fotosensible?

La fabricación de celdas fotosensibles en laboratorio, que es el nivel de desarrollo actual de esta tecnología, implica costos asociados tanto al equipamiento como a los materiales utilizados. Dentro de los costos de laboratorio, destacan equipos especializados como hornos de sinterización, sistemas de spray pirólisis, simuladores solares, centrífugas y equipos de caracterización, los cuales representan una inversión considerable para la investigación y desarrollo de nuevos materiales fotovoltaicos. Por otra parte, los costos de reactivos incrementan significativamente el costo total del dispositivo cuando se trabaja a escala laboratorio (Tabla 1). Aunque materiales como el TiO_2 son relativamente económicos y abundantes, algunos componentes empleados para la sensibilización, así como los procesos de síntesis y deposición, continúan elevando el costo de fabricación (O'Regan y Grätzel, 1991; Ito et al., 2007; Jun et al., 2013; Dyesol, 2013).

Tabla 1. *Estimación de costos para una celda pequeña de QDSSC (~25 cm²) evaluado con reactivos típicos*

Tipo de celda	Costo ($)
TiO_2	~$50-80 por celda equiv. en laboratorio
Pectina	~$10
Vidrio FTO	~$150 por sustrato pequeño
Electrolito (I^-/I_3^- o polisulfuro)	~$50
QDs (CdS/ZnS)	~$100
Terpineol / solventes	~$40

Fuente: (Precios al mercado, tomados de la web 2026)

Análisis de costos de los principales componentes

Uno de los principales atractivos de las celdas fotosensibles es la posibilidad de reducir costos de fabricación. Sin embargo, el costo final de estos dispositivos depende en gran medida de los materiales utilizados en cada uno de sus componentes.

El TiO_2 es uno de los materiales más económicos dentro de una celda fotosensible. Su amplia disponibilidad natural y su producción industrial a gran escala han permitido que tenga un costo relativamente bajo en comparación con otros semiconductores utilizados en aplicaciones fotovoltaicas. Además, presenta ventajas importantes como estabilidad química, baja toxicidad y facilidad de síntesis. Por esta razón, el TiO_2 es considerado uno de los elementos que contribuyen a mantener bajo el costo potencial de las DSSC y QDSSC (O'Regan y Grätzel, 1991; Chen y Mao, 2007). No obstante, cuando se requiere producir TiO_2 nanoestructurado con características específicas, los costos aumentan debido a los procesos de síntesis, purificación y caracterización necesarios para obtener materiales con elevada área superficial y propiedades controladas (Ito et al., 2008).

Los sustratos de vidrio conductor recubiertos con óxido de estaño dopado con flúor (FTO, Fluorine Doped Tin Oxide) representan uno de los componentes más costosos dentro de la estructura básica de una celda fotosensible. Aunque el vidrio es un material relativamente económico,

el recubrimiento conductor requiere procesos industriales especializados para mantener una adecuada transmisión de luz y conductividad eléctrica. Diversos estudios señalan que el FTO puede representar una proporción importante del costo total del dispositivo, especialmente cuando se trabaja a escala de laboratorio (Grätzel, 2003; Gong et al., 2012).

El electrolito es responsable de transportar las cargas dentro de la celda y regenerar el material fotosensible después de la absorción de luz. En las DSSC tradicionales, los sistemas más utilizados se basan en pares redox yoduro/triyoduro disueltos en solventes orgánicos. Aunque la cantidad utilizada es pequeña, algunos componentes del electrolito pueden incrementar los costos debido a su pureza química y a los requerimientos de estabilidad necesarios para aplicaciones fotovoltaicas. Además, el electrolito continúa siendo una de las principales limitaciones tecnológicas porque puede degradarse con el tiempo, reduciendo la vida útil del dispositivo y aumentando los costos de mantenimiento o reemplazo (Grätzel, 2003; Bella et al., 2015).

Los puntos cuánticos representan actualmente uno de los componentes más costosos dentro de las celdas QDSSC. Aunque se utilizan en cantidades muy pequeñas, su síntesis requiere un control preciso del tamaño y de las condiciones de crecimiento para obtener propiedades ópticas adecuadas. Además, algunos materiales utilizados para fabricarlos, como compuestos de cadmio o selenio, pueden incrementar el costo de producción y generar preocupaciones ambientales (Jun et al., 2013; Vogel y Weller, 1994). Sin embargo, los puntos cuánticos ofrecen ventajas importantes, como una mayor absorción de luz solar y la posibilidad de ajustar sus propiedades mediante el control de su tamaño. Estas características justifican el interés por seguir investigando métodos de síntesis más económicos y sostenibles que permitan reducir sus costos de fabricación (Qian et al., 2001; Devasvaran y Lim, 2021).

Actualmente, uno de los principales retos para la comercialización masiva de estas tecnologías consiste en reducir el costo de estos componentes sin afectar el desempeño energético. Por lo que, nuevos métodos de fabricación continúan siendo una de las estrategias más prometedoras para hacer competitivas a las celdas fotosensibles frente a las tecnologías fotovoltaicas convencionales.

Comparación económica con el silicio cristalino

Actualmente, las celdas de silicio cristalino siguen siendo la tecnología solar más utilizada debido a su alta eficiencia y producción industrial consolidada. Sin embargo, su fabricación requiere materiales de alta pureza y procesos complejos que incrementan los costos de producción (Maggi, 2014; Zumeta, 2004). En cuanto al costo por watt y por metro cuadrado, el silicio sigue siendo actualmente más competitivo gracias a la madurez de su industria. Sin embargo, las celdas fotosensibles podrían disminuir significativamente sus costos debido al uso de materiales de bajo precio y técnicas de fabricación menos exigentes (Gong et al., 2012).

Diversos estudios tecnoeconómicos han reportado que las QDSSC pueden alcanzar costos aproximados de 0.18 USD/W bajo condiciones industriales, lo cual sugiere su potencial competitividad en aplicaciones específicas (Syed et al., 2022). Sin embargo, en la práctica de laboratorio, los costos reales se incrementan considerablemente debido al uso de reactivos especializados en pequeñas cantidades, como nanopartículas de TiO2, sustratos conductores de óxido de estaño dopado con flúor (FTO), electrolitos y compuestos para la sensibilización, cuyos costos unitarios son elevados (Tabla 1). Por ejemplo, el TiO2 en forma nanoparticulada puede adquirir precios comerciales en el orden de varios dólares por gramo (Ossila, 2024), mientras que los sustratos FTO alcanzan costos entre 1 y 10 USD por unidad dependiendo de sus dimensiones (Alibaba, 2024). En contraste, la tecnología de silicio cristalino, que domina actualmente el mercado fotovoltaico, presenta costos significativamente menores a nivel industrial que oscilan entre 0.08 y 0.28 USD/W, gracias a la optimización de procesos de fabricación y escalamiento (Tabla 2) (SolarTech, 2025).

Tabla 2. *Comparativa económica de la tecnología QDSSC vs silicio mono cristalino*

Concepto	**QDSSC (laboratorio)**	**QDSSC (industrial)**	**Silicio cristalino**
Costo ($) / m²	$16 000 - $20 000	$2 000 - $4 000 MXN	$1 500 - $3 000
$ / Watt (W)	$300 - $850 MXN/W	$3 - $6 MXN/W	$1.5 - $5 MXN/W
Principales costos	FTO, TiO_2 nano, QDs, electrolito	Materiales optimizados	Silicio + manufactura
Eficiencia típica	1-3 %	5-12 %	18-24 %
Complejidad	Baja	Baja-media	Alta
Escalabilidad	Baja (actual)	Media (en desarrollo)	Muy alta

Fuente: (Elaborado por los autores)

Respecto a la escalabilidad, el silicio posee una clara ventaja porque cuenta con cadenas de producción consolidadas a nivel mundial. No obstante, las DSSC y QDSSC ofrecen posibilidades atractivas para la fabricación de dispositivos flexibles, semitransparentes e integrados en ventanas o materiales de construcción, aplicaciones difíciles de lograr con los paneles tradicionales (Dyesol, 2013; Jun et al., 2013). Finalmente, en términos de eficiencia, los módulos comerciales de silicio suelen superar el 20 %, mientras que las celdas fotosensibles aún presentan rendimientos menores. A pesar de ello, tecnologías basadas en puntos cuánticos continúan mejorando y podrían convertirse en una alternativa complementaria para aplicaciones donde el bajo costo, la flexibilidad o la integración arquitectónica sean más importantes que alcanzar la máxima eficiencia (Qian et al., 2001; Jun et al., 2013). En conclusión, el silicio cristalino domina actualmente el mercado por su eficiencia y madurez tecnológica, mientras que las celdas fotosensibles destacan por su potencial de bajo costo, simplicidad de fabricación y versatilidad, características que las posicionan como una tecnología prometedora para el futuro de la energía solar.

Perspectivas económicas futuras

Si bien las celdas fotosensibles no son competitivas en su estado actual de desarrollo, las QDSSC presentan ventajas en términos de simplicidad, sostenibilidad y potencial de bajo costo en producción masiva. El estado actual de desarrollo de la tecnología y la tendencia de modificación de los materiales nos indica que serán cada vez más eficientes, ya que han reportado eficiencias del 15 % en condiciones de laboratorio (Jakalase et al., 2026). No obstante, no olvidemos que las distintas perspectivas, como el uso de biopolímeros y como la pectina, abren nuevas innovaciones hacia el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos más sostenibles y potencialmente más accesibles en el futuro, con la automatización y manufactura industrial. Finalmente, aunque a la fecha son menos competitivas económicamente que las celdas de silicio comerciales, es lógico inferir que el costo de esta tecnología será menor con el tiempo, lo que resultará en que tenga un crecimiento y popularidad similar al experimentado por el silicio en sus inicios.

Principales desafíos científicos de las celdas fotosensibles

Las celdas fotosensibles han demostrado un gran potencial para complementar las tecnologías solares convencionales; sin embargo, antes de que estas tecnologías puedan alcanzar una adopción comercial masiva, todavía deben superar varios desafíos. Uno de los retos más importantes es mantener estable el funcionamiento de la celda durante largos periodos de tiempo. Las celdas fotosensibles están compuestas por varios materiales que deben trabajar en conjunto para transformar la luz solar en electricidad. Sin embargo, factores como la humedad, las variaciones de temperatura y la exposición continua a la radiación solar pueden alterar algunas de sus propiedades y reducir su desempeño (Grätzel, 2003; Jun et al., 2013).

La degradación de los materiales es otro desafío importante. Algunos componentes, como los colorantes, electrolitos o sensibilizadores, pueden perder eficiencia después de largos periodos de exposición a la

luz solar. Esta disminución en el desempeño afecta directamente la cantidad de electricidad que la celda es capaz de generar. De acuerdo con la literatura, una de las razones por las que las primeras generaciones de celdas fotosensibles no lograron una aplicación comercial inmediata fue precisamente la degradación de los materiales fotosensibles y de las interfaces donde ocurre la transferencia de electrones (O'Regan y Grätzel, 1991; Zumeta, 2004).

Por otra parte, algunos materiales utilizados actualmente presentan posibles riesgos ambientales. Tal es el caso de ciertos puntos cuánticos fabricados de compuestos que contienen cadmio o selenio. Aunque estos materiales ofrecen excelentes propiedades para captar luz solar, existe preocupación por su manejo, reciclaje y posible liberación al ambiente cuando los dispositivos alcanzan el final de su vida útil. Como resultado, una parte importante de las investigaciones recientes busca desarrollar alternativas menos tóxicas que mantengan un desempeño similar sin comprometer la seguridad ambiental (Vogel y Weller, 1994; Jun et al., 2013).

Finalmente, la durabilidad continúa siendo uno de los principales indicadores para evaluar la viabilidad comercial de una celda solar. Las tecnologías basadas en silicio pueden operar durante más de 20 años con pérdidas relativamente pequeñas de eficiencia. En contraste, muchas celdas fotosensibles aún presentan limitaciones para mantener su rendimiento durante periodos tan prolongados. Por ello, se trabaja en mejorar la resistencia de los materiales, optimizar los sistemas de encapsulado y desarrollar estructuras más robustas capaces de soportar condiciones reales de operación durante muchos años (Grätzel, 2003; Gong et al., 2012). En conjunto, estos desafíos muestran que el desarrollo de una celda fotosensible eficiente no depende únicamente de captar más luz solar. También es necesario garantizar que los materiales sean estables, seguros y duraderos. Resolver estos retos permitirá que las tecnologías fotosensibles evolucionen hacia aplicaciones comerciales a gran escala, contribuyendo al desarrollo de sistemas de energía solar más accesibles y sostenibles en el futuro.

Conclusiones

Las celdas fotosensibles representan una tecnología con gran potencial para complementar a las tecnologías solares actuales gracias al uso de materiales abundantes, procesos de fabricación más sencillos y diseños cada vez más eficientes. En los próximos años, se podrían encontrar aplicadas a las viviendas, mediante ventanas o superficies capaces de generar electricidad; en la agricultura, a través de invernaderos fotovoltaicos; en dispositivos portátiles, gracias a su ligereza y flexibilidad; y en edificios inteligentes, donde podrían integrarse en fachadas o materiales de construcción con capacidad de captar energía solar. Para competir de manera directa con las celdas basadas en silicio, las cuales actualmente dominan el mercado debido a su mayor eficiencia y durabilidad, es necesario mejorar aspectos como la estabilidad de los materiales, aumentar la eficiencia de conversión energética, prolongar su vida útil y desarrollar procesos de fabricación escalables que permitan su producción masiva. Sin embargo, los avances recientes en nanoestructuras, puntos cuánticos y síntesis verde muestran que estas tecnologías continúan evolucionando rápidamente y podrían desempeñar un papel importante dentro de la transición hacia sistemas energéticos más limpios, accesibles y sostenibles en las próximas décadas.

Referencias

Aboulouard, A., Gultekin, B., Can, M., Erol, M., Jouaiti, A., Elhadadi, B., Zafer, C. & Demic, S. (2020). Comparative study of TiO2 nanoparticles for DSSC performance. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(2), 1569–1577. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.083

Alibaba. (2024). FTO glass substrate catalog. https://www.alibaba.com/showroom/fto-glass-substrate.html

Bella, F., Gerbaldi, C., Barolo, C. & Grätzel, M. (2015). Aqueous dye-sensitized solar cells. *Chemical Society Reviews*, *44*(11), 3431–3473. https://doi.org/10.1039/C4CS00456F

Carp, O., Huisman, C. L. & Reller, A. (2004). Photoinduced reactivity of titanium dioxide. *Progress in Solid State Chemistry*, *32*(1–2), 33–177. https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2004.08.001

Chen, X. & Mao, S. S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications and applications. *Chemical Reviews*, *107*(7), 2891–2959. https://doi.org/10.1021/cr0500535

Devasvaran, K. & Lim, V. (2021). Green synthesis of metallic nanoparticles using pectin as a reducing agent: A systematic review of the biological activities. *Pharmaceutical Biology*, *59*(1), 494–503. https://doi.org/10.1080/13880209.2021.1910716

Dyesol. (2013). *Technical datasheets for TiO2 pastes and DSSC materials*. Dyesol Ltd.

Flores-Gómez, J., Mota-Macías, S., Guerrero-Jiménez, J. P., Romero-Arellano, V. H. & Morales-Rivera, J. (2024). Sol–gel synthesis of TiO2 with pectin and their efficiency in solar cells sensitized by quantum dots. *Gels*, *10*(7), 470. https://doi.org/10.3390/gels10070470

Fujishima, A. & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*, *238*(5358), 37–38. https://doi.org/10.1038/238037a0

García-Gutiérrez, I. G. (2010). Aplicaciones de la nanotecnología en fuentes alternas de energía. *Ingenierías*, *13*(49), 53–62.

Garnweitner, G. & Niederberger, M. (2008). Organic chemistry in inorganic nanomaterials synthesis. *Journal of Materials Chemistry*, *18*(11), 1171–1182. https://doi.org/10.1039/b713775c

Gong, J., Liang, J. & Sumathy, K. (2012). Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Fundamental concepts and novel materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(8), 5848–5860. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.044

Grätzel, M. (2003). Dye-sensitized solar cells. Journal of Photochemistry and Photobiology C: *Photochemistry Reviews*, *4*(2), 145–153. https://doi.org/10.1016/S1389-5567(03)00026-1

Hočevar, M., Opara Krašovec, U. & Berginc, M. (2008). Development of TiO2 pastes modified with Pechini sol–gel method for high efficiency dye-sensitized solar cell. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, *48*, 156–162. https://doi.org/10.1007/s10971-008-1763-7

Ito, S., Chen, P., Comte, P., Mohammad, K. N., Liska, P., Péchy, P. & Grätzel, M. (2007). Fabrication of TiO2 screen-printing pastes for DSSC. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *15*(7), 603–612. https://doi.org/10.1002/pip.768

Jakalase, S., Meyer, E. L., Agoro, M. A., Rono, N. & Nqombolo, A. (2026). A review on quantum dot-sensitized solar cells (QDSSCs): Recent progress and future perspectives. En D. G. Popescu (Ed.), A*dvanced optoelectronics and photonic technologies: Fundamentals, devices and renewable energy applications*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1013404

Jun, H. K., Careem, M. A. & Arof, A. K. (2013). Quantum dot-sensitized solar cells review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22*, 148–167. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.030

Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A. & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82*, 894–900. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094

Li, W., Wang, Y., Lin, H., Shah, S. I., Huang, C. P., Doren, D. J., Rykov, S. A., Chen, J. G. & Barteau, M. A. (2003). Band gap tailoring of N-doped TiO2 nanoparticles. *Applied Physics Letters, 83*(20), 4143–4145. https://doi.org/10.1063/1.1627962

Maggi, S. (2014). *Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile].

Miu, B. A., Stan, M. S., Mernea, M., Dinischiotu, A. & Voinea, I. C. (2024). Green synthesis of TiO2 nanoparticles using plant-derived compounds. *Materials, 17*(2), 275. https://doi.org/10.3390/ma17020275

O'Regan, B. & Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO2 films. *Nature, 353*(6346), 737–740. https://doi.org/10.1038/353737a0

Opara, K. U., Berginc, M., Hočevar, M. & Topič, M. (2009). TiO2 paste design for high-efficiency DSSC. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 93*(3), 379–381. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.11.012

Ossila. (2024). *Titanium dioxide nanoparticles product page*. https://www.ossila.com/products/titanium-dioxide-nanoparticles

Qaid, S. M. H., Ghaithan, H. M., Bawazir, H. S., Ajaj, A. F. B., AlHarbi, K. K. & Aldwayyan, A. S. (2023). Growth of TiO2 nanocrystals for solar cells applications. *Nanomaterials, 13*(5), 928. https://doi.org/10.3390/nano13050928

Qian, X., Qin, D., Bai, Y., Li, T., Tang, X., Wang, E. & Dong, S. (2001). Photosensitization of TiO2 nanoparticulate thin film electrodes by CdS nanoparticles. *Journal of Solid State Electrochemistry*, *5*(7–8), 562–567. https://doi.org/10.1007/s100080000179

Rao, K. G., Ashok, C. H., Rao, K. V., Chakra, C. S. & Rajendar, V. (2015). Synthesis of TiO2 nanoparticles from orange fruit waste. *Synthesis*, *2*(1), 1.

Shah, M., Fawcett, D., Sharma, S., Tripathy, S. K. & Poinern, G. E. J. (2015). Green synthesis of metallic nanoparticles via biological entities. *Materials*, *8*(11), 7278–7308. https://doi.org/10.3390/ma8115377

SolarTech Online. (2025). Solar module prices guide 2025. https://solartechonline.com/blog/solar-module-prices-guide-2025/

Syed, T. H. & Wei, W. (2022). Technoeconomic analysis of dye sensitized solar cells (DSSCs) with WS2/carbon composite as counter electrode material. *Inorganics*, *10*(11), 191. https://doi.org/10.3390/inorganics10110191

Thakur, B. R., Singh, R. K. & Handa, A. K. (1997). Chemistry and uses of pectin: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *37*(1), 47–73. https://doi.org/10.1080/10408399709527767

Vogel, R. H. & Weller, H. (1994). Quantum-sized PbS, CdS, Ag2S, Sb2S3, and Bi2S3 particles as sensitizers for various nanoporous wide-bandgap semiconductors. *The Journal of Physical Chemistry*, *98*(12), 3183–3188. https://doi.org/10.1021/j100063a022

Zukalova, M., Zukal, A., Kavan, L., Nazeeruddin, M. K., Liska, P. & Grätzel, M. (2005). Mesoporous TiO2 films for high-performance DSSC. *Nano Letters*, *5*(9), 1789–1792. https://doi.org/10.1021/nl051401l

Zumeta, I. (2004). *Estudio de capas nanoestructuradas de TiO2 para celdas fotoelectroquímicas* [Tesis de doctorado, Universidad de La Habana].

Capítulo **10**

Catalizadores avanzados para la producción más eficiente de biodiésel

José Juan Ávila Guerrero[1]
José Benito Pelayo Vázquez[2]
Fernando Enrique Espínola Portilla[3]
Edgar David Moreno Medrano[2]
Carolina Livier Recio Colmenares[1]
María Guadalupe Pérez García[3]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008073

[1] Departemanto de Estudios del Agua y la Energía. Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara.
[2] Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingenierias, Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara
[3] Instituto Transdisciplinar de Investigación y Servicios – ITRANS. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad de Guadalajara.

Resumen

El uso intensivo de combustibles fósiles sigue incrementando constantemente; si bien han sido la base del desarrollo desde la Revolución Industrial, sus consecuencias han llevado al planeta a un grave problema ambiental. El carbón, petróleo y gas natural han impulsado el desarrollo de la industria, comunicaciones y transporte, pero al mismo tiempo su explotación a gran escala ha traído consecuencias graves como: emisión de gases de efecto invernadero, contaminación del agua, aire y suelos, con consecuencias en la salud humana, la flora y la fauna. Asimismo, el carácter no renovable de estos combustibles y la dependencia mundial hacia ellos plantea un riesgo para la sostenibilidad energética.

Ante este panorama, se buscan alternativas más limpias y sostenibles para la sustitución de los combustibles fósiles, entre las que podemos destacar el biodiésel. Este biocombustible se obtiene mediante la transformación de grasas vegetales y animales y presenta ventajas como menor emisión de contaminantes, biodegradabilidad y la posibilidad de producirse a partir de residuos de aceites de cocina usados, fomentando con ello la economía circular. Sin embargo, la producción y eficiencia del proceso de este biocombustible depende en gran medida del catalizador empleado.

En este trabajo se presenta una estrategia innovadora para el uso de catalizadores inmovilizados en soportes sólidos a partir de polímeros porosos de tipo PoliHIPE (polímeros altamente porosos obtenidos a partir de emulsiones de alta fase interna). Estos materiales ofrecen alta estabilidad, resistencia, porosidad, y gran área superficial lo que facilita la incorporación del catalizador en su superficie, resultando con ello en una gran área superficial del catalizador en el material poroso. Esto posibilita un proceso eficiente de transesterificación del aceite al biodiésel con altos rendimientos, y la posibilidad de realizar varios ciclos del catalizador en el proceso. Otra ventaja del uso de estos materiales

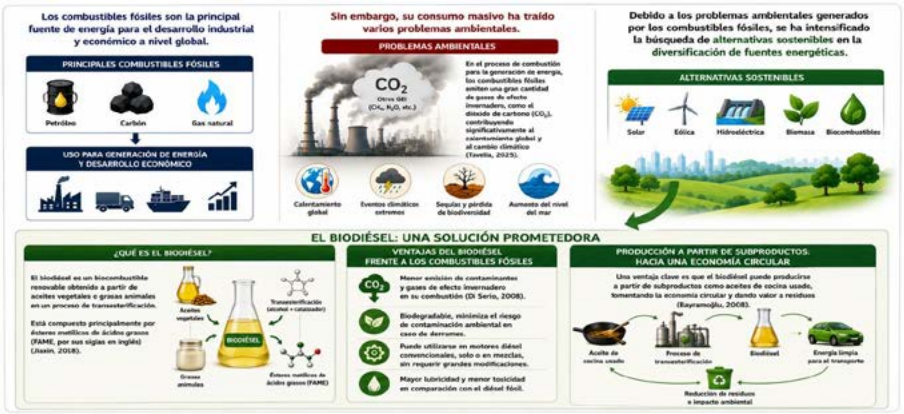
avanzados en la generación de biocombustibles es la posibilidad de reutilizarlos varias veces en estos ciclos de catálisis sin que el material pierda sus propiedades.

Introducción

El uso de combustibles fósiles es la principal fuente de energía para el desarrollo industrial y económico a nivel global, sin embargo, su consumo masivo ha traído varios problemas ambientales. Esto es debido a que, en el proceso de combustión para la generación de energía, los combustibles fósiles emiten una gran cantidad de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2), contribuyendo significativamente al calentamiento global y al cambio climático (Tavella, 2025). Debido a los problemas ambientales generados por los combustibles fósiles, se ha intensificado la búsqueda de alternativas sostenibles en la diversificación de fuentes energéticas.

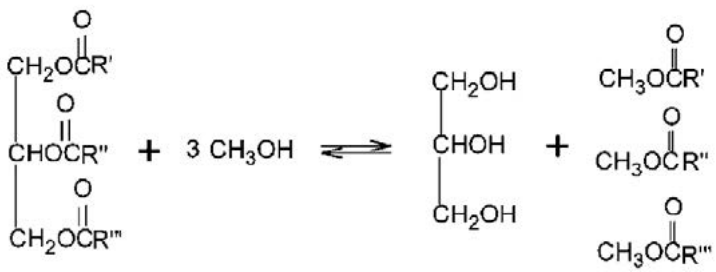
En este contexto, el biodiésel surge como una solución prometedora. Es un biocombustible renovable obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales en un proceso de transesterificación. Está compuesto principalmente por ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés) (Jiaxin, 2018). Este ofrece múltiples ventajas frente a los combustibles fósiles; su combustión produce menos emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero (Di Serio, 2008); además, es un producto biodegradable, lo que minimiza el riesgo de contaminación ambiental en caso de derrames. Una de las ventajas en la producción de biodiésel es que se puede producir a partir de subproductos como aceites de cocina usados, fomentando la economía circular y surgiendo como una alternativa para dar valor a residuos (Bayramoğlu, 2008). La Figura 1 presenta un panorama general de los impactos ambientales asociados al uso de combustibles fósiles, destacando la necesidad de transitar hacia fuentes de energía más sostenibles. Asimismo, ilustra las principales ventajas de los biocombustibles, particularmente del biodiésel, como una alternativa renovable capaz de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, valorizar residuos y contribuir al desarrollo de sistemas energéticos más sostenibles y compatibles con los principios de la economía circular.

Figura 1. *Panorama general de la relación entre el uso de combustibles fósiles, sus impactos ambientales y el biodiésel como alternativa energética sostenible.*



La transesterificación para la producción de biodiésel implica la reacción de los triglicéridos de los aceites o grasas con un alcohol, generalmente metanol, en presencia de un catalizador (figura 2).

Figura 2. *Esquema de la reacción de transesterificación (Di Serio, 2008).*



Existen tres tipos principales de catalizadores utilizados en las reacciones de transesterificación: los químicos, los heterogéneos y los enzimáticos (Castellar, 2014). Los catalizadores químicos básicos (NaOH y KOH), así como los ácidos (H_2SO_4 y HCl), son los más utilizados; sin embargo, generan algunas desventajas importantes. Por ejemplo, si el contenido de triglicéridos a utilizar presenta ácidos grasos libres, estos reaccionan con los catalizadores básicos formando jabones, reduciendo el rendimiento

de biodiésel y dificultando la separación de los productos. Además, el catalizador químico es difícil de recuperar, lo cual genera residuos líquidos ricos en sales como sulfatos o cloruros que son altamente corrosivos y, si no se disponen adecuadamente, son potencialmente nocivos para el medio ambiente (Di Serio, 2008).

Los catalizadores heterogéneos (CaO, MgO y TiO_2) son sólidos que facilitan la transesterificación en su superficie sin disolverse en el medio, lo que los hace reutilizables y más sostenibles en comparación con los catalizadores químicos (Machorro, 2015). El CaO, aunque con alta actividad catalítica, es sensible al agua y al CO_2, lo que requiere almacenamiento cuidadoso (Machorro, 2015). El MgO destaca por su estabilidad química y resistencia a la lixiviación, aunque su actividad catalítica es menor (Machorro, 2015). Por otro lado, el utilizar catalizadores en tamaño nanométrico mejora la eficiencia catalítica al aumentar la superficie activa, reducir la cantidad necesaria y permitir su funcionalización. Sin embargo, presentan desafíos como la dificultad en su recuperación, costos de síntesis más altos y riesgos ambientales y de salud.

Los catalizadores enzimáticos son biocatalizadores que facilitan la transesterificación mediante el uso de enzimas específicas. En la producción de biodiésel, las lipasas son las enzimas más empleadas (Sharma, 2022). Estas enzimas son altamente selectivas (minimiza la formación de subproductos no deseados), operan en condiciones suaves (temperaturas de 30-60 °C y pH cercano a la neutralidad) y no generan residuos químicos agresivos, lo que las convierte en una alternativa más ecológica en comparación con los catalizadores químicos.

Por otro lado, los catalizadores enzimáticos presentan algunas desventajas importantes, como su elevado costo, sensibilidad a condiciones extremas y una velocidad de reacción más lenta en comparación con los catalizadores químicos. Estas limitaciones han restringido el uso extendido de las enzimas como catalizadores, debido a su difícil reutilización y a los altos costos asociados, en contraste con los catalizadores químicos convencionales.

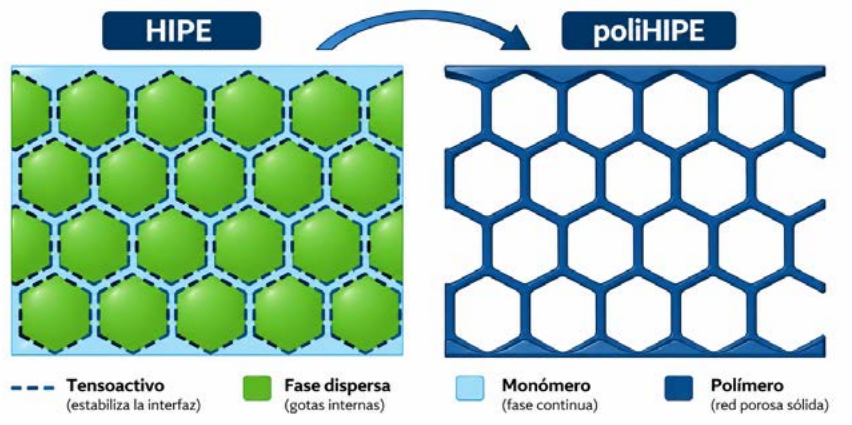
Como se describió previamente, uno de los principales desafíos asociados al uso de los tres tipos de catalizadores: químicos, heterogéneos y enzimáticos, es la dificultad para recuperarlos después del proceso

catalítico, lo cual limita su eficiencia en términos de la cantidad de biodiésel producido por cantidad de catalizador utilizado, además de los subproductos generados en el proceso que resultan difíciles de separar del biodiésel. Para abordar esta problemática, una estrategia eficaz consiste en la inmovilización de los catalizadores sobre soportes sólidos. Este proceso facilita su separación del medio de reacción, mejora su estabilidad química y permite su reutilización a lo largo de una mayor cantidad de ciclos catalíticos.

Entre los soportes más utilizados se encuentran los polímeros porosos (Chen, 2022), materiales de sílice (Melinte, 2019), resinas, carbones activados (Tan, 2024), entre otros. La estabilidad y eficiencia de los catalizadores heterogéneos, químicos y enzimáticos dependen en gran medida del soporte utilizado. En este contexto, los polímeros porosos han emergido como una opción ideal debido a sus numerosas ventajas, como su alta resistencia física, ligereza, porosidad interconectada, estabilidad y estructura reticulada.

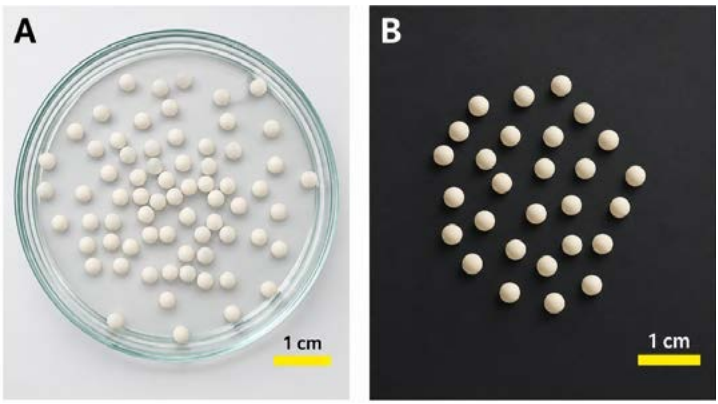
Para la síntesis de estos materiales, se emplean diversos métodos, destacando el uso de emulsiones altamente concentradas (HIPEs) como plantillas (Figura 3). Las HIPEs son emulsiones muy viscosas en las que las gotas de la fase interna constituyen más del 74 % del volumen total. Estas emulsiones pueden ser de dos tipos: agua en aceite (W/O) o aceite en agua (O/W) (Lei, 2016). Cuando la fase continua está compuesta por monómeros, la polimerización de esta fase solidifica el material, y al eliminar la fase interna, se generan estructuras porosas conocidas como poliHIPEs (Taylor-Pashow, 2019). Las poliHIPEs se sintetizan principalmente en forma de monolitos, ya que tienden a mantener la forma del recipiente donde ocurre la polimerización. Sin embargo, también es posible sintetizarlos en forma de perlas, lo que permite aumentar su área superficial (Figura 4).

Figura 3. *Representación esquemática de una emulsión altamente concentrada (HIPE) y de un poliHIPE después del proceso de polimerización y lavado.*



Las perlas de poliHIPEs se pueden sintetizar a partir de emulsiones dobles del tipo W/O/W (agua en aceite en agua) o O/W/O (aceite en agua en aceite), y se preparan mediante procedimientos bifásicos. Por otro lado, los disolventes eutécticos profundos (DES) han surgido como una alternativa no acuosa para la fase interna o continua de las HIPEs (Carranza, 2016). Recientemente, se han utilizado DES en la formulación de emulsiones dobles, ofreciendo un enfoque innovador, sencillo y ecológico para preparar perlas de poliHIPEs nanocompuestas con forma y estructura porosa controlada (Carolina, 2022).

Figura 4. *Fotografías de perlas poliHIPE a partir de emulsiones dobles después de la polimerización (imagen adaptada de Ortiz, 2025).*



La búsqueda de procesos más eficientes y sostenibles para la producción de biodiésel ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales catalíticos. Entre ellos, los materiales tipo poliHIPE han despertado un gran interés debido a su estructura ligera, altamente porosa y fácil de modificar. Diversos estudios han demostrado que estos materiales pueden emplearse con éxito en la producción de biodiésel. Por ejemplo, catalizadores sólidos con propiedades magnéticas y estructura macroporosa que facilita el acceso de los reactivos a los sitios activos. Para optimizar su desempeño, se pueden ajustar parámetros como la cantidad de nanopartículas magnéticas, la concentración de surfactante y la composición de los monómeros utilizados durante la síntesis, obteniendo materiales con una elevada porosidad y una red de poros interconectados. Posteriormente, la superficie de estos materiales se modifica mediante la incorporación de grupos ácidos sulfónicos, responsables de promover las reacciones químicas necesarias para transformar aceites y grasas en biodiésel. Los resultados son sobresalientes, alcanzando rendimientos de entre 92 y 98 % bajo condiciones de operación relativamente suaves. Además, los catalizadores pudieron reutilizarse en varios ciclos de reacción sin presentar una pérdida importante de actividad, lo que demuestra su potencial para aplicaciones industriales más sostenibles y económicamente viables.

A pesar de la buena respuesta catalítica que han demostrado la lipasa, el TiO_2 y el NaOH en la producción de biodiésel, persisten desafíos relacionados con la optimización del rendimiento y la prolongación de la vida útil de los catalizadores. En este contexto, una estrategia prometedora es el diseño de soportes de catalizadores que inmovilicen simultáneamente catalizadores nanométricos heterogéneos y catalizadores químicos (como el NaOH) o enzimáticos (como la lipasa). Por ejemplo, este enfoque podría permitir la combinación de las ventajas de los catalizadores heterogéneos y químicos, aprovechando la estabilidad y reusabilidad de materiales, junto con la alta actividad catalítica de los catalizadores químicos, con el objetivo de incrementar el rendimiento en la producción de biodiésel. Además, la integración de estos catalizadores en un soporte común, como polímeros porosos puede facilitar la recuperación y reutilización del sistema catalítico, maximizando su rendimiento y prolongando su tiempo de vida útil. Este enfoque representa una alternativa innovadora para optimizar los procesos de producción de biodiésel, abordando los retos actuales.

En este trabajo se presenta el uso de perlas porosas nanocompuestas a partir de emulsiones dobles, diseñadas para funcionar como sistemas catalíticos en la producción de biodiésel. Las perlas obtenidas presentan una estructura altamente porosa que permite la inmovilización efectiva de NaOH, integrando en un solo material las ventajas de la catálisis química en un soporte poroso. Estos catalizadores han sido empleados exitosamente en la reacción de transesterificación, mostrando un incremento significativo en el rendimiento de biodiésel en función de la cantidad de catalizador utilizado. La principal aportación de este trabajo radica en demostrar que la integración de catalizadores dentro de perlas porosas permite reducir de manera considerable la cantidad de NaOH requerida en comparación con la catálisis química convencional, lo que se traduce en un proceso más eficiente, menos contaminante y con menores costos operativos. Asimismo, la aplicación exitosa de estos catalizadores en la posible producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado refuerza su potencial como una estrategia sostenible orientada a la valorización de residuos y al fortalecimiento de la economía circular.

Catalizadores

El uso de catalizadores básicos tradicionales, como el hidróxido de sodio (NaOH), permite una gran eficiencia en el proceso de transformación de aceites vegetales y animales a biodiésel; sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, estos catalizadores son difíciles de separar una vez finalizado el proceso, generando con ello contaminación y la imposibilidad de reutilizarlos.

Para resolver esta problemática, se han desarrollado sistemas catalíticos, que integran, en un solo material, un soporte polimérico poroso con actividad catalítica y que al mismo tiempo mantiene la robustez y facilidad de separación de este material del biodiésel generado. Debido a que en el proceso de las reacciones de transesterificación se utilizan catalizadores y compuestos poliméricos como soportes, es importante describir con más detalle algunas de las características de estos materiales..

Un catalizador se puede definir como una sustancia que incrementa la velocidad de una reacción química al reducir la energía de activación sin consumirse ni alterarse permanentemente durante el proceso. Sus características principales son:

- No se consume: Aunque participa en la reacción, al final regresa a su estado original.
- Reduce la energía de activación: Permite que las moléculas reaccionen con mayor facilidad.
- Aumenta la velocidad de reacción: Hace que el proceso ocurra en menos tiempo.
- Selectividad: Puede favorecer la formación de ciertos productos sobre otros.
- Reutilizable: Puede emplearse en múltiples ciclos de reacción sin perder eficacia.

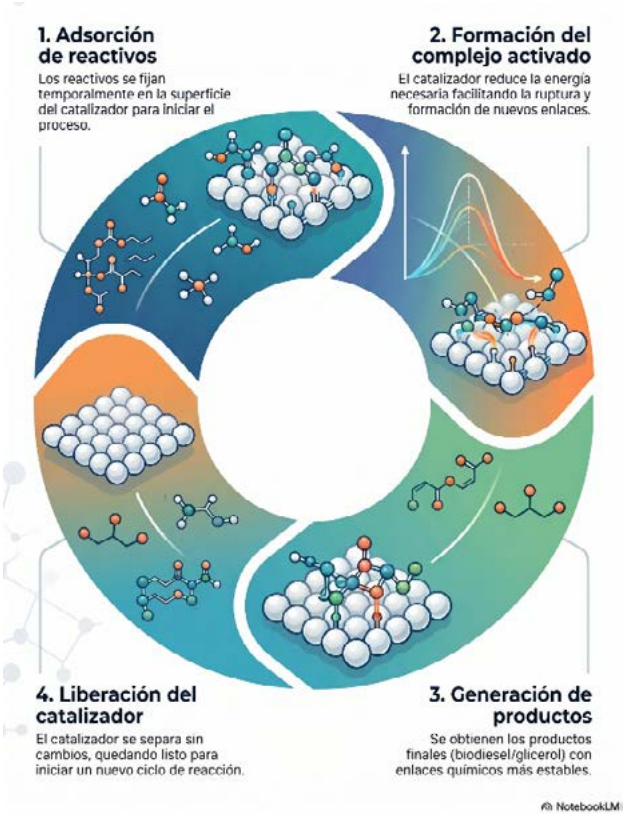
Asimismo, en el proceso químico, el catalizador interviene en una serie de pasos, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes (Figura 5):

- Adsorción de reactivos: Los reactivos se fijan temporalmente en la superficie del catalizador.
- Formación del complejo activado: El catalizador facilita la ruptura y formación de enlaces, reduciendo la energía necesaria.

- Generación de productos: Los productos se forman con enlaces más estables.
- Liberación del catalizador: El catalizador se separa sin cambios permanentes, listo para participar en otra reacción (Atkins, 2023).

En el caso de la producción de biodiésel, los catalizadores permiten reducir los tiempos de reacción y mejorar los rendimientos del proceso, por lo que su selección constituye un factor clave en el diseño de los sistemas de producción ya que sin ellos la reacción sería muy lenta y poco eficiente.

Figura 5. *Propuesta del proceso catalítico en una reacción de transesterificación de aceite a biodiésel. Figura generada por NotebookLM*



Dentro de los catalizadores químicos, los catalizadores alcalinos homogéneos han sido los más utilizados en la producción industrial de biodiésel. Entre los compuestos más comunes se encuentran el hidróxido de sodio (NaOH), el hidróxido de potasio (KOH), así como los metóxidos alcalinos (CH_3ONa y CH_3OK), debido a su elevada actividad catalítica y a las condiciones relativamente suaves bajo las cuales puede desarrollarse la reacción (Mandari, 2021). Estos catalizadores permiten alcanzar altas conversiones de triglicéridos en ésteres metílicos en tiempos relativamente cortos.

De acuerdo con diversos estudios, los catalizadores alcalinos son preferidos en la industria debido a que la reacción de transesterificación catalizada por bases presenta velocidades significativamente mayores que aquellas catalizadas por ácidos. En este sentido, se ha reportado que la reacción catalizada por bases puede ser hasta 4000 veces más rápida que la catalizada por ácidos (Mandari, 2021), lo que explica su amplio uso en procesos industriales de producción de biodiésel.

A pesar de sus ventajas, los catalizadores homogéneos presentan algunas limitaciones importantes que han motivado la búsqueda de alternativas catalíticas. Una de las principales desventajas es que el catalizador se encuentra disuelto en el medio de reacción, lo que dificulta su recuperación y reutilización una vez finalizado el proceso (Mandari, 2021). Como consecuencia, el catalizador debe ser neutralizado y eliminado durante las etapas posteriores de purificación del biodiésel, lo que genera residuos líquidos y aumenta los costos de tratamiento.

Adicionalmente, la utilización de catalizadores homogéneos puede requerir materias primas con bajo contenido de ácidos grasos libres, lo que limita el uso de materias primas de menor calidad como los aceites de cocina usados o grasas animales, las cuales presentan mayor contenido de compuestos degradados. Esta limitación ha impulsado el desarrollo de catalizadores heterogéneos sólidos, los cuales ofrecen mayor tolerancia a materias primas con alto contenido de impurezas.

Soporte de catalizadores

Un soporte de catalizador puede definirse como un material sólido sobre el cual se deposita, adsorbe o fija químicamente la fase activa del catalizador, ya sea un óxido metálico, una base, un ácido o una enzima, con el propósito de proporcionar una superficie adecuada para la reacción, mejorar la dispersión de la fase activa y, en muchos casos, incrementar la estabilidad térmica y mecánica del sistema (Busca, 2014). En este sentido, el soporte no actúa únicamente como un medio inerte, sino que puede influir en la actividad catalítica a través de interacciones físicas o químicas con la fase activa.

En el caso de los sistemas empleados en reacciones de transesterificación, se ha reportado el uso de una amplia variedad de materiales como soportes catalíticos. Entre los más comunes se encuentran materiales inorgánicos como la sílice, los óxidos metálicos (TiO_2, Al_2O_3, ZrO_2), los carbones activados y las zeolitas, así como materiales orgánicos tales como polímeros porosos, resinas poliméricas y materiales celulósicos (Mandari 2021). La elección de uno u otro depende de propiedades como el área superficial, la porosidad, la estabilidad química, la facilidad de funcionalización y el costo.

Los polímeros porosos han emergido como materiales altamente versátiles en el desarrollo de catalizadores heterogéneos, debido a su capacidad para presentar estructuras con área superficial controlada, distribución de poros ajustable y propiedades químicas modificables. En el contexto de la producción de biodiésel, estos materiales han sido empleados principalmente como soportes catalíticos, ya que permiten la incorporación de diferentes especies activas y facilitan su recuperación y reutilización (Binhweel, 2022).

Entre los polímeros porosos más estudiados como soportes catalíticos, aquellos basados en poliestireno con divinilbenceno (PSt-DVB) han recibido especial atención. Estos materiales combinan estabilidad mecánica y química, bajo costo y facilidad de funcionalización, lo que permite la incorporación de diferentes especies activas en su matriz (Huang, 2001; Chen, 2022).

Una de las rutas más prometedoras para la obtención de polímeros porosos es el uso de emulsiones altamente concentradas (High Internal Phase Emulsions, HIPEs) como plantillas. En este método, la fase continua contiene los monómeros (estireno y divinilbenceno) que se polimerizan alrededor de una fase dispersa que actúa como plantilla. Tras la eliminación de esta fase, se obtiene una estructura porosa interconectada que replica la morfología de la emulsión original, dando lugar a materiales conocidos como poliHIPEs (Chen, 2022).

Una variante de este método es el uso de emulsiones dobles, que permiten obtener poliHIPEs en forma de perlas en lugar de monolitos. Estas perlas presentan ventajas operativas importantes, como facilidad de manejo, recuperación y posibilidad de emplearse en sistemas continuos. La síntesis de materiales poliméricos sulfonados (PPM-SO_3H) ha mostrado altas tasas de conversión en reacciones de esterificación y una adecuada estabilidad tras varios ciclos de reutilización (Chen, 2022). Como se describió anteriormente, los polímeros porosos, y en particular las perlas de poliHIPEs, ofrecen una plataforma versátil y robusta para el anclaje de catalizadores.

En los proyectos desarrollados por alumnos e investigadores de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía se han desarrollado materiales híbridos poliméricos utilizados como soportes de catalizadores básicos para la transesterificación de aceite en biodiésel. La síntesis de estos materiales es sencilla y se lleva a cabo en condiciones suaves; así mismo, los materiales empleados en la formación de la plantilla y el uso del catalizador son de fácil acceso y con un costo moderado. El desarrollo de estos sistemas híbridos consiste en una secuencia de etapas (Figura 6), las cuales se describen a continuación.

Figura 6. *Etapas en el proceso de transesterificación del aceite a biodiésel. Imagen creada con NotebookLM.*

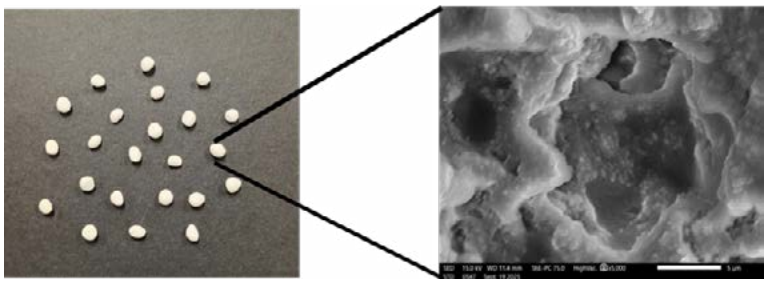


Síntesis y funcionalización del catalizador

Como primer paso en la preparación del soporte del catalizador, se realiza la formulación de una emulsión doble a partir de cloruro de colina (ChCl) y glicerol, la cual posteriormente se combina con estireno y divinilbenceno, los cuales son polimerizados para la formación de las perlas porosas. Finalmente, estas perlas porosas son lavadas y secadas para ser usadas como material de soporte del catalizador empleado.

La funcionalización del material poroso con el catalizador se realiza mediante impregnación de este material con hidróxido de sodio. Este catalizador ha sido utilizado ampliamente en los procesos de transesterificación, ya que es económico, estable y, en este caso, fácil de depositar en el material poroso para el proceso de catálisis. En la Figura 7 se puede observar cómo la superficie del material poroso queda completamente impregnada con el catalizador, lo que permite una gran eficiencia en el proceso de transesterificación.

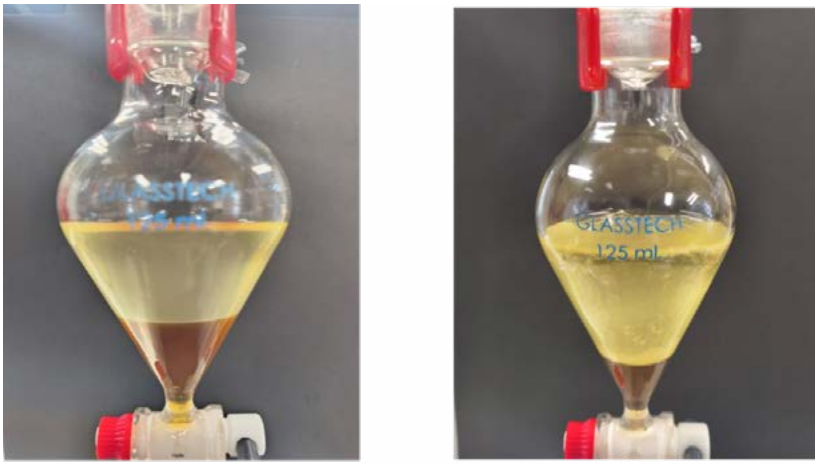
Figura 7. *Perlas porosas impregnadas con NaOH como catalizador (Imagen derecha: Micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido).*



Evaluación de la actividad catalítica

La evaluación de la actividad catalítica del material poroso funcionalizado con NaOH como catalizador en el proceso de transesterificación de aceite comercial de girasol a biodiésel se lleva a cabo en condiciones suaves de temperatura (70 °C) y un tiempo máximo de 6 horas. Para tener un punto de comparación en la producción de biodiésel, se compara este sistema de catálisis heterogénea con el método tradicional de catálisis química en un sistema homogéneo, utilizando el mismo catalizador en ambos casos. Como se muestra en la figura 8, el rendimiento del proceso catalítico con los materiales porosos poliméricos tiene una alta eficiencia, y es comparable con un sistema de catálisis química. De un análisis cualitativo se puede observar que la formación de glicerol, el cual es un subproducto generado en el proceso de transesterificación (parte inferior del embudo de separación), es incluso menor en el sistema heterogéneo utilizando el material poroso como soporte del catalizador que en un proceso químico convencional. Esta disminución en la cantidad de subproducto generado por este proceso convierte a estos materiales en una alternativa menos contaminante y más amigable con el ambiente, sin perder eficiencia en el proceso catalítico.

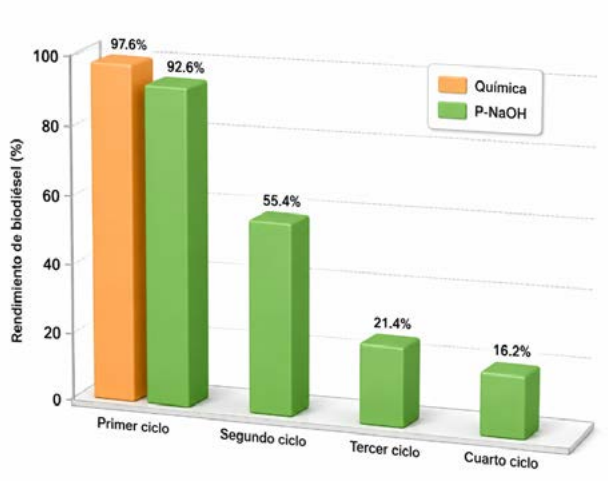
Figura 8. *A) Reacción de transesterificación en sistema químico homogéneo utilizando NaOH como catalizador. B) Reacción de transesterificación en sistema heterogéneo utilizando perlas porosas funcionalizadas con NaOH como catalizador*.



Análisis y cuantificación del biodiésel producido

Una vez que termina la reacción de transesterificación del aceite, se lleva a cabo análisis del rendimiento del biodiésel generado. Como se puede observar en la Figura 9, el sistema catalítico del material poroso polimérico obtiene un rendimiento de 92 % en el primer ciclo de uso, llegando a valores muy cercanos al método químico homogéneo. Una de las ventajas de utilizar estos materiales como alternativa a los procesos de transesterificación química tradicionales es que los podemos reutilizar; en este caso, el material tuvo actividad catalítica hasta el cuarto ciclo de uso, demostrando que el catalizador (NaOH) se mantiene impregnado en la superficie del material poroso en los primeros ciclos de uso. Si se suman los rendimientos de los 4 ciclos de uso del material poroso catalítico, se obtiene 1.75 veces más generación de biodiésel con este sistema que por el método químico.

Figura 9. *Rendimiento de biodiesel obtenido utilizando las perlas porosas impregnadas con NaOH (P-NaOH) y su comparación con el método químico.*



Reutilización de los materiales porosos como soporte de catalizadores

Además de utilizar estos materiales varios ciclos sin que pierdan actividad en el proceso catalítico, se pueden volver a activar para reutilizarlos en el proceso. Se ha demostrado que estas perlas porosas poliméricas mantienen su estructura después de llevar a cabo la serie de ciclos en los procesos de transesterificación. De este modo, estos materiales son lavados, secados y vueltos a funcionalizar con NaOH para volver a iniciar la serie de ciclos de catálisis, permitiendo con ello menor cantidad de material y catalizador en la producción de biodiésel, convirtiéndolos en una metodología más sustentable y amigable con el medio ambiente, comparada con los métodos de catálisis tradicionales.

Conclusiones

El desarrollo de nuevos materiales catalíticos representa una estrategia fundamental para avanzar hacia procesos de producción de biocombustibles más eficientes, sostenibles y compatibles con los principios de la

economía circular. Aunque los catalizadores convencionales han permitido la producción industrial de biodiésel debido a su alta actividad, sus limitaciones relacionadas con la separación, generación de residuos y baja reutilización han impulsado la búsqueda de alternativas más avanzadas.

Los materiales porosos poliméricos, particularmente aquellos basados en estructuras tipo poliHIPE, ofrecen características únicas como elevada porosidad, gran área superficial, estabilidad estructural y facilidad de funcionalización. Estas propiedades permiten utilizarlos como soportes capaces de inmovilizar especies catalíticas, favoreciendo una mayor eficiencia del proceso y facilitando la recuperación del catalizador después de la reacción.

La incorporación de catalizadores activos dentro de soportes porosos representa una alternativa prometedora frente a los sistemas homogéneos tradicionales, ya que combina la alta actividad catalítica con las ventajas de los materiales heterogéneos, como la facilidad de separación y la posibilidad de reutilización. En particular, las perlas porosas funcionalizadas con NaOH demostraron que es posible obtener sistemas catalíticos eficientes para la producción de biodiésel, alcanzando un rendimiento 1.75 veces mayor al método convencional químico y manteniendo actividad durante varios ciclos de uso.

Además, el empleo de materiales avanzados derivados de emulsiones altamente concentradas y emulsiones dobles abre nuevas oportunidades para diseñar catalizadores con propiedades ajustadas a necesidades específicas. La posibilidad de controlar la estructura porosa, incorporar nanopartículas o modificar químicamente la superficie permite desarrollar sistemas catalíticos con mayor desempeño y menor impacto ambiental.

En conjunto, estos avances muestran que la ingeniería de materiales tiene un papel clave en la transición hacia tecnologías energéticas más sostenibles. El diseño de catalizadores soportados en materiales porosos no solo mejora la eficiencia de producción de biodiésel, sino que también contribuye a reducir residuos, aprovechar materias primas renovables y promover procesos químicos más limpios.

Referencias

Atkins, P., de Paula, J. & Keeler, J. (2022). *Atkins' physical chemistry* (12.ª ed.). Oxford University Press.

Bayramoğlu, G. & Arıca, M. Y. (2008). Preparation of poly(glycidyl methacrylate-methyl methacrylate) magnetic beads: Application in lipase immobilization. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, *55*(1–2), 76–83. https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2008.01.001

Binhweel, F., Ahmad, M. I. & Zaki, S. A. (2022). Utilization of polymeric materials toward sustainable biodiesel industry: A recent review. *Polymers*, *14*(19), 3950. https://doi.org/10.3390/polym14193950

Busca, G. (2014). Heterogeneous catalytic materials: Solid state chemistry, surface chemistry and catalytic behaviour. Elsevier.

Carranza, A., Song, K., Soltero-Martínez, J. F. A., Wu, Q., Pojman, J. A. & Mota-Morales, J. D. (2016). On the stability and chemorheology of a urea choline chloride deep-eutectic solvent as an internal phase in acrylic high internal phase emulsions. *RSC Advances*, *6*(85), 81694–81702. https://doi.org/10.1039/C6RA18931H

Castellar, G., Angulo, E. R. & Cardozo, B. M. (2014). Transesterification of vegetable oils using heterogeneous catalysts. *Prospectiva*, *12*(2), 90–104. https://doi.org/10.15665/rp.v12i2.293

Chen, J., Tyagi, R. D., Li, J., Zhang, X., Drogui, P. & Sun, F. (2018). Economic assessment of biodiesel production from wastewater sludge. *Bioresource Technology*, *253*, 41–48. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.016

Chen, W., Wu, Z., Wang, Z., Chen, C. & Zhang, Z. (2022). Preparation of a reusable and pore size controllable porous polymer monolith and its catalysis of biodiesel synthesis. *RSC Advances*, *12*(20), 12363–12370. https://doi.org/10.1039/D2RA01610A

Di Serio, M., Tesser, R., Pengmei, L. & Santacesaria, E. (2008). Heterogeneous catalysts for biodiesel production. *Energy & Fuels*, *22*(1), 207–217. https://doi.org/10.1021/ef700250g

Huang, F.-C., Ke, C.-H., Kao, C.-Y. & Lee, W.-C. (2001). Preparation and application of partially porous poly(styrene-divinylbenzene) particles for lipase immobilization. *Journal of Applied Polymer Science*, *80*(1),

39–47. https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010404)80:1<39::AID-APP1072>3.0.CO;2

Lei, L., Zhang, Q., Shi, S. & Zhu, S. (2016). High internal phase emulsion with double emulsion morphology and their templated porous polymer systems. *Journal of Colloid and Interface Science*, *483*, 232–240. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.08.034

Machorro, J. (2015). Desarrollo de catalizadores heterogéneos base TiO2 para la reacción de transesterificación de triglicéridos en la obtención de biodiésel. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Mandari, V. & Devarai, S. K. (2022). Biodiesel production using homogeneous, heterogeneous, and enzyme catalysts via transesterification and esterification reactions: A critical review. BioEnergy Research, 15, 935–961. https://doi.org/10.1007/s12155-021-10333

Melinte, V., Stroea, L. & Chibac-Scutaru, A. L. (2019). Polymer nanocomposites for photocatalytic applications. *Catalysts*, *9*(12), 986. https://doi.org/10.3390/catal9120986

Ortiz-Ríos, D., Recio-Colmenares, C. L., Gómez-Salazar, S., Soltero, J. F. A., Mota-Morales, J. D., Filonenko, S., Arratia-Quijada, J. & Pérez-García, M. G. (2025). Nonaqueous deep eutectic solvent-based double emulsions as a novel platform for synthesizing macroporous beads with tailored morphologies. ACS Omega. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c06108

Recio-Colmenares, C. L., Ortiz-Ríos, D., Pelayo-Vázquez, J. B., Moreno-Medrano, E. D., Arratia-Quijada, J., Torres-Lubián, J. R., Huerta-Marcial, S. T., Mota-Morales, J. D. & Pérez-García, M. G. (2022). Polystyrene macroporous magnetic nanocomposites synthesized through deep eutectic solvent-in-oil high internal phase emulsions and Fe_3O_4 nanoparticles for oil sorption. *ACS Omega*, *7*(25), 21763–21774. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01836

Sharma, S., Gupta, S., Princy, Arya, S. K. & Kaur, A. (2022). Enzyme immobilization: Implementation of nanoparticles and an insight into polystyrene as the contemporary immobilization matrix. *Process Biochemistry*, *120*, 22–34. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.05.022

Tan, Z., Chen, G., Ma, X., Ge, F., Zhao, Y., Li, A., Hu, L., Ren, S., Zhu, C., You, Q., Zhou, J. & Shi, H. (2024). Carbon-based magnetic nano-

particle utilizing nano-biochar as core and its immobilizing lipase for biodiesel preparation. *Industrial Crops and Products*, *222*, 119693. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119693

Tavella, R. A., da Silva Júnior, F. M. R., Santos, M. A., Miraglia, S. G. E. K. & Pereira Filho, R. D. (2025). A review of air pollution from petroleum refining and petrochemical industrial complexes: Sources, key pollutants, health impacts, and challenges. *ChemEngineering*, *9*(1), 13. https://doi.org/10.3390/chemengineering9010013

Taylor-Pashow, K. M. L. & Pribyl, J. G. (2019). PolyHIPEs for separations and chemical transformations: A review. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, *37*(1), 1–26. https://doi.org/10.1080/07366299.2019.1592924

Capítulo 11

Materiales innovadores para desalación por congelación asistida con refrigeración solar

Beatriz Castillo Téllez[1]
Margarita Castillo Téllez[2]
José Armando Becerra Hernández[1]
Carlos Javier Hernández Estrella[1]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008080

[1] Departamento de Estudios del Agua y la Energía. Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara
[2] Universidad Autónoma de Campeche

Resumen

La desalación por congelación se estudia como alternativa para reducir la salinidad del agua mediante la formación controlada de hielo. Durante la cristalización, la red sólida incorpora principalmente moléculas de agua y deja fuera una parte importante de los iones disueltos, que se concentran en la fase líquida remanente. De esa separación se obtiene hielo con menor contenido de sales y una salmuera más concentrada. El proceso, por supuesto, no ocurre de manera perfecta. Cuando el frente de congelación avanza demasiado rápido, de forma irregular o sin un control térmico adecuado, pueden quedar bolsas de salmuera atrapadas en el hielo. La calidad del agua recuperada depende entonces de la transferencia de calor, la difusión salina, la geometría del sistema, la separación posterior del hielo y los materiales utilizados en cada etapa. Este capítulo revisa, con intención divulgativa y con base técnica, el papel de las superficies frías, los intercambiadores de calor, los aislantes, los recubrimientos funcionales, los sensores, los materiales de almacenamiento térmico y los componentes asociados a la refrigeración solar. También se comentan problemas de corrosión, durabilidad, escalamiento, seguridad y operación en zonas rurales o costeras con estrés hídrico. La idea de este texto es proporcionar un material innovador que no necesariamente sea el más sofisticado, sino aquel que ayuda a controlar mejor el crecimiento del hielo, a reducir pérdidas energéticas y a acercar esta tecnología a soluciones viables dentro del nexo agua-energía.

Agua, energía y materiales

El acceso al agua segura es uno de los desafíos técnicos, sociales y ambientales más persistentes del siglo XXI. Aunque el planeta contiene una enorme cantidad de agua, una porción mínima está disponible para consumo humano, la agricultura y las actividades productivas; es

limitada y se encuentra distribuida de manera desigual, además de otros problemas como la contaminación, la sobreexplotación de acuíferos, la intrusión salina en zonas costeras, las sequías prolongadas y el aumento de la demanda asociado al crecimiento industrial.

Por otro lado, aún existen millones de personas que carecen de servicios de agua potable, lo que constituye una realidad cotidiana en comunidades vulnerables (UN, 2019).

La desalación se ha consolidado como una herramienta estratégica para ampliar la disponibilidad de agua en regiones áridas, semiáridas o costeras. Las tecnologías dominantes son la ósmosis inversa, basada en membranas y en presión hidráulica, y los procesos térmicos de evaporación-condensación. Ambas familias han alcanzado la madurez tecnológica y pueden producir agua de buena calidad. Sin embargo, también implican costos energéticos, mantenimiento especializado, manejo de salmueras concentradas y, en algunos casos, dependencia de infraestructura compleja. El crecimiento de las instalaciones de desalación debe ser acompañado por estrategias para lograr reducir fuertes impactos ambientales, especialmente aquellos que tienen que ver con el consumo energético y la salmuera de desecho (Jones et al., 2019).

La preocupación actual por el agua está especialmente vinculada a la energía. Bombear, potabilizar, desalar, distribuir y tratar el agua consume energía; producir energía, en muchos casos, también demanda agua. A esta relación se le conoce como nexo agua-energía. Desde esa perspectiva, las tecnologías de desalación de bajo consumo y compatibles con fuentes renovables cobran mayor relevancia. Producir agua no puede hacerse a costa de emisiones crecientes, costos inalcanzables o equipos imposibles de mantener en territorios vulnerables.

La desalación por congelación se sitúa en esta línea de ideas como una tecnología emergente, con el atractivo de aprovechar un fenómeno físico conocido: durante la formación de hielo, las sales tienden a quedar fuera de la estructura cristalina. En principio, esto permite separar agua de menor salinidad sin recurrir ni a membranas sometidas a alta presión ni a la evaporación masiva. La idea es fácil de explicar, aunque la ingeniería presenta cierta complejidad. Hace falta formar hielo de buena calidad, controlar la salmuera, minimizar el consumo energético, recuperar el frío y diseñar equipos robustos.

Ahí aparece el tema de los materiales. En un sistema de desalación por congelación asistido con refrigeración solar, los materiales definen cómo se transfiere el calor, cómo se adhiere o desprende el hielo, cuánto frío se pierde, cómo se mide la salinidad, cómo se almacena la energía y cómo se aprovecha la radiación solar para producir enfriamiento. La tecnología se define por la interacción entre materiales, geometría, operación e instrumentación.

Este capítulo presenta el papel de los materiales innovadores en la desalación por congelación con refrigeración solar, procurando mantener un lenguaje claro y conservar el contenido técnico. Se explican las bases físicas, los materiales involucrados y los desafíos que aún deben resolverse antes de imaginar aplicaciones reales.

Principio de la desalación por congelación

La desalación por congelación se basa en la separación de fases. Cuando una solución salina se enfría hasta iniciar la solidificación, las moléculas de agua se ordenan en una red cristalina. Esa red admite con dificultad a los iones disueltos, como los de sodio, cloruro, magnesio, calcio, potasio y sulfato. Por esta razón, a medida que el hielo crece, una parte de las sales se desplaza hacia la fase líquida remanente. El resultado ideal sería una fase sólida de baja salinidad y una salmuera cada vez más concentrada.

En la práctica, el proceso depende de la velocidad de congelación y de la capacidad de los solutos para redistribuirse. Si el frente de congelación avanza lentamente, los iones tienen más tiempo para difundirse hacia el líquido y alejarse de la estructura cristalina. Esto suele favorecer la formación de hielo más puro. Si el avance es demasiado rápido, la salmuera puede quedar atrapada en el hielo en forma de canales, cavidades o inclusiones microscópicas. Así, el hielo no es necesariamente agua pura solidificada, sino una matriz con diferentes grados de sal atrapada.

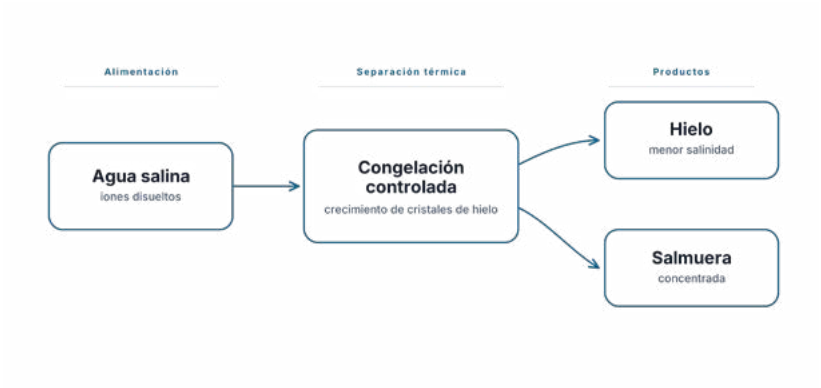
La región donde coexisten hielo y salmuera se conoce con frecuencia como zona pastosa o mushy zone. Esta zona es importante porque concentra muchos de los fenómenos críticos del proceso: liberación de calor latente, rechazo de sales, transporte de solutos, formación de cristales, cambios de porosidad y posible captura de líquido salino. Desde la pers-

pectiva de los materiales, esta región también es sensible a la superficie en la que se inicia el hielo, a la rugosidad del material, a los gradientes térmicos y al diseño geométrico de la celda.

La ventaja teórica de congelar en lugar de evaporar se debe al calor latente. Evaporar agua requiere mucha más energía que congelarla, lo que la hace atractiva desde el punto de vista termodinámico. Aun así, el análisis debe incluir el sistema completo: enfriamiento inicial, calor latente de solidificación, eficiencia del equipo de refrigeración, separación del hielo, lavado, fusión, recuperación de frío, bombeo, control e instrumentación. Una tecnología no se juzga por su principio ideal, es importante tomar en cuenta su desempeño neto.

Por otro lado, aun cuando los estudios recientes reconocen el potencial de la desalación por congelación, también señalan que persisten varios problemas, tales como la productividad, la calidad del hielo y el escalamiento (Janajreh et al., 2023; Kalista et al., 2018). Es importante trabajar en la mejora de estos sistemas para que resulten reproducibles y útiles. Aquí es cuando los materiales pueden ayudar a avanzar hacia estos objetivos.

Figura 1. *Principio general de la desalación por congelación: formación de hielo con menor salinidad y concentración de sales en la salmuera remanente.*



Fuente: elaboración propia.

Integración con refrigeración solar

La congelación requiere extraer calor del agua salina. Tradicionalmente, se logra mediante refrigeración mecánica accionada por electricidad. Cuando se buscan soluciones de bajo impacto para regiones con alta radiación solar y limitaciones energéticas, resulta natural explorar el acoplamiento con la energía solar. La pregunta técnica es: ¿cómo convertir la radiación solar en frío útil para formar hielo?

Hay varias opciones: la primera consiste en utilizar energía solar fotovoltaica para alimentar un sistema de compresión de vapor. Entre sus ventajas, utiliza componentes comerciales y una tecnología ampliamente conocida. Otra posibilidad es emplear energía solar térmica para activar ciclos de refrigeración por adsorción o por absorción. En ellos, el calor captado por colectores solares impulsa procesos fisicoquímicos que permiten evaporar un refrigerante a baja temperatura y generar enfriamiento.

La refrigeración solar térmica es especialmente interesante porque permite aprovechar el calor de baja o media temperatura. En ciclos de adsorción, materiales sólidos porosos como sílice gel, zeolitas, carbón activado o materiales compuestos capturan y liberan un refrigerante. En ciclos de absorción, una solución líquida absorbe el refrigerante y luego lo libera al calentarlo. Ambos esquemas pueden operar con energía solar, aunque sus diseños, temperaturas de activación, presiones, refrigerantes y condiciones de seguridad difieren.

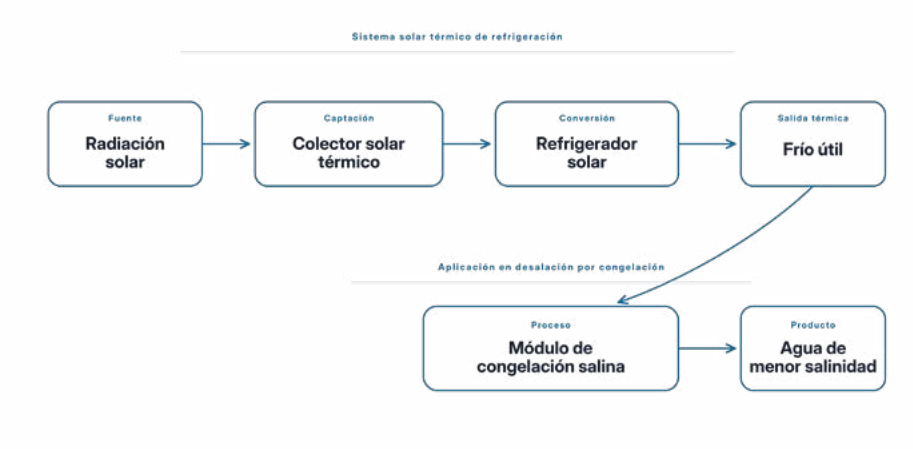
La refrigeración solar no resuelve todos los problemas energéticos. Sabemos, por ejemplo, que la irradiancia cambia durante el día y, como consecuencia, los colectores pierden calor; los ciclos tienen coeficientes de desempeño limitados y la capacidad frigorífica debe ajustarse a la demanda de congelación. Si se necesita operar durante la noche o bajo nubosidad, entran en juego el almacenamiento térmico y los esquemas híbridos. Por eso la selección de materiales es crítica: absorbedores solares, adsorbentes, absorbentes, fluidos térmicos, intercambiadores, aislamientos y materiales de cambio de fase deben trabajar como un sistema.

Otra opción importante que se está contemplando es la congelación pasiva mediante enfriamiento radiativo. Algunas superficies emiten radiación infrarroja hacia el cielo y, bajo ciertas condiciones, alcan-

zan temperaturas inferiores a la del ambiente, especialmente en noches despejadas. Huang et al. (2022) demostraron que este principio puede aplicarse a la desalación por congelación en condiciones controladas. No es un sistema solar térmico clásico, pero demuestra que el diseño avanzado de superficies radiativas puede generar frío con un consumo eléctrico mínimo o nulo.

La integración solar debe analizarse como un sistema; por lo tanto, colocar un colector y llamar renovable al proceso sería una ilusión. Lo que define la viabilidad son las temperaturas alcanzadas, los flujos de calor, los tiempos de ciclo, las pérdidas, la estabilidad, la salinidad del producto y la recuperación energética. La palabra "solar" suena bien; sin embargo, el balance energético determinará si el sistema es factible.

Figura 2. *Acoplamiento conceptual entre la energía solar térmica, la refrigeración solar y el módulo de congelación salina.*



Fuente: elaboración propia.

Los materiales dentro del proceso

En tecnologías de agua, los materiales suelen presentarse como tuberías, recipientes, soportes, membranas o componentes auxiliares. En la desalación por congelación, este aspecto ha sido desatendido. Los materiales modifican las condiciones físicas bajo las cuales se forma el

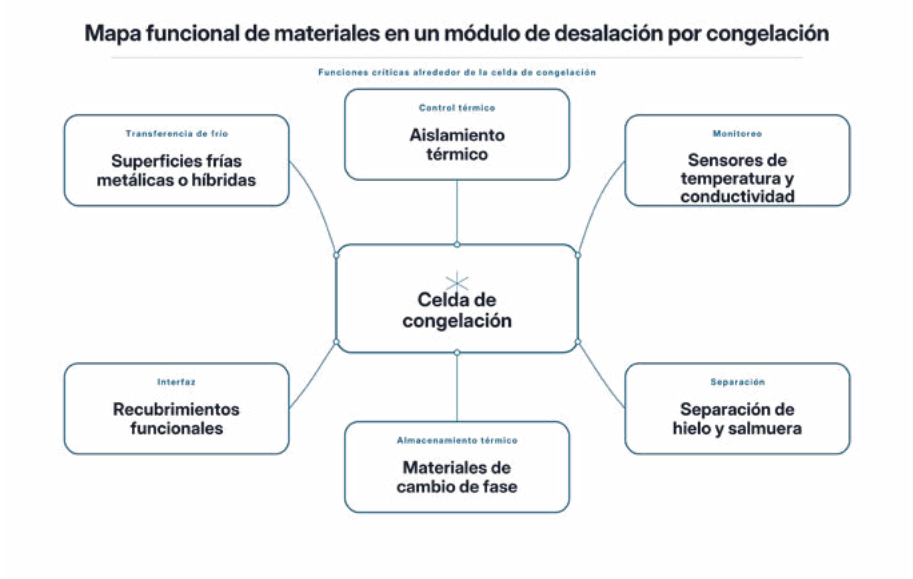
hielo: aceleran o frenan la extracción de calor, inducen la nucleación, favorecen o dificultan el desprendimiento, resisten o sufren corrosión, almacenan energía, protegen los sensores y permiten recuperar el frío.

Por ello, es importante ordenarlos por su función dentro del sistema. Están los materiales que transfieren calor, como metales, aleaciones, placas, serpentines y superficies de contacto; los aislantes, que reducen pérdidas hacia el ambiente; los materiales transparentes y estructurales, útiles para observar y contener el proceso; los recubrimientos que modifican la interacción con hielo y salmuera; los adsorbentes, absorbentes, refrigerantes y fluidos térmicos de la refrigeración solar; los materiales de almacenamiento; los sensores y encapsulados; y los elementos para separar, lavar, escurrir y fundir el hielo.

Cada grupo debe ser evaluado con criterios particulares; por ejemplo, un intercambiador debe conducir el calor y resistir la corrosión. Un aislante necesita una baja conductividad y estabilidad frente a la humedad. Una celda transparente debe dejar ver el proceso sin deformar demasiado el campo térmico. Un sensor requiere sensibilidad, estabilidad y compatibilidad con la salmuera. Un recubrimiento tiene que sobrevivir a muchos ciclos, no responder maravillosamente a una sola prueba. Un adsorbente debe regenerarse a temperaturas solares alcanzables y mantener una cinética razonable.

La innovación material depende de que el material cumpla una función concreta. En el laboratorio, un cilindro de acrílico puede ser más valioso que una aleación costosa si permite observar el frente de congelación y validar un modelo. En una aplicación comunitaria, el acero inoxidable común, un buen aislamiento y sensores robustos pueden pesar más que un recubrimiento sofisticado difícil de reponer.

Figura 3. *Funciones principales de los materiales en un módulo de desalación por congelación.*



Fuente: elaboración propia.

Este enfoque funcional se ajusta a investigaciones que integran el modelado físico-matemático, la validación experimental, los sensores distribuidos y la evaluación energética. De esta manera, el estudio de materiales forma parte de una arquitectura experimental más amplia, ya que se sabe que en la desalación por congelación, cada material modifica una frontera térmica, química, mecánica o de medición.

Superficies de congelación e intercambiadores de calor

La superficie de congelación es uno de los componentes más críticos. Es el lugar donde se retira el calor del agua salina y se inicia la formación del hielo. Su material, rugosidad, espesor, geometría y conductividad térmica influyen directamente en la nucleación y en el avance del frente de congelación. Una superficie mal diseñada puede formar hielo irregular, provocar el atrapamiento salino, dificultar el desprendimiento y reducir la repetibilidad experimental.

La propiedad más evidente es la conductividad térmica. El cobre y el aluminio conducen el calor con gran eficiencia, por lo que pueden extraer energía de forma rápida. El acero inoxidable conduce menos, pero resiste mejor en muchos ambientes corrosivos. Los polímeros conducen poco, pero pueden ser baratos, ligeros y químicamente resistentes. El vidrio y el acrílico permiten la observación, aunque no son buenos conductores. La selección implica determinar qué mejora aplica a una condición específica. En ingeniería, casi ningún material lo hace todo a la perfección, por lo que se requiere priorizar las necesidades.

Una conductividad elevada no garantiza una mejor desalación. Si el frente de congelación avanza demasiado rápido, aumenta el riesgo de inclusión de salmuera. La superficie debe extraer calor de forma controlada. En algunos diseños se busca un enfriamiento unidireccional para estudiar el avance del frente en una dirección preferente; en otros se prueban geometrías radiales o tubulares para aumentar el área de transferencia. Lo importante es que el diseño térmico sea compatible con la dinámica salina.

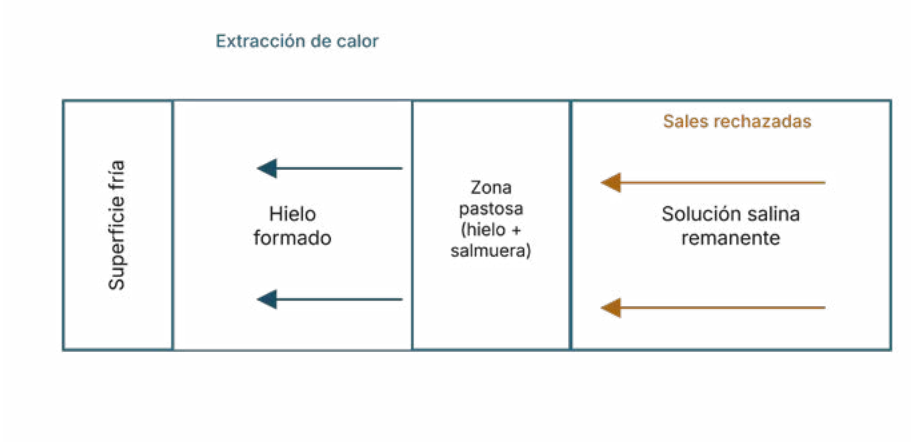
Existen varios tipos de intercambiadores de calor, como placas, serpentines, camisas, tubos concéntricos o superficies extendidas con aletas. En el laboratorio se privilegian el control y la medición; en una aplicación, se busca transferir calor de manera eficiente y facilitar la limpieza. Las superficies corrugadas o microestructuradas aumentan el área de contacto, aunque también pueden retener salmuera, formar depósitos o dificultar el desprendimiento del hielo. El diseño debe equilibrar la eficiencia térmica, el ensuciamiento, la corrosión y la separación mecánica.

La resistencia térmica de contacto es otro factor relevante, ya que, aunque un material tenga buena conductividad, una mala unión entre la placa fría y el módulo de enfriamiento puede reducir la transferencia de calor. Juntas, adhesivos, pastas térmicas, tornillería, empaques y la presión de contacto influyen en el resultado. En prototipos experimentales, estos detalles suelen explicar las diferencias entre la simulación y la medición. El modelo puede estar bien, pero si la unión térmica es deficiente, el experimento mostrará sus debilidades.

Los intercambiadores también deben soportar ciclos de congelación y descongelación. La expansión del agua al congelarse genera esfuerzos

mecánicos. Si el hielo se adhiere en exceso, puede deformar piezas, agrietar superficies o levantar recubrimientos. La salmuera concentrada que queda al final suele ser más agresiva que el agua inicial. El diseño debe contemplar esa condición severa: baja temperatura, sales concentradas, esfuerzo mecánico y limpieza repetida.

Figura 4. *Representación simplificada del frente de congelación, de la zona pastosa y del rechazo salino.*



Fuente: elaboración propia.

Geometría y observación del hielo

La geometría del sistema pesa más de lo que parece. La forma de la celda determina la trayectoria del flujo de calor, la distribución de temperaturas y el movimiento de la salmuera. Una celda plana facilita estudiar un frente casi unidimensional y compararlo con modelos de conducción y de difusión. Un cilindro introduce variaciones radiales y puede parecerse más a ciertos módulos experimentales. Un sistema de placas paralelas aumenta el área de transferencia y se aproxima a configuraciones escalables, aunque complica el control del hielo formado.

Los materiales transparentes desempeñan un papel especial en la investigación. El acrílico, el policarbonato o el vidrio permiten observar el avance del frente de congelación, la aparición de grietas, burbujas, zonas

opacas o canales de salmuera. Aunque estos materiales suelen tener una conductividad térmica inferior a la de los metales, su valor radica en que permiten observar el fenómeno. En las etapas de modelado y validación experimental, la observación visual puede revelar comportamientos que los sensores no pueden explicar por sí solos.

El acrílico es atractivo por su facilidad de maquinado, su bajo costo relativo y su buena transparencia. Se puede fabricar en forma de cilindros, placas o celdas con puertos para sensores. Sin embargo, debe cuidarse de su compatibilidad con esfuerzos térmicos, solventes y uniones. El policarbonato ofrece mayor resistencia al impacto, pero puede rayarse o degradarse en determinadas condiciones. El vidrio de borosilicato es químicamente estable y ópticamente claro, aunque más frágil y menos flexible frente a esfuerzos mecánicos.

La transparencia permite documentar el experimento mediante fotografías o video. Esto es útil para asociar datos de temperatura y conductividad con eventos visuales: inicio de nucleación, avance del hielo, formación de canales, desprendimiento parcial o acumulación de salmuera. En un sistema instrumentado, las imágenes pueden convertirse en información cuantitativa si se analizan mediante procesamiento digital. Por ejemplo, puede estimarse la posición del frente de congelación en función del tiempo y compararla con simulaciones.

Una pared transparente también puede introducir distorsiones térmicas. Si entra calor del ambiente o se conduce poco, el frente de congelación puede deformarse. Por eso conviene separar, cuando sea posible, la función de observación de la función de transferencia principal: una superficie metálica fría y controlada, acompañada de paredes transparentes aisladas, donde se necesite observar el proceso. Así se observa sin sacrificar por completo el control térmico.

Aislamiento térmico para conservar el frío

El aislamiento térmico es una innovación muy significativa; sin embargo, no tiene el brillo de un nanomaterial ni el atractivo visual de un recubrimiento avanzado, pero sí puede determinar la eficiencia del sistema. Si el módulo de congelación intercambia calor de manera no controlada con el

ambiente, el frente de congelación se vuelve irregular, el consumo energético aumenta y la comparación con los modelos pierde confiabilidad.

El aislamiento dirige el flujo de calor de tal manera que, en un experimento de congelación progresiva, se busca que el calor salga por una superficie definida, mientras que las demás paredes limitan ganancias o pérdidas no deseadas. Si el calor se escapa por varias direcciones, el proceso pierde reproducibilidad. Eso afecta la calidad del hielo y la interpretación de los datos. Un buen aislamiento acerca el experimento del modelo que se quiere validar.

Los materiales aislantes comunes incluyen espumas de poliuretano, poliestireno expandido o extruido, elastómeros flexibles, lana mineral, fibra de vidrio y paneles multicapa. En aplicaciones más avanzadas pueden considerarse aerogeles o paneles al vacío. Estos últimos presentan conductividades muy bajas, pero pueden resultar costosos, frágiles o difíciles de reparar. En contextos comunitarios, un aislamiento convencional bien instalado puede ser más útil que una solución de alto desempeño pero inaccesible.

La selección de aislantes debe considerar la conductividad térmica, la resistencia a la humedad, la estabilidad dimensional, la facilidad de limpieza, el comportamiento frente a la condensación y la compatibilidad con bajas temperaturas. Un aislante que absorbe humedad pierde desempeño y puede favorecer el crecimiento microbiológico. Uno que se comprime o se agrieta puede generar puentes térmicos. Uno que no puede desmontarse complica el mantenimiento. El aislamiento no solo debe funcionar el primer día; también debe seguir funcionando después de muchos ciclos.

En el balance energético del sistema, las pérdidas térmicas pueden resultar decisivas. Si se requiere retirar calor adicional debido a un aislamiento deficiente, el consumo específico por metro cúbico de agua desalinizada aumenta. En la refrigeración solar, donde la capacidad frigorífica puede ser limitada e intermitente, cada pérdida cuenta. Dicho de manera directa: antes de utilizar un colector solar más grande, conviene revisar si el prototipo está perdiendo frío por las paredes; en gran medida, la eficiencia empieza por no desperdiciar.

Recubrimientos funcionales e icefóbicos

Los recubrimientos funcionales modifican la interacción de una superficie con el agua, el hielo o las sales. En la desalación por congelación, pueden reducir la adhesión del hielo, disminuir las incrustaciones, proteger contra la corrosión, facilitar la limpieza o modificar la nucleación. En esta familia se incluyen recubrimientos hidrofóbicos, superhidrofóbicos, icefóbicos, antiincrustantes, lubricantes y basados en sol-gel.

Los recubrimientos hidrofóbicos reducen la afinidad de una superficie por el agua. Los superhidrofóbicos pueden generar ángulos de contacto elevados y favorecer que las gotas se deslicen. Los icefóbicos buscan reducir la fuerza necesaria para desprender el hielo. En principio, esto sería útil para separar el hielo formado sin aplicar una fuerza excesiva ni mezclarlo con salmuera. También podría reducir los daños mecánicos en la superficie de congelación.

La desalación por congelación plantea una situación particular. En muchas aplicaciones antihielo se busca impedir la formación de hielo; aquí se necesita formarlo, controlarlo y luego separarlo. Un recubrimiento que retrase demasiado la nucleación puede alargar los tiempos de operación. Uno que facilite el desprendimiento puede resultar útil si no perjudica la transferencia de calor ni contamina el agua. La evaluación debe realizarse para este proceso; no debe extrapolarse a otros usos.

La durabilidad de los materiales también es un punto crítico; algunas investigaciones recientes sobre recubrimientos icefóbicos subrayan que muchas superficies muestran buen desempeño inicial, pero pierden propiedades después de la abrasión, la exposición ambiental, los ciclos de congelación-descongelación o la limpieza (Nistal et al., 2024). En la desalación, además, la salmuera concentrada puede acelerar el deterioro, modificar la humectabilidad o depositar sales en la superficie. Consecuentemente, un recubrimiento que funciona en agua pura no necesariamente funciona de la misma manera en agua salina.

Evaluar un recubrimiento exige considerar más que el ángulo de contacto, ya que también importan la adhesión del hielo, la resistencia térmica que aporta, la estabilidad en soluciones salinas, la respuesta a la limpieza, la posible liberación de compuestos y el efecto sobre la

salinidad del hielo recuperado. El ángulo de contacto ayuda, pero no determina todo el proceso.

Los recubrimientos pueden proteger los metales frente a la corrosión. Las capas poliméricas, cerámicas, sol-gel o híbridas reducen el contacto directo entre la salmuera y el metal base, de modo que pueden surgir problemas cuando la capa protectora también actúa como aislante y deteriora la transferencia de calor. Hay que proteger sin aislar en exceso, facilitar el desprendimiento sin impedir la congelación y aumentar la vida útil sin encarecer innecesariamente el sistema.

Corrosión, compatibilidad química y seguridad

La salinidad convierte al agua en un medio químicamente exigente. Debido a que las soluciones salinas pueden favorecer la corrosión de metales, la degradación de ciertos polímeros, la cristalización de sales y el ensuciamiento de superficies. Aunque la operación a baja temperatura puede reducir algunas velocidades de reacción, la salmuera concentrada remanente puede resultar muy agresiva, especialmente en zonas donde se acumulan iones y oxígeno disuelto.

La corrosión reduce la vida útil del equipo y puede comprometer sus resultados. Cuando un metal libera iones, altera la conductividad y provoca lecturas erráticas. Una superficie corroída cambia su rugosidad y altera la nucleación del hielo. Una unión debilitada produce fugas. En sistemas de agua, la corrosión rara vez avisa con cortesía; suele aparecer cuando el prototipo ya está armado y el experimento urge.

El uso del acero inoxidable es una opción común por su resistencia química; sin embargo, no todos los grados se comportan igual frente a los cloruros. El aluminio y el cobre pueden requerir protección si están expuestos a la salmuera. El titanio ofrece una excelente resistencia, aunque su costo limita su uso en prototipos de bajo costo. Los polímeros técnicos pueden resistir la corrosión, pero presentan menor conductividad térmica y posibles limitaciones mecánicas a bajas temperaturas.

También conviene evitar la corrosión galvánica. Cuando dos metales distintos se conectan eléctricamente y comparten una solución salina, uno de ellos puede corroerse más rápidamente. El problema aparece

en tornillos, conectores, soportes, uniones y sensores. En un sistema experimental, un tornillo pequeño puede convertirse en el punto débil del diseño. La compatibilidad entre componentes importa tanto como la resistencia individual de cada material.

La seguridad química es igualmente importante en los sistemas de refrigeración solar y, desafortunadamente, algunos refrigerantes o pares de trabajo pueden ser tóxicos, inflamables u operar a presión. El amoníaco, por ejemplo, puede ser útil en ciclos que alcanzan temperaturas inferiores a cero, pero exige protocolos de seguridad estrictos. En aplicaciones comunitarias, la tecnología debe diseñarse para minimizar los riesgos. Una solución sustentable no debe depender de condiciones de operación peligrosas o difíciles de supervisar.

Adsorbentes para producir frío con calor solar

Los ciclos de adsorción producen frío a partir de calor; esto, aunque parezca contradictorio, es un principio fisicoquímico bien establecido. Un sólido poroso adsorbe un refrigerante en su superficie interna. Al calentarse, lo libera; al enfriarse, lo capta de nuevo. En un ciclo adecuado, la evaporación del refrigerante genera enfriamiento útil y la energía solar térmica puede activar el proceso.

Los adsorbentes más estudiados incluyen sílica gel, zeolitas, carbón activado, alúmina activada, sales impregnadas en matrices porosas, hidrogeles, compuestos de carbono y estructuras metal-orgánicas. Cada material se combina con un refrigerante o adsorbato, como agua, metanol, amoniaco u otros fluidos. La elección depende de la temperatura de regeneración, la presión de operación, la capacidad de adsorción, la cinética, la estabilidad, el costo y la seguridad.

La sílica gel con agua es atractiva porque puede regenerarse a temperaturas relativamente bajas, compatibles con colectores solares de baja o media temperatura. Sin embargo, el agua como refrigerante limita la producción de temperaturas por debajo de cero en ciertas condiciones de presión. Las zeolitas tienen alta afinidad por el agua y alta estabilidad, pero pueden requerir una temperatura de regeneración más alta. El carbón activado, combinado con metanol o amoníaco, puede alcanzar

temperaturas más bajas, aunque debe evaluarse cuidadosamente la seguridad del refrigerante.

Los materiales compuestos buscan superar las limitaciones de los adsorbentes tradicionales. Por ejemplo, se pueden incorporar sales higroscópicas en matrices porosas para aumentar la capacidad de adsorción. También se puede mejorar la conductividad térmica mediante grafito, espumas metálicas o aditivos conductores. Esto es importante porque muchos adsorbentes son malos conductores de calor; si el lecho adsorbente se calienta o se enfría lentamente, el ciclo se prolonga y la potencia frigorífica disminuye.

Para la desalación por congelación, el adsorbente debe evaluarse en función de la temperatura requerida en el evaporador. No basta con lograr el enfriamiento con el aire acondicionado; se requiere generar suficiente frío para iniciar y mantener la formación de hielo en una solución salina. Además, el ciclo debe ofrecer una capacidad frigorífica compatible con la masa de agua a tratar y con los tiempos deseados. Un adsorbente excelente en teoría puede resultar impráctico si obliga a construir un sistema demasiado grande o demasiado lento.

La adsorción solar ofrece una oportunidad clara: usar calor solar para reducir la dependencia eléctrica. También tiene límites conocidos: baja densidad de potencia, ciclos intermitentes, necesidad de vacío, sensibilidad al diseño del lecho y costos de algunos materiales avanzados. El avance no radica solo en encontrar un adsorbente de alta capacidad, sino en integrarlo en un sistema térmico funcional.

Absorbentes y ciclos de absorción

Los ciclos de absorción son otra forma de convertir calor en frío. En lugar de fijar el refrigerante en la superficie de un sólido, como ocurre en la adsorción, aquí se disuelve en un líquido o en una solución absorbente. El calor separa el refrigerante de la solución; después, este se condensa, se evapora a baja presión y vuelve a absorberse. Si se alcanzan las temperaturas necesarias, el ciclo puede accionarse mediante energía solar térmica.

Los pares de trabajo más conocidos son el agua-bromuro de litio y el amoníaco-agua. El par agua-bromuro de litio se utiliza ampliamente en

la refrigeración del aire acondicionado, pero el agua como refrigerante limita la operación por debajo de 0 °C. Para la congelación, el par amoníaco-agua puede ser más adecuado, ya que el amoníaco permite alcanzar temperaturas más bajas. Aun así, el amoníaco exige un manejo seguro por toxicidad, presión y compatibilidad con materiales.

Los materiales absorbentes deben mantener estabilidad química, baja corrosividad relativa, buena capacidad de absorción y operar sin cristalización. En el caso del bromuro de litio, la cristalización puede ser un problema si las condiciones se salen de rango. En el caso del amoníaco-agua, la seguridad y la separación efectiva del refrigerante requieren un diseño cuidadoso. También se necesitan materiales resistentes en los generadores, condensadores, evaporadores, absorbedores y tuberías.

En desalación por congelación, un ciclo de absorción podría alimentar un evaporador acoplado al módulo de congelación. Su conveniencia debe compararse con compresión de vapor alimentada por fotovoltaica, adsorción solar, esquemas híbridos, enfriamiento radiativo o recuperación de frío. No hay una respuesta universal: la mejor alternativa dependerá de la escala, radiación disponible, temperatura requerida, costo, mantenimiento y seguridad.

En contextos rurales, es muy importante la simplicidad operativa. Un sistema de absorción puede ser atractivo energéticamente, pero si requiere personal altamente capacitado, control fino de presiones o manejo de sustancias peligrosas, su implementación puede complicarse. La tecnología debe pensarse tanto para el laboratorio como para la realidad. Hay que recordar que en las comunidades no son útiles solo los prototipos, sino que se requieren el escalamiento necesario y sistemas confiables.

Materiales de cambio de fase y almacenamiento térmico

La energía solar es variable a lo largo del día y del año; sabemos que influyen las nubes, los amaneceres y los atardeceres, las estaciones y los cambios abruptos en la irradiancia. Esta variabilidad es un problema para la desalación por congelación, ya que la formación de hielo requiere condiciones térmicas relativamente estables. Una estrategia para amor-

tiguar la intermitencia consiste en incorporar almacenamiento térmico. Los materiales de cambio de fase, conocidos como PCM por sus siglas en inglés, son candidatos relevantes para esta función.

Un PCM almacena o libera energía durante una transición de fase, generalmente de sólido a líquido o de líquido a sólido. A diferencia del almacenamiento sensible, donde el material guarda energía cambiando su temperatura, el almacenamiento latente permite guardar una cantidad importante de energía cerca de una temperatura casi constante. Esto puede ayudar a estabilizar la operación de un sistema solar de refrigeración o a conservar frío durante periodos sin aporte energético directo.

En desalación por congelación, los PCM pueden cumplir varias funciones. Pueden almacenar calor solar para activar un ciclo de adsorción o absorción fuera de las horas de mayor irradiancia, conservar frío durante cierto tiempo o integrarse en intercambiadores para suavizar fluctuaciones de temperatura. Cuando la temperatura cambia con demasiada brusquedad, el frente de congelación puede avanzar de manera errática; el almacenamiento ayuda a moderar ese comportamiento.

La selección de un PCM requiere revisar temperatura de cambio de fase, calor latente, conductividad térmica, estabilidad durante ciclos, subenfriamiento, segregación de fases, compatibilidad con contenedores, toxicidad, inflamabilidad y costo. Para aplicaciones cercanas a 0 °C o por debajo, pueden usarse soluciones acuosas, mezclas eutécticas o sales hidratadas específicas. No cualquier PCM sirve, porque el material debe cambiar de fase en el intervalo térmico relevante para el proceso y debe hacerlo de manera repetible.

Un problema frecuente de los PCM es su baja conductividad térmica. Esto dificulta cargar y descargar energía rápidamente. Para mejorarla, se pueden emplear aletas metálicas, grafito expandido, espumas metálicas, nanopartículas o encapsulación mejorada. Sin embargo, cada mejora agrega complejidad y costo. Guo et al. (2025) señalan que los PCM en refrigeración solar son una línea en expansión, pero todavía requieren optimización específica por arquitectura del sistema.

El almacenamiento térmico también se conecta con la recuperación de frío. El hielo producido y la salmuera fría todavía contienen energía útil para preenfriar la alimentación. Con un intercambiador adecuado, parte de

ese frío se recupera antes de fundir el hielo o disponer la salmuera. Esto reduce la carga del sistema de refrigeración y mejora el balance energético. En términos prácticos: el frío que ya se produjo debería ser aprovechado.

Sensores, instrumentación y datos confiables

Un sistema de desalación por congelación no puede optimizarse únicamente observando si se formó hielo. Se necesitan datos, como la temperatura, la conductividad, la concentración salina, la masa de hielo, el volumen de salmuera, el tiempo de operación, la energía consumida y las condiciones ambientales, que son variables esenciales. Los sensores transforman un fenómeno físico en información analizable. Sin instrumentación, se pierde toda la información que el experimento arroja.

Los sensores de temperatura pueden ser termopares, RTD o termistores. Los termopares son económicos y robustos, pero requieren una calibración y compensación adecuadas. Los RTD ofrecen alta precisión y estabilidad, aunque suelen ser más costosos. Los termistores tienen una sensibilidad elevada en intervalos definidos, pero su respuesta no siempre es lineal. La selección depende del rango de temperatura, la precisión requerida, el tiempo de respuesta, el diámetro, el encapsulado y la compatibilidad con salmuera.

La conductividad eléctrica se utiliza como indicador de la concentración salina. Sin embargo, medir la conductividad durante la congelación es delicado. La conductividad depende de la temperatura, de la composición iónica y de la concentración local. Si el sensor queda cerca de una bolsa de salmuera, de una burbuja o de una zona parcialmente congelada, la lectura puede no reflejar el volumen total. De ahí que se requieran calibraciones con soluciones patrón a distintas temperaturas y una estrategia clara para la ubicación de los electrodos.

El encapsulado de sensores es otro asunto de materiales porque debe proteger el elemento sensible sin aislarlo térmicamente en exceso. También debe resistir la humedad, la salinidad, las bajas temperaturas y los ciclos repetidos. Los cables y conectores resisten la condensación y los esfuerzos mecánicos. Un sensor puede ser excelente en el catálogo y fallar por un conector de bajo costo.

La adquisición de datos en tiempo real permite relacionar eventos térmicos y salinos. Por ejemplo, se puede registrar la temperatura en diferentes posiciones, calcular gradientes, estimar la velocidad del frente de congelación y comparar la evolución de la conductividad con la predicción del modelo. Si se incorporan fotografías o video, la medición puede complementarse con un análisis visual, lo que fortalece la validación experimental.

Los datos confiables requieren protocolos, por lo que hay que definir cómo se preparan las soluciones salinas, cómo se calibran los sensores, cómo se inicia el ciclo, cuándo se detiene la congelación, cómo se separa el hielo, cómo se mide su salinidad tras fundirlo y cómo se reportan las incertidumbres. Instrumentar no es llenar el sistema de sensores; por lo tanto, es necesario diseñar una forma honesta de preguntarle qué está ocurriendo.

Modelado físico-matemático y propiedades de materiales

La modelación permite conectar el experimento con principios físicos. En la desalación por congelación, los modelos deben representar la transferencia de calor, la difusión de sales, el avance del frente de solidificación, la liberación de calor latente y las condiciones de frontera. Los materiales proporcionan parámetros clave para estos modelos: conductividad térmica, capacidad calorífica, densidad, difusividad, rugosidad, resistencia térmica de contacto, coeficientes convectivos y propiedades de cambio de fase.

La conducción de calor se describe de manera básica mediante la ley de Fourier; esto se explica de manera simple: el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura y a la conductividad térmica del material. Esto significa que una placa de cobre, acero o acrílico no se comportará de la misma manera, aunque tenga la misma geometría. El material modifica la velocidad a la que se retira calor de la solución salina y, por ello, la del frente de congelación.

El transporte de sal puede describirse inicialmente mediante la ley de Fick, según la cual el flujo de soluto depende del gradiente de concentra-

ción y del coeficiente de difusión. Sin embargo, durante la congelación el problema se complica porque el frente sólido-líquido se mueve, la salmuera se concentra, pueden aparecer corrientes convectivas y la zona pastosa modifica el transporte. De ahí que los modelos simplificados sean útiles para entender tendencias, pero deben validarse mediante experimentos.

Por otro lado, la escala modifica el problema, por ejemplo, en la escala microscópica se analizan la exclusión de iones y la estructura del hielo. En la mesoscópica se estudia el frente de congelación dentro de una celda o de un cilindro. En la escala macroscópica interesan la energía consumida, la producción de agua, la recuperación de frío y la operación del módulo. El enfoque multiescalar busca conectar estas miradas para que el diseño final no dependa de aproximaciones aisladas.

Los materiales ayudan a cerrar el ciclo entre la simulación y el experimento. Si sus propiedades se conocen y las condiciones de frontera están controladas, el modelo puede predecir perfiles térmicos y salinos. Cuando la predicción no coincide con los datos, la discrepancia puede revelar errores en los parámetros, pérdidas térmicas, una mala calibración, una geometría inadecuada o fenómenos no considerados. El desacuerdo entre modelo y experimento no tiene por qué ser un fracaso; puede ser información, siempre que se investigue con rigor.

Las herramientas computacionales, como Python, MATLAB o COMSOL, permiten resolver modelos de distinta complejidad. Pero ningún software sustituye la comprensión física. Un mallado bien hecho no arregla una condición de frontera mal planteada, al igual que una simulación bien arreglada no convierte en verdad un supuesto débil. Por lo tanto, el modelado debe ser una conversación entre ecuaciones, materiales y mediciones.

Separación del hielo, lavado y recuperación de frío

Después de formar hielo, aún queda separarlo de la salmuera, y esta etapa puede determinar la salinidad final del agua recuperada. El hielo puede retener sal por inclusiones internas de salmuera, por líquido salino adherido a la superficie o por mezcla accidental durante la extracción.

Los materiales y dispositivos de separación buscan reducir estas fuentes de contaminación.

Pueden emplearse rejillas, mallas, canastillas, superficies inclinadas, bandejas de escurrimiento, materiales poliméricos de baja adherencia, acero inoxidable, soportes perforados o mecanismos de extracción controlada. El material debe ser compatible con bajas temperaturas, resistente a la salinidad, fácil de limpiar y suficientemente robusto. Si el hielo se rompe de forma desordenada, puede arrastrar más salmuera o dificultar la medición del rendimiento.

El lavado del hielo con una pequeña cantidad de agua fría puede reducir la salmuera superficial, aunque también consume agua y puede disminuir la recuperación. Por eso debe optimizarse. Lavar más no siempre implica mejorar el proceso; lo importante es determinar cuánto lavado mejora la calidad sin sacrificar demasiado producto. En sistemas experimentales conviene comparar hielo lavado y no lavado para cuantificar el beneficio real.

La fusión del hielo también debe controlarse, por lo que si se funde en recipientes contaminados o se mezcla con salmuera residual, se pierde calidad. Los materiales de contacto durante la fusión deben ser limpios, inertes y, preferentemente, de grado alimentario si se considera agua de consumo. La calidad del agua final depende tanto de la congelación como de toda la cadena de manejo.

Por otro lado, la recuperación de frío es una oportunidad energética; por ejemplo, el hielo producido y la salmuera fría pueden utilizarse para preenfriar la nueva alimentación. Esto se logra mediante intercambiadores de calor que mantengan separación entre corrientes. Si el sistema recupera frío, disminuye la carga que debe cubrir el refrigerador solar y, en términos de balance energético, recuperar frío puede ser tan importante como mejorar el colector o el adsorbente.

Los materiales de recuperación deben transferir calor, resistir la corrosión y evitar la contaminación cruzada. Las placas de acero inoxidable, serpentines, polímeros técnicos o intercambiadores modulares pueden ser opciones, siempre que el diseño facilite la limpieza, ya que las salmueras concentradas pueden dejar depósitos. Si la recuperación de frío introduce un ensuciamiento excesivo, el beneficio energético puede verse anulado por el mantenimiento.

Nanomateriales y materiales compuestos con criterio

En los últimos años se han propuesto nanomateriales para numerosas aplicaciones en los ámbitos del agua y de la energía. Grafeno, óxidos metálicos, nanopartículas, nanotubos, recubrimientos nanoestructurados, materiales porosos y estructuras metal-orgánicas ofrecen alta área superficial, conductividad mejorada, control de la rugosidad, propiedades antimicrobianas, estabilidad química o respuestas ópticas específicas. En la desalación por congelación pueden ser útiles, siempre que se evalúen cuidadosamente.

Una posible aplicación es mejorar la conductividad de los materiales de cambio de fase. Muchos PCM almacenan energía de manera eficiente, pero transfieren calor lentamente. La adición de grafito expandido, nanopartículas metálicas, óxidos o estructuras de carbono puede aumentar la conductividad. Sin embargo, el beneficio debe compararse con el costo, la estabilidad, la posible sedimentación, la compatibilidad química y la seguridad.

Otra aplicación se relaciona con recubrimientos nanoestructurados para modificar la humectabilidad o la adhesión del hielo. Algunas superficies inspiradas en la naturaleza reducen el contacto efectivo con el agua o el hielo. En la congelación salina, sin embargo, las sales pueden depositarse, alterar la textura y disminuir el rendimiento; además, la separación del hielo puede dañar estructuras nanométricas, por lo que la durabilidad vuelve a ser crítica.

Los materiales porosos avanzados, como algunos MOF, pueden actuar como adsorbentes en la refrigeración solar. Su ventaja es que pueden diseñarse con porosidad y química superficial específicas; por otro lado, su limitación es que muchos todavía enfrentan retos de costo, de estabilidad frente a la humedad, de producción a gran escala y de compatibilidad con ciclos térmicos reales. Para la investigación básica son fascinantes; para la aplicación comunitaria deben pasar las pruebas de la realidad.

También se han explorado materiales con propiedades antimicrobianas y, aunque la desalación por congelación se centra en las sales, el agua real puede contener microorganismos o materia orgánica. Los materiales

antimicrobianos podrían ser útiles en componentes de contacto, siempre que no liberen sustancias peligrosas ni supongan riesgos ambientales. La seguridad del agua recuperada debe prevalecer por encima de cualquier entusiasmo por la novedad.

En conclusión, un nanomaterial se justifica cuando resuelve un problema concreto de desempeño, y aunque la innovación científica necesita novedad, la tecnología útil, además, requiere estabilidad, un costo razonable y seguridad.

Selección integrada de materiales

La selección de materiales para la desalación por congelación asistida con refrigeración solar debe basarse en una matriz de criterios. Lo primero es identificar la función que tendrá el material: conducir, aislar, observar, adsorber, absorber, almacenar, medir, proteger o separar. Después vienen la compatibilidad con agua salina y con bajas temperaturas, el impacto en la eficiencia energética, la durabilidad ante ciclos repetidos, el costo, la disponibilidad, la seguridad y la facilidad de mantenimiento.

Para superficies frías e intercambiadores, los criterios principales son la conductividad térmica, la resistencia a la corrosión, la resistencia mecánica, la compatibilidad con recubrimientos, la facilidad de limpieza y el costo. Para aislantes, importan la baja conductividad, la resistencia a la humedad, la estabilidad dimensional y el proceso de montaje. Para celdas transparentes, se requieren claridad óptica, resistencia mecánica, sellado y compatibilidad térmica. Para los sensores, importan la precisión, la calibración, la respuesta, el encapsulado y la estabilidad.

En adsorbentes y absorbentes cambian las prioridades: capacidad, temperatura de regeneración, presión de operación, cinética, estabilidad cíclica, seguridad del refrigerante, costo y disponibilidad. En PCM se revisan la temperatura de cambio de fase, el calor latente, la conductividad, el subenfriamiento, la segregación, la encapsulación y la vida útil. En recubrimientos, la adhesión al hielo, la durabilidad, la resistencia química, el efecto térmico y la posible contaminación pesan más que una sola propiedad superficial.

Otro punto que merece atención es la disponibilidad local, por lo que una tecnología pensada para comunidades con infraestructura limitada no

puede depender por completo de materiales difíciles de conseguir o de reemplazar. En el laboratorio se pueden probar materiales avanzados; al escalar, surgen las cadenas de suministro. Entonces, el mejor material para una publicación científica no siempre es el mejor para una comunidad. La solución debe poder comprarse, limpiarse, repararse y entenderse.

La evaluación también debe incluir aspectos de sostenibilidad y, en este sentido, algunos materiales pueden mejorar la eficiencia, pero también pueden tener un alto impacto ambiental en su producción. Otros pueden ser baratos, pero poco duraderos y generar residuos. Un enfoque de ciclo de vida permitiría comparar alternativas con mayor claridad.

Conclusiones

La desalación por congelación asistida con refrigeración solar combina dos ideas potentes: aprovechar el rechazo de sales durante la formación de hielo y emplear energía solar para generar el frío necesario. Convertir esa idea en tecnología exige mucho más que simplemente congelar agua salina. Hay que controlar el crecimiento del hielo, reducir las inclusiones de salmuera, separar adecuadamente las fases, recuperar el frío, medir con precisión y evaluar el sistema completo.

Los materiales participan en todas esas etapas; desde las superficies de congelación regulan la extracción de calor. Los intercambiadores influyen en la eficiencia térmica. Los aislantes reducen pérdidas. Los recubrimientos pueden facilitar el desprendimiento y la protección. Los adsorbentes y absorbentes convierten el calor solar en frío. Los materiales de cambio de fase ayudan a estabilizar la operación. Los sensores hacen visible lo que ocurre dentro del sistema. Los materiales de separación y recuperación afectan la calidad final del agua.

La innovación material no es una competencia por usar el compuesto más novedoso. Un material aporta valor cuando resuelve un problema concreto del sistema: mejora la transferencia de calor, reduce la corrosión, facilita la limpieza, aumenta la durabilidad, disminuye el consumo energético, mejora la calidad del hielo o simplifica la operación.

La desalación por congelación no desplazará de inmediato a las tecnologías convencionales. Puede, en cambio, complementar el abanico

de soluciones, sobre todo en aplicaciones descentralizadas, modulares o alimentadas por fuentes renovables. Su pertinencia deberá demostrarse con datos: consumo específico, salinidad final, estabilidad, costo, mantenimiento, seguridad y desempeño en condiciones reales.

En el nexo agua-energía, las soluciones futuras tendrán que ser eficientes, limpias, medibles y socialmente viables. Los materiales innovadores pueden contribuir a ese camino si se integran con rigor científico y sentido práctico. El objetivo no es producir hielo por producir hielo, sino transformar un fenómeno físico en una herramienta para obtener agua donde cada litro importa.

Referencias

Castillo-Téllez, B., Pilatowsky Figueroa, I., Allaf, K., Marzoug, R. & Castillo Téllez, M. (2020). Experimental analysis of saline diffusion during saltwater freezing for desalination purposes. *Water and Environment Journal*, *34*(4), 929–936. https://doi.org/10.1111/wej.12603

Castillo-Téllez, B., Romero, R. J., Allaf, K. & Pilatowsky-Figueroa, I. (2022). Saline diffusion modeling for sodium chloride aqueous solutions: Freezing for desalination purposes. *Separations*, *9*(10), 272. https://doi.org/10.3390/separations9100272

Donadei, V., Koivuluoto, H., Sarlin, E. & Vuoristo, P. (2022). Durability of lubricated icephobic coatings under various environmental stresses. *Polymers*, *14*(2), 303. https://doi.org/10.3390/polym14020303

Guo, Y., He, R., Wang, Y., Zhang, J. & Li, X. (2025). A review on phase-change materials (PCMs) in solar-powered refrigeration systems. *Energies*, *18*(6), 1547. https://doi.org/10.3390/en18061547

Huang, X., Mandal, J., Xu, J. & Raman, A. P. (2022). Passive freezing desalination driven by radiative cooling. *Joule*, *6*(12), 2762–2775. https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.10.009

Janajreh, I., Zhang, H., El Kadi, K. & Ghaffour, N. (2023). Freeze desalination: Current research development and future prospects. *Water Research*, *229*, 119389. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119389

Jones, E., Qadir, M., Van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V. & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global out-

look. *Science of the Total Environment*, *657*, 1343–1356. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076

Kalista, B., Shin, H., Cho, J. & Jang, A. (2018). Current development and future prospect review of freeze desalination. *Desalination*, *447*, 167–181. https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.09.009

Kim, J., Park, K., Yang, D. R. & Hong, S. (2019). A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. *Applied Energy*, *254*, 113652. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113652

Nistal, A., García, E., Velasco, F. & Bautista, A. (2024). On the durability of icephobic coatings: A review. *Materials*, *17*(1), 235. https://doi.org/10.3390/ma17010235

Rahman, M. S., Ahmed, M. & Chen, X. D. (2006). Freezing-melting process and desalination: I. Review of the state-of-the-art. *Separation and Purification Reviews*, *35*(1), 59–96. https://doi.org/10.1080/15422110600671734

Sezer, N. & Bayhan, S. (2025). Integrated solar-powered freeze desalination and water electrolysis system with energy recovery and storage for sustainable agriculture in desert environments. *Desalination*, *595*, 118321. https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118321

Shokri, A. & Sanavi Fard, M. (2023). Techno-economic assessment of water desalination: Future outlooks and challenges. *Process Safety and Environmental Protection*, *169*, 564–578. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.007

Sola, I., Sáez, C. A. & Sánchez-Lizaso, J. L. (2021). Evaluating environmental and socio-economic requirements for improving desalination development. *Journal of Cleaner Production*, *324*, 129296. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129296

UNESCO & UN-Water. (2024). *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace*. UNESCO.

UN-Water. (2024). *Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all. United Nations*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/

Voutchkov, N. (2018). Energy use for membrane seawater desalination: Current status and trends. *Desalination*, *431*, 2–14. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.033

Zahed, A. H. & Bashir, M. D. (1990). A case study of a solar energy transfer and storage system in a freeze desalination project in Yanbu, Saudi Arabia. *Solar & Wind Technology*, *7*(4), 441–446. https://doi.org/10.1016/0741-983X(90)90028-Z

Capítulo **12**

Modelado computacional para la gestión eficiente de energía en microrredes híbridas: Fundamentos, avances y perspectivas

Cristian Daniel Chiñas Palacios[1]
Jesús Águila León[1]
Hugo Javier Coss y León Monterde[1]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008097

[1] Departamento de Estudios del Agua y de la Energía. Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara

Resumen

La creciente incorporación de fuentes de energía renovables —como la solar fotovoltaica y la eólica— en los sistemas eléctricos locales representa uno de los avances más significativos hacia la sostenibilidad energética del siglo XXI. Sin embargo, la naturaleza intermitente de estas fuentes plantea desafíos importantes para garantizar un suministro eléctrico confiable y eficiente. En este contexto, las microrredes híbridas emergen como una solución tecnológica integral que combina múltiples fuentes de energía con sistemas de almacenamiento y una gestión inteligente mediante algoritmos computacionales. Este capítulo explora los fundamentos, los avances recientes más significativos y las perspectivas de la inteligencia artificial (IA) y el modelado computacional aplicados a la gestión energética de microrredes híbridas. Se describen técnicas de optimización bioinspiradas —como los algoritmos de enjambre de partículas (PSO), el optimizador de manada de lobo gris (GWO) y los algoritmos genéticos (GA)—, así como modelos de redes neuronales artificiales (RNA) empleados para predecir la producción de energía, gestionar baterías y controlar el flujo de potencia. Se presentan también sistemas de monitoreo de bajo costo basados en plataformas de código abierto que permiten supervisar en tiempo real el desempeño de microrredes. Los resultados de investigaciones desarrolladas durante una estancia de investigación en el Laboratorio de Energías Renovables (LabDER) de la Universidad Politécnica de Valencia (UVP) dentro del programa de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía (MCIAE) en el Centro Universitario de Tonalá (CUT) de la Universidad de Guadalajara (UDG) sirven como contexto del proyecto de investigación en microrredes híbridas de generación de energía renovable.

Introducción

Imagina que el sol que calienta los techos de tu ciudad pueda transformarse en electricidad suficiente para alimentar casas, escuelas y negocios, incluso cuando las nubes ocultan el cielo o cae la noche. Este es, precisamente, el objetivo de las microrredes híbridas de energía: sistemas eléctricos inteligentes y autónomos que combinan energía solar, eólica, biomasa y baterías de almacenamiento para garantizar el suministro eléctrico de manera confiable, económica y limpia.

En México y en el mundo, la transición energética es una prioridad urgente. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), la capacidad solar fotovoltaica a nivel global superó los 1 000 Gigawatts en 2022, y se espera que continúe creciendo a tasas del 20 % anual. Sin embargo, integrar energía solar o eólica en los sistemas eléctricos no es sencillo: el sol no brilla siempre con la misma intensidad, ni el viento sopla con la misma fuerza. Esta variabilidad hace necesario el uso de herramientas computacionales avanzadas que ayuden a predecir cuánta energía se producirá, cuánta se consumirá y cuánta deberá almacenarse.

Es aquí donde entra en juego la inteligencia artificial (IA). Inspirada en el funcionamiento del cerebro humano y en los comportamientos colectivos de la naturaleza —como las manadas de lobos o los enjambres de abejas—, la IA ha desarrollado herramientas capaces de aprender patrones complejos en datos energéticos y tomar decisiones de gestión que maximizan la eficiencia y reducen los costos. Este capítulo tiene como propósito explicar, de manera accesible y rigurosa, cómo estas tecnologías están transformando la forma en que manejamos la energía en comunidades, industrias e instituciones.

El contenido está organizado en torno a cuatro grandes preguntas: ¿Qué es una microrred híbrida y cómo funciona? ¿Cómo se modela computacionalmente una planta de generación de energía? ¿Qué herramientas de inteligencia artificial se aplican para gestionar y optimizar la energía? y ¿Cómo se monitorean en tiempo real estos sistemas? A lo largo del capítulo se describen resultados obtenidos en investigaciones realizadas en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara, publicadas en revistas científicas de alto impacto.

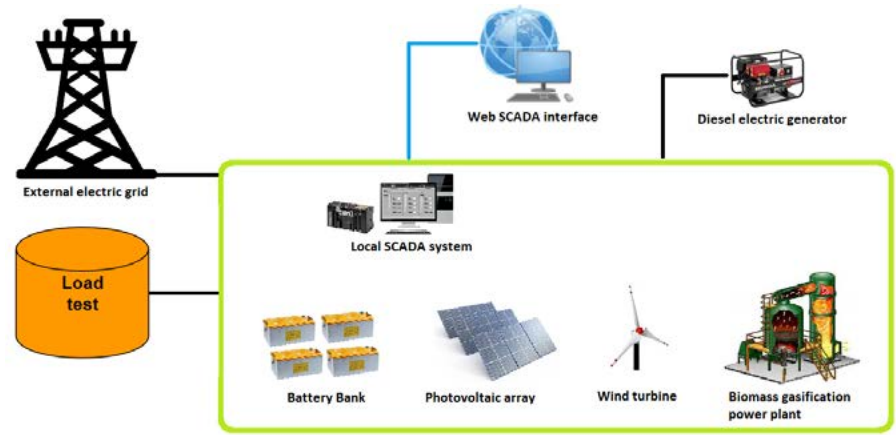
¿Qué es una microrred híbrida?

Una microrred es un pequeño sistema eléctrico que puede funcionar de forma independiente o conectada a la red eléctrica pública. El adjetivo 'híbrida' indica que combina dos o más fuentes de energía: típicamente paneles solares fotovoltaicos, aerogeneradores, generadores de biogás o biomasa, y bancos de baterías para almacenamiento.

Lo que hace especial a una microrred es su capacidad de operar en modo isla, es decir, sin depender de la red eléctrica convencional. Esto resulta especialmente valioso en comunidades rurales o remotas donde extender las líneas eléctricas convencionales sería demasiado costoso, o en instalaciones críticas —hospitales, centros de datos, campus universitarios— donde los apagones son inaceptables.

En el LabDER de la UPV, se opera una microrred experimental que combina paneles solares, un generador de síntesis de gas (syngas) a partir de biomasa y baterías de litio-ion. Esta plataforma sirve como banco de pruebas para desarrollar y validar algoritmos de gestión energética, y sus resultados han sido publicados en revistas internacionales como Energy Conversion and Management y Heliyon (Aguila-Leon et al., 2022; Vargas-Salgado et al., 2019).

Figura 1. *Diagrama esquemático de la arquitectura de la microrred del LabDER UPV. En ella se muestran los paneles solares, el generador de syngas, el banco de baterías, el sistema SCADA y las cargas conectadas*



El reto de la variabilidad: por qué necesitamos modelos matemáticos

Pensemos en un día típico de verano en Guadalajara: por la mañana, el sol brilla con intensidad y los paneles generan mucha electricidad; al mediodía, una nube pasa y la generación cae a la mitad; por la tarde, el consumo eléctrico sube porque la gente regresa a casa y enciende aparatos eléctricos. ¿Cómo se toman decisiones en tiempo real para garantizar que siempre haya electricidad disponible?

La respuesta está en los modelos matemáticos y computacionales. Un modelo es una representación simplificada —pero suficientemente precisa— del comportamiento de un sistema real. En el caso de una microrred, necesitamos modelos que describan cómo varía la producción solar a lo largo del día, cómo se carga y descarga una batería, y cuánta energía consume un generador de biomasa según su velocidad de operación.

Una contribución clave de las investigaciones del grupo es el modelado de una planta de gasificación de biomasa. La gasificación es un proceso en el que residuos agrícolas o forestales —como el aserrín, el bagazo de agave o astillas de madera— se convierten en un gas combustible llamado syngas, que a su vez se utiliza para generar electricidad. Modelar matemáticamente este proceso es complejo porque involucra reacciones químicas, variaciones de temperatura y cambios en la composición del gas.

Las redes neuronales artificiales: aprendiendo de los datos

Una red neuronal artificial está inspirada en el cerebro humano. Así como el cerebro aprende reconociendo patrones —por ejemplo, identificar el rostro de una persona, detectar fraudes bancarios o realizar diagnósticos médicos —, una RNA aprende a partir de datos históricos para luego hacer predicciones o clasificaciones.

Estructuralmente, una RNA se compone de capas de 'neuronas' (nodos matemáticos) interconectadas. La capa de entrada recibe los datos —por ejemplo, temperatura, irradiación solar, hora del día—; las capas

ocultas procesan esa información mediante funciones matemáticas; y la capa de salida produce el resultado deseado, como la potencia eléctrica que se generará.

En la investigación publicada en Energy Conversion and Management, se diseñó una RNA tipo cascada hacia adelante (feed-forward) para modelar la producción de syngas de una planta de gasificación de biomasa. El modelo fue entrenado con datos experimentales y logró predecir la composición del gas con un error menor al 5%, lo que lo hace suficientemente preciso para tomar decisiones de gestión energética en tiempo real (Chiñas-Palacios et al., 2021).

Tabla 1. *Parámetros utilizados para los modelos de la RNA en el artículo publicado en Energy Conversion and Management (2021).*

Particulars	**FF-PSO**	**FF-BP**	**CF-P**
Type of ANN	Feed Forward Neural Network	Feed Forward Neural Network	Cascade Forward Neural Network
Training Algorithm	Particle Swarm Optimization	Back Propagation	Propagation
Particle Population	10 – 1000	-	-
C1	1.5 – 2.5	-	-
C2	1.5 – 2.5	-	-
Function for performance	MSE	MSE	MSE
Number of Input Layer	4 – 9	4 – 9	4 – 9
Number of Hidden Layer	1	1	1
Number of Hidden Neurons	1 – 100	1 – 100	1 – 100
Learning Iterations	1000	1000	1000

Optimización bio-inspirada: Aprender de la naturaleza para gestionar energía

¿Cómo encuentra un lobo a su presa? Trabaja en manada: algunos lobos exploran el territorio mientras otros atacan desde distintos flancos, adaptando su estrategia conforme obtienen nueva información. Este comportamiento colectivo e inteligente ha inspirado uno de los algoritmos de optimización más poderosos en ingeniería: el Optimizador de Manada de Lobo Gris (GWO, por sus siglas en inglés).

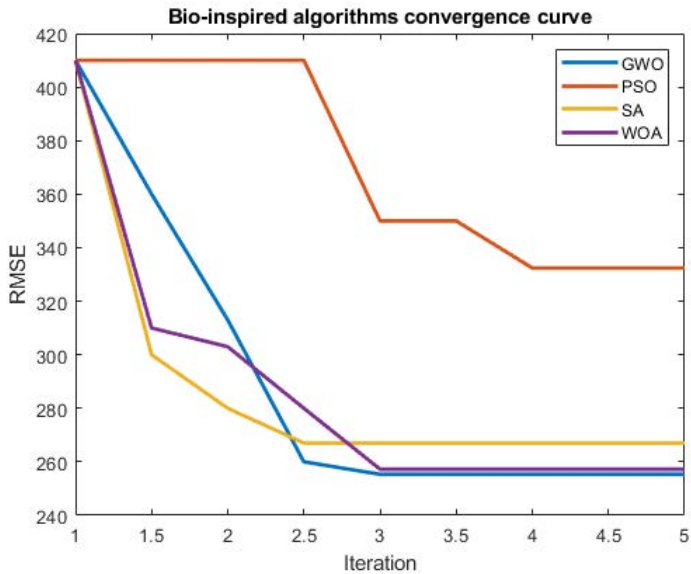
Otro ejemplo de la naturaleza es el comportamiento de las partículas en un enjambre —como un banco de peces o una bandada de aves— que da nombre al algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO). En este caso, cada 'partícula' representa una posible solución al problema de optimización y se mueve por el espacio de soluciones atraída tanto por su mejor posición histórica como por la mejor posición encontrada por todo el enjambre.

En el contexto de microrredes energéticas, optimizar significa encontrar la mejor estrategia para distribuir la energía disponible entre las distintas fuentes y cargas, minimizando costos o maximizando la confiabilidad del sistema. Los algoritmos PSO, GWO y GA han sido aplicados con éxito en varias investigaciones del grupo:

- Control de convertidores DC-DC: Se optimizaron los parámetros de controladores PID para convertidores elevadores de voltaje, que son los dispositivos electrónicos que adaptan el voltaje de salida de los paneles solares para alimentar la red eléctrica. El GWO demostró una convergencia más rápida que el PSO y el GA en este problema (Aguila-Leon et al., 2021).
- Seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT): Los paneles solares generan su máxima potencia únicamente bajo condiciones ambientales específicas. Un controlador MPPT ajusta continuamente el punto de operación del panel para extraer siempre la mayor cantidad de energía posible. El GWO optimizó el controlador MPPT con un desempeño superior al 20 % comparado con los métodos tradicionales (Aguila-Leon et al., 2022).

- Gestión energética de la microrred: Se desarrolló un modelo de gestión energética que combina PSO con una RNA para decidir, en cada momento, cuánta energía debe aportar cada fuente y cuánto debe cargarse o descargarse del banco de baterías. El resultado fue un sistema capaz de reducir el costo operativo hasta en un 18 % comparado con estrategias convencionales de consumo eléctrico (Aguila-Leon et al., 2022).

Figura 2. *Curva de convergencia del RMSE ante los algoritmos bio-inspirados: GWO, PSO, SA y WOA.*



Tomado del artículo de Expert Systems with Applications (2022).

Monitoreo en tiempo real: los ojos del sistema

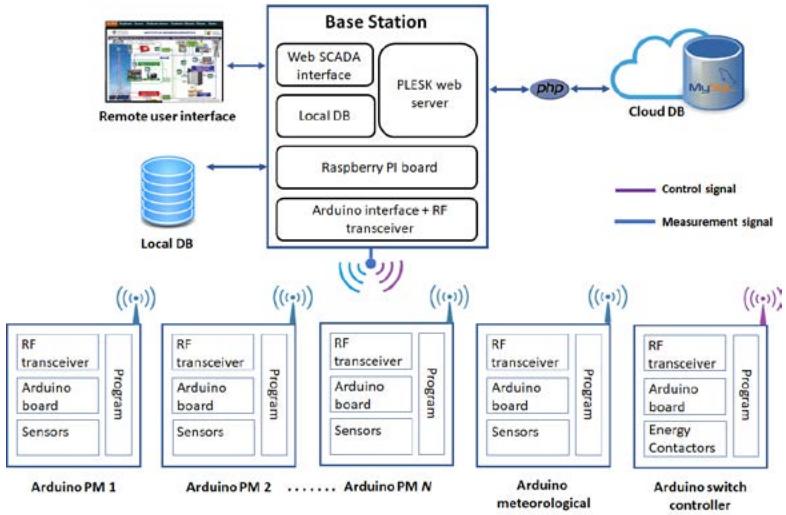
Un sistema de gestión energética, por más sofisticado que sea, solo puede tomar buenas decisiones si cuenta con información precisa y actualizada sobre el estado de la microrred: ¿cuánta energía están produciendo los paneles ahora mismo? ¿A qué temperatura está el inversor? ¿Cuánto están consumiendo las cargas? Responder estas preguntas requiere un sistema de monitoreo confiable y, si es posible, de bajo costo.

En el LabDER de la UPV se diseñó e implementó un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) basado en software de código abierto y microcontroladores de bajo costo tipo Arduino. Este sistema permite monitorear en tiempo real, desde cualquier dispositivo con acceso a internet, variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia activa y frecuencia, así como variables ambientales como temperatura e irradiación solar (Vargas-Salgado et al., 2019).

Posteriormente, se desarrolló un medidor de potencia inalámbrico basado en Arduino —denominado AWPM (Arduino Wireless Power Meter)— que comunica los datos de consumo eléctrico mediante protocolo Modbus TCP/IP. Este dispositivo representa una alternativa económica a los medidores comerciales, con un costo aproximado de 50 USD frente a los 500-800 USD de equipos equivalentes en el mercado, y una precisión comparable con un error menor al 2 % (Chiñas-Palacios et al., 2020).

Más recientemente, se ha incorporado tecnología IoT (Internet of Things) mediante microcontroladores Raspberry Pi Pico W para el monitoreo de plantas fotovoltaicas en azotea. El sistema registra temperatura de los paneles, radiación solar, temperatura del inversor y parámetros eléctricos, y almacena los datos en la nube para su análisis posterior (Lara-Vargas et al., 2025).

Figura 3. *Diagrama general de la arquitectura del sistema SCADA web desarrollado para el LabDER.*



Tomado del artículo de Heliyon (2019).

Gestión de carga residencial y seguridad en redes inteligentes

Más allá de la generación, la gestión de la demanda eléctrica es igualmente importante para la eficiencia energética. Un sistema de gestión de carga residencial inteligente clasifica los aparatos eléctricos del hogar según su nivel de prioridad y programa su encendido o apagado para evitar picos de consumo que encarecen la tarifa eléctrica.

En una investigación publicada en la revista *Sustainable Computing, Informatics and Systems*, se diseñó un sistema de gestión de carga residencial que incorpora criptografía híbrida para proteger los datos de consumo de los usuarios ante posibles ciberataques. El sistema organiza las cargas eléctricas en tres categorías: cargas críticas (que nunca pueden apagarse), cargas controlables (como lavadoras o lavavajillas) y cargas

de confort (como aires acondicionados). El algoritmo de optimización distribuye la energía a lo largo del día, limitando el consumo y minimizando el costo del recibo eléctrico sin afectar la comodidad del usuario (Chiñas-Palacios et al., 2021).

Tabla 2. *Resultados del modelo Universal Smart Energy Meter (USEM) contra el modelo propuesto del Smart Residential Security Load Management.*

Number of residencies	Power usage (kW)		Execution time (s)	Total power consumption (kW)	
	SRS-LM	USEM		SRS-LM	USEM
5	11	12	100	41	42
10	14	15	150	42	43
15	19	21	200	43	45
20	28	30	250	45	48
25	41	45	300	50	52

Tomado del artículo publicado en Sustainable Computing, Informatics and Systems (2021).

Perspectivas y retos futuros

Los avances descritos en este capítulo representan solo el inicio de una transformación profunda en la forma en que generamos, distribuimos y consumimos energía. Los próximos años traerán consigo nuevas oportunidades y desafíos.

En primer lugar, la integración de sistemas de aprendizaje profundo (deep learning) —variantes más complejas de las RNA con múltiples capas ocultas— permitirá modelos predictivos aún más precisos para la gestión energética. Ya se han explorado algoritmos de optimización de nueva generación, como el Algoritmo de Optimización del Apareamiento de Mosquitos (MMSO), que ha demostrado superar al PSO y al GWO en velocidad de convergencia para problemas de clasificación de modos de operación en microredes (Aguila-Leon et al., 2026).

En segundo lugar, la masificación del IoT y la reducción de costos de sensores y microcontroladores abrirá la puerta al despliegue de redes de monitoreo energético de bajo costo en comunidades rurales de México

y América Latina, regiones donde el acceso a electricidad confiable sigue siendo un desafío. Finalmente, la integración del nexo agua-energía —considerando el consumo energético de los sistemas de bombeo y tratamiento de agua— representa una línea de investigación de gran potencial para el diseño de comunidades verdaderamente sostenibles.

Conclusiones

La inteligencia artificial y el modelado computacional han transformado la manera en que diseñamos, operamos y optimizamos los sistemas de energía. A lo largo de este capítulo hemos recorrido, desde los fundamentos conceptuales de las microrredes híbridas hasta las técnicas avanzadas de optimización bio-inspirada y las herramientas de monitoreo en tiempo real, pasando por los modelos de redes neuronales para la predicción de la producción energética.

Las investigaciones realizadas en el extranjero sirvieron como una alianza estratégica para fortalecer al Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara, dentro de las líneas de investigación de microrredes eléctricas renovables. Dichas investigaciones demostraron que es posible desarrollar soluciones tecnológicas de alto impacto con recursos accesibles: algoritmos de código abierto, microcontroladores de bajo costo y plataformas web gratuitas. Estos resultados no son solo avances académicos; son herramientas concretas que pueden contribuir a la transición energética de México y a la democratización del acceso a la energía. El camino hacia sistemas energéticos sostenibles es largo y requiere la colaboración entre investigadores, ingenieros, tomadores de decisiones y comunidades. La inteligencia artificial es una herramienta poderosa en ese camino, pero su verdadero valor reside en la capacidad de las personas para aprovecharla en beneficio del bien común.

Referencias

Aguila-Leon, J., Vargas-Salgado, C., Chiñas-Palacios, C. D. & Díaz-Bello, D. (2021). Particle swarm optimization, genetic algorithm and grey wolf optimizer algorithms performance comparative for a DC-DC

boost converter PID controller. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, *6*(1), 959–967.

Aguila-Leon, J., Vargas-Salgado, C., Chiñas-Palacios, C. D. & Díaz-Bello, D. (2022). Energy management model for a standalone hybrid microgrid through a particle swarm optimization and artificial neural networks approach. *Energy Conversion and Management*, *267*, 115920. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115920

Aguila-Leon, J., Vargas-Salgado, C., Chiñas-Palacios, C. D. & Díaz-Bello, D. (2022). Solar photovoltaic maximum power point tracking controller optimization using grey wolf optimizer: A performance comparison between bio-inspired and traditional algorithms. *Expert Systems with Applications*, *211*, 118700. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118700

Aguila-Leon, J., Vargas-Salgado, C., Díaz-Bello, D. & Lara-Vargas, F. (2026). A novel binary classification neural network optimized by the mosquito mating swarm optimization algorithm for predicting microgrid operational modes. *Energy Engineering*, *123*(1), 1–20.

Chiñas-Palacios, C. D., Aguila-Leon, J., Vargas-Salgado, C., Hurtado-Pérez, E. & García, E. X. M. (2021). A smart residential security assisted load management system using hybrid cryptography. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, *32*, 100592. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100592

Chiñas-Palacios, C. D., Vargas-Salgado, C., Aguila-Leon, J. & Hurtado-Pérez, E. (2020). Arduino based smart power meter: A low-cost approach for academic and research applications. Proceedings of the XVI International Congress of Electronics and Advanced Technologies - CIETA 2020.

Chiñas-Palacios, C. D., Vargas-Salgado, C., Aguila-Leon, J. & Hurtado-Pérez, E. (2021). A cascade hybrid PSO feed-forward neural network model of a biomass gasification plant for covering the energy demand in an AC microgrid. *Energy Conversion and Management*, *232*, 113896. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113896

Díaz-Bello, D., Vargas-Salgado, C., Aguila-Leon, J. & Alfonso-Solar, D. (2025). Smart energy management for hybrid systems: A genetic algorithm in response to market volatility. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, *13*(2), 1100497.

Lara-Vargas, F., Vargas-Salgado, C., Aguila-Leon, J., et al. (2025). *Implementing IoT technology for energy optimization in rooftop solar PV plants: A concentrated validation study*. Communications in Computer and Information Science. Springer.

Vargas-Salgado, C., Aguila-Leon, J., Chiñas-Palacios, C. D. & Hurtado-Pérez, E. (2019). Low-cost web-based supervisory control and data acquisition system for a microgrid testbed: A case study in design and implementation for academic and research applications. *Heliyon, 5*(9), e02586. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02586

Capítulo 13

Implementación de la Norma ISO 50001 en CuTonalá: Una estrategia para la gestión energética y la sustentabilidad

Araceli Sánchez Rosales[1]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008103

[1] Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara

Resumen

El incremento en la demanda energética y la necesidad de reducir los impactos ambientales asociados al consumo de energía han impulsado a las organizaciones a adoptar estrategias orientadas a la eficiencia energética y la sustentabilidad. En este contexto, la norma ISO 50001 se ha consolidado como una herramienta internacional que permite establecer sistemas de gestión energética enfocados en la mejora continua del desempeño energético. El presente capítulo expone una propuesta para la implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001 en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. A partir del análisis de las condiciones energéticas de la institución, se describen los principales elementos requeridos para desarrollar una política energética, establecer indicadores de desempeño y promover una cultura organizacional orientada al uso responsable de la energía. Asimismo, se presentan los beneficios potenciales de la aplicación de esta norma en instituciones de educación superior, destacando la reducción de costos operativos, la disminución de emisiones contaminantes y el fortalecimiento del compromiso ambiental universitario. Finalmente, se reflexiona sobre el papel que las universidades desempeñan como agentes de cambio en la construcción de modelos de desarrollo más sostenibles.

Introducción

La energía es un recurso indispensable para el desarrollo de las actividades humanas. Desde la iluminación de hogares y edificios hasta el funcionamiento de industrias, hospitales y centros educativos, prácticamente todos los aspectos de la vida moderna dependen de un suministro energético confiable. Sin embargo, el crecimiento constante de la demanda de energía y los impactos ambientales asociados a su producción y con-

sumo han convertido la eficiencia energética en uno de los principales desafíos del siglo XXI.

Las universidades no son ajenas a esta realidad. Además de cumplir con su función educativa y de generación de conocimiento, estas instituciones tienen la responsabilidad de promover prácticas sostenibles que contribuyan al cuidado del medio ambiente. El consumo de energía en aulas, laboratorios, bibliotecas, oficinas administrativas y sistemas de climatización representa una oportunidad importante para implementar estrategias que permitan reducir costos y minimizar impactos ambientales.

En este contexto, la norma internacional ISO 50001 surge como una herramienta que ayuda a las organizaciones a gestionar de manera eficiente el uso de la energía mediante la mejora continua de su desempeño energético. Su aplicación permite identificar oportunidades de ahorro, establecer indicadores de seguimiento y fomentar una cultura organizacional orientada a la sustentabilidad.

El presente capítulo presenta el caso del Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá), perteneciente a la Universidad de Guadalajara, una institución que ha impulsado diversos proyectos relacionados con el cuidado del medio ambiente y el uso responsable de los recursos. A partir de una investigación desarrollada en el marco de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía, se analiza la propuesta de implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001, destacando sus beneficios potenciales, los retos asociados a su adopción y su contribución al desarrollo sostenible. Más allá de una propuesta técnica, este trabajo busca mostrar cómo las instituciones de educación superior pueden convertirse en actores clave en la construcción de una cultura energética responsable, capaz de generar beneficios económicos, ambientales y sociales para las generaciones presentes y futuras.

La energía: Un reto para las universidades del siglo XXI

La energía forma parte de prácticamente todas las actividades que realizamos a diario. Desde encender una computadora hasta iluminar un aula o mantener en funcionamiento un laboratorio, las instituciones educativas

dependen de un suministro constante de energía para cumplir con sus funciones académicas y administrativas.

Durante las últimas décadas, el crecimiento de la población, el desarrollo tecnológico y el aumento en la demanda de servicios han provocado un incremento significativo en el consumo energético a nivel mundial (Secretaría de Energía, 2016). Este escenario ha generado preocupación debido a los impactos ambientales asociados a la producción y consumo de energía, especialmente cuando proviene de fuentes fósiles que contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero y al cambio climático.

Ante esta realidad, la eficiencia energética se ha convertido en una de las estrategias más importantes para promover el desarrollo sostenible. Más que consumir menos energía, la eficiencia energética implica utilizarla de manera inteligente, obteniendo los mismos o mejores resultados con un menor consumo de recursos. Las universidades desempeñan un papel fundamental en este desafío. Además de formar profesionistas y generar conocimiento científico, tienen la responsabilidad de actuar como ejemplo para la sociedad mediante la adopción de prácticas sostenibles. Los campus universitarios concentran una gran diversidad de actividades que demandan energía, incluyendo iluminación, equipos de cómputo, sistemas de climatización, laboratorios, bibliotecas y áreas administrativas.

En México, diversas instituciones de educación superior han comenzado a implementar programas orientados al ahorro energético y al uso eficiente de los recursos. Estas acciones no solamente permiten reducir costos operativos, sino que también fortalecen la responsabilidad ambiental institucional y contribuyen al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible. En este contexto, resulta necesario que las universidades incorporen herramientas que les permitan planificar, monitorear y mejorar continuamente su desempeño energético. Una de las alternativas más reconocidas a nivel internacional es la implementación de Sistemas de Gestión Energética basados en la norma ISO 50001, cuyo propósito es establecer procesos organizados que favorezcan el uso eficiente de la energía y la mejora continua.

CUTonalá y su compromiso con la sustentabilidad

Las universidades desempeñan un papel fundamental en la construcción de una sociedad más sostenible. Además de formar profesionales y generar conocimiento científico, tienen la capacidad de impulsar cambios positivos mediante la adopción de prácticas responsables en el uso de los recursos naturales. El Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá), perteneciente a la Universidad de Guadalajara, nació con una visión innovadora orientada a la investigación, la formación académica y el desarrollo de proyectos relacionados con la sustentabilidad. Desde sus inicios, este campus ha impulsado programas educativos y líneas de investigación vinculadas con el agua, la energía y el medio ambiente, consolidándose como un espacio comprometido con los retos ambientales contemporáneos.

CUTonalá inició actividades en 2012 para atender la creciente demanda de educación superior en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Conforme aumentó su matrícula estudiantil y se amplió su infraestructura, también crecieron las necesidades relacionadas con el consumo de energía eléctrica. La operación diaria de aulas, laboratorios, bibliotecas, equipos de cómputo, sistemas de iluminación y aire acondicionado representa una demanda energética considerable que requiere una gestión adecuada.

Uno de los aspectos más relevantes del campus es su vocación hacia la sustentabilidad. Diversos programas académicos incorporan contenidos relacionados con el cuidado del medio ambiente, la eficiencia energética y el desarrollo sostenible. Asimismo, la institución ha promovido acciones encaminadas a la separación de residuos, el aprovechamiento responsable de los recursos y la generación de conciencia ambiental entre estudiantes, docentes y personal administrativo.

Sin embargo, el crecimiento de cualquier institución educativa trae consigo nuevos desafíos. A medida que aumenta la infraestructura física y tecnológica, resulta indispensable implementar mecanismos que permitan monitorear, controlar y optimizar el uso de la energía. De lo contrario, el incremento en el consumo energético puede traducirse en mayores costos operativos y en un aumento de los impactos ambientales asociados.

Ante este escenario, surge la necesidad de adoptar herramientas de gestión que permitan transformar el consumo energético en una oportunidad de mejora continua. La implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001 representa una alternativa estratégica para fortalecer las acciones de sustentabilidad ya existentes y consolidar una cultura institucional orientada al uso eficiente de la energía.

Más allá del ahorro económico, una adecuada gestión energética permite a las universidades convertirse en ejemplos de responsabilidad ambiental, demostrando que es posible combinar crecimiento académico, innovación y sostenibilidad en beneficio de las generaciones presentes y futuras.

CUTonalá ya posee una identidad institucional vinculada con la sustentabilidad y el cuidado del medio ambiente. Un ejemplo reciente del compromiso institucional de CUTonalá con la sustentabilidad es la implementación del denominado "Huerto Solar", un proyecto orientado al aprovechamiento de la energía solar como fuente renovable para contribuir a la reducción del consumo de energía eléctrica convencional. Esta iniciativa representa un avance importante en la transición hacia modelos energéticos más sostenibles dentro de la universidad.

La incorporación de tecnologías basadas en energías renovables fortalece las acciones institucionales relacionadas con la eficiencia energética y complementa los esfuerzos dirigidos a la protección del medio ambiente. Asimismo, permite que estudiantes, académicos y personal administrativo observen de manera directa la aplicación de soluciones energéticas sustentables dentro de su propio entorno educativo.

La existencia del Huerto Solar demuestra que CUTonalá no solo promueve la sustentabilidad desde el ámbito académico y la investigación, sino también mediante acciones concretas orientadas a reducir su impacto ambiental. En este sentido, proyectos de esta naturaleza pueden integrarse de manera estratégica a futuros Sistemas de Gestión Energética basados en la norma ISO 50001, fortaleciendo el monitoreo, control y optimización del desempeño energético institucional.

¿Qué es la norma ISO 50001 y por qué es importante?

Cuando se habla de ahorro de energía, muchas personas piensan inmediatamente en apagar las luces o desconectar aparatos que no se utilizan. Aunque estas acciones son importantes, la gestión energética moderna va mucho más allá. Actualmente, existen herramientas que permiten a las organizaciones administrar de manera sistemática el uso de la energía, identificar oportunidades de mejora y establecer metas claras para reducir el consumo energético.

Una de las herramientas más reconocidas a nivel internacional es la norma ISO 50001, desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO). Esta norma proporciona un marco de trabajo para que organizaciones de cualquier tamaño o sector mejoren continuamente su desempeño energético mediante la implementación de un Sistema de Gestión Energética (ISO, 2018).

La principal característica de la norma ISO 50001 es que no se limita a proponer acciones aisladas de ahorro energético. Su enfoque consiste en integrar la gestión de la energía a las actividades cotidianas de la organización, convirtiéndola en parte de su cultura institucional y de sus procesos de toma de decisiones. La norma se basa en el ciclo de mejora continua conocido como Planear, Hacer, Verificar y Actuar. Este modelo permite identificar oportunidades de mejora, implementar acciones, evaluar resultados y realizar ajustes para alcanzar un desempeño energético cada vez más eficiente.

Durante la etapa de planificación se analizan los consumos energéticos, se identifican los usos más significativos de la energía y se establecen objetivos y metas. Posteriormente, las acciones definidas se ponen en práctica mediante programas específicos de gestión energética. Una vez implementadas, se realiza el seguimiento de los resultados obtenidos para verificar el cumplimiento de los objetivos establecidos. Finalmente, la organización analiza la información generada y toma decisiones orientadas a la mejora continua.

La aplicación de la norma ISO 50001 genera múltiples beneficios. Entre ellos destacan la reducción del consumo energético, la disminución

de costos operativos, el fortalecimiento de la responsabilidad ambiental institucional y la reducción de emisiones asociadas al uso de la energía. Además, permite contar con información confiable para la toma de decisiones y facilita la identificación de nuevas oportunidades de mejora.

En el caso de las instituciones de educación superior, la implementación de un Sistema de Gestión Energética representa una oportunidad para fortalecer las acciones de sustentabilidad existentes y promover una cultura de uso responsable de los recursos entre estudiantes, docentes y personal administrativo. De esta manera, la universidad no solo mejora su desempeño energético, sino que también contribuye a la formación de ciudadanos más conscientes de los desafíos ambientales actuales.

Por estas razones, la norma ISO 50001 se ha convertido en una referencia internacional para aquellas organizaciones que buscan avanzar hacia modelos de operación más eficientes, sostenibles y comprometidos con el cuidado del medio ambiente (ISO, 2018).

El caso de CUTonalá: Propuesta para la implementación de un Sistema de Gestión Energética

El desarrollo de un sistema de gestión energética en una institución de educación superior representa una oportunidad para optimizar el uso de los recursos, reducir costos operativos y fortalecer el compromiso institucional con la sustentabilidad. Con este propósito, se desarrolló una investigación enfocada en analizar la viabilidad de implementar un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001 en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara (Sánchez Rosales, 2017).

La investigación surgió de la necesidad de contar con una herramienta que permitiera gestionar de manera organizada el consumo energético de las áreas administrativas del campus. El crecimiento constante de la infraestructura universitaria, así como el incremento en el número de estudiantes, docentes y personal administrativo, hacen indispensable establecer mecanismos que favorezcan el uso eficiente de la energía. Como parte del diagnóstico inicial, se identificó que el funcionamiento

cotidiano del centro universitario depende de diversos sistemas consumidores de energía, entre ellos la iluminación de edificios, equipos de cómputo, sistemas de aire acondicionado, laboratorios, bibliotecas y oficinas administrativas. Todos estos elementos influyen de manera directa en el desempeño energético de la institución.

La propuesta planteada considera que la gestión energética debe formar parte de la planeación institucional. Para lograrlo, uno de los primeros pasos consiste en establecer una política energética que refleje el compromiso de la universidad con el uso responsable de la energía y la mejora continua. Esta política debe ser conocida por toda la comunidad universitaria y servir como guía para la toma de decisiones relacionadas con el consumo energético.

Otro aspecto fundamental es la conformación de un equipo responsable de coordinar las acciones del Sistema de Gestión Energética. La participación de directivos, personal administrativo, académicos y estudiantes resulta indispensable para promover una cultura organizacional orientada hacia la eficiencia energética y garantizar la continuidad de las acciones implementadas.

La propuesta también contempla la identificación de los principales usos de energía dentro del campus, el establecimiento de indicadores de desempeño energético y la definición de objetivos medibles que permitan evaluar los avances obtenidos. Estos indicadores constituyen herramientas clave para monitorear el comportamiento energético de la institución y detectar oportunidades de mejora.

Asimismo, se plantea la implementación de programas de capacitación y sensibilización dirigidos a la comunidad universitaria. La experiencia demuestra que los cambios tecnológicos generan mejores resultados cuando se acompañan de cambios en los hábitos y comportamientos de las personas. Por ello, fomentar una cultura de ahorro energético representa un elemento esencial para el éxito de cualquier estrategia de gestión.

La adopción de un sistema de gestión energética basado en ISO 50001 no debe entenderse únicamente como una medida técnica. Se trata de una estrategia integral que involucra liderazgo institucional, participación comunitaria, seguimiento continuo y compromiso con la sustentabilidad. En este sentido, la propuesta desarrollada para CUTonalá busca sentar

las bases para una gestión energética eficiente que contribuya tanto al fortalecimiento institucional como a la protección del medio ambiente.

Más allá de los beneficios económicos derivados de la reducción del consumo energético, la implementación de este sistema permitiría posicionar a la universidad como un referente en materia de sustentabilidad y responsabilidad ambiental, alineando sus acciones con los desafíos globales relacionados con el cambio climático y el uso eficiente de los recursos.

Beneficios esperados para CUTonalá y otras universidades

La implementación de un sistema de gestión energética basado en la norma ISO 50001 representa una oportunidad para que las instituciones de educación superior fortalezcan sus estrategias de sustentabilidad y optimicen el uso de sus recursos. Más allá de una herramienta administrativa, este tipo de sistemas contribuye a generar beneficios económicos, ambientales y sociales que impactan positivamente en toda la comunidad universitaria.

Uno de los beneficios más evidentes es la reducción de los costos asociados al consumo de energía. La identificación de áreas de oportunidad y la implementación de medidas de eficiencia energética permiten disminuir gastos operativos sin afectar las actividades académicas o administrativas. Estos recursos pueden destinarse posteriormente a fortalecer programas educativos, infraestructura o proyectos de investigación. Otro beneficio relevante es la disminución de los impactos ambientales asociados al consumo energético. Una gestión más eficiente de la energía contribuye a reducir indirectamente las emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a la generación eléctrica. En un contexto global marcado por los efectos del cambio climático, las universidades tienen la responsabilidad de promover acciones que favorezcan la protección del medio ambiente y el uso responsable de los recursos naturales.

La implementación de un sistema de gestión energética también fortalece la imagen institucional. Las organizaciones que adoptan prácticas sustentables son percibidas como entidades comprometidas con el bien-

estar social y ambiental. En el caso de las universidades, estas acciones refuerzan su papel como espacios de innovación, liderazgo y formación de ciudadanos responsables.

Un aspecto especialmente valioso es la participación activa de estudiantes, académicos y personal administrativo. La gestión energética no depende únicamente de la incorporación de nuevas tecnologías, sino también de la colaboración de las personas que forman parte de la institución. Cuando la comunidad universitaria participa en programas de ahorro energético y cuidado ambiental, se genera una cultura organizacional basada en la responsabilidad compartida.

La formación de una cultura ambiental representa uno de los beneficios más duraderos de este tipo de iniciativas. Los hábitos adquiridos dentro de la universidad pueden extenderse a los hogares, centros de trabajo y comunidades donde los estudiantes desarrollarán su vida profesional. De esta manera, las acciones implementadas en el campus tienen el potencial de multiplicar sus efectos positivos en la sociedad.

Asimismo, la implementación de sistemas de gestión energética contribuye al cumplimiento de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas, particularmente aquellos relacionados con energía asequible y no contaminante, acción por el clima, producción y consumo responsables, así como educación de calidad.

En el caso específico de CUTonalá, la adopción de un Sistema de Gestión Energética basado en ISO 50001 fortalecería las acciones institucionales orientadas a la sustentabilidad, consolidando una visión de largo plazo que combine eficiencia operativa, responsabilidad ambiental y compromiso social. Además, podría servir como modelo para otras instituciones de educación superior interesadas en avanzar hacia esquemas de gestión más sostenibles. La experiencia demuestra que la eficiencia energética no debe considerarse únicamente como una estrategia para reducir costos, sino como una inversión que genera beneficios permanentes para las instituciones, las personas y el medio ambiente.

Retos y oportunidades para la gestión energética en las universidades mexicanas

La implementación de sistemas de gestión energética en las instituciones de educación superior representa una oportunidad para avanzar hacia modelos de operación más sostenibles. Sin embargo, este proceso también implica enfrentar diversos retos relacionados con aspectos técnicos, económicos, organizacionales y culturales.

Uno de los principales desafíos consiste en la disponibilidad de recursos financieros para desarrollar proyectos de eficiencia energética. Aunque muchas de las acciones generan beneficios económicos a mediano y largo plazo, las inversiones iniciales pueden representar una barrera para algunas instituciones educativas. Otro reto importante es la disponibilidad de información confiable sobre los patrones de consumo energético. La toma de decisiones basada en evidencia requiere sistemas de monitoreo, indicadores y mecanismos de seguimiento que permitan identificar áreas de oportunidad y evaluar el impacto de las acciones implementadas.

La participación de la comunidad universitaria constituye igualmente un factor determinante. La experiencia internacional demuestra que las mejores tecnologías no generan resultados significativos cuando no existe compromiso por parte de las personas encargadas de utilizarlas. Por ello, la sensibilización y capacitación permanente deben considerarse elementos fundamentales dentro de cualquier estrategia de gestión energética.

A pesar de estos desafíos, las oportunidades son amplias. Las universidades poseen una característica única: además de consumir energía, generan conocimiento. Esta condición les permite convertirse en espacios de innovación donde estudiantes, investigadores y autoridades colaboren en el desarrollo de soluciones para mejorar el desempeño energético institucional.

La incorporación de energías renovables, sistemas inteligentes de monitoreo, edificios sustentables y programas de educación ambiental representa una oportunidad para fortalecer la competitividad institucional y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En este contexto, las universidades mexicanas tienen la posibilidad de desempeñar un papel estratégico en la transición energética nacional, convirtiéndose en ejemplos de buenas prácticas para otros sectores de la sociedad.

Perspectivas futuras para CUTonalá

Los desafíos energéticos y ambientales del siglo XXI exigen que las instituciones de educación superior adopten una visión de largo plazo orientada a la sustentabilidad. En este escenario, el Centro Universitario de Tonalá cuenta con condiciones favorables para consolidarse como un referente nacional en materia de gestión energética. La vocación académica del centro universitario, particularmente en áreas relacionadas con el agua, la energía y el medio ambiente, ofrece una plataforma adecuada para impulsar proyectos de investigación aplicada vinculados con la eficiencia energética y la sostenibilidad.

La implementación gradual de un Sistema de Gestión Energética basado en ISO 50001 permitiría fortalecer la planeación institucional, optimizar recursos y generar información estratégica para la toma de decisiones. Asimismo, facilitaría la integración de estudiantes y profesores en proyectos interdisciplinarios orientados a resolver problemáticas reales del campus.

En el futuro, CUTonalá podría complementar estas acciones mediante la incorporación de tecnologías de energía renovable, sistemas de monitoreo inteligente y programas permanentes de educación ambiental. Estas iniciativas contribuirían a fortalecer la cultura institucional de sustentabilidad y posicionar al centro universitario como un modelo de innovación responsable.

La construcción de una universidad energéticamente eficiente no depende únicamente de la infraestructura o la tecnología disponible. Requiere también del compromiso de toda la comunidad universitaria para adoptar prácticas responsables y participar activamente en la búsqueda de soluciones sostenibles para los retos del presente y del futuro.

ISO 50001 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible

La sostenibilidad se ha convertido en uno de los principales desafíos de la sociedad contemporánea. Con el propósito de promover un desarrollo equilibrado entre el crecimiento económico, la protección ambiental y el bienestar social, la Organización de las Naciones Unidas estableció en 2015 la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, integrada por 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

La implementación de Sistemas de Gestión Energética basados en la norma ISO 50001 contribuye de manera directa e indirecta al cumplimiento de diversos ODS. Entre ellos destaca el Objetivo 7, Energía asequible y no contaminante, cuyo propósito es garantizar el acceso a servicios energéticos fiables, sostenibles y modernos. A través de la mejora continua del desempeño energético, las organizaciones pueden optimizar el uso de la energía y reducir el desperdicio de recursos.

Asimismo, la gestión eficiente de la energía contribuye al Objetivo 13, Acción por el clima, al disminuir indirectamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al consumo energético. Aunque las instituciones educativas no son grandes emisoras en comparación con sectores industriales, su compromiso con la eficiencia energética representa una contribución significativa a los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático.

La norma ISO 50001 también guarda relación con el Objetivo 12, Producción y consumo responsables, ya que promueve una utilización más eficiente de los recursos disponibles y fomenta una cultura organizacional orientada a la mejora continua. La adopción de prácticas responsables permite reducir costos, minimizar impactos ambientales y fortalecer la sostenibilidad institucional.

En el ámbito educativo, la implementación de sistemas de gestión energética contribuye al Objetivo 4, Educación de calidad. Las universidades no solo forman profesionales, sino que también tienen la responsabilidad de promover valores, conocimientos y competencias relacionadas con el desarrollo sostenible. Los campus universitarios pueden convertirse

en espacios de aprendizaje donde los estudiantes observen y participen en acciones concretas de sustentabilidad.

En el caso de CUTonalá, la implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en ISO 50001 permitiría fortalecer las acciones institucionales alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, consolidando una visión integral que combine eficiencia operativa, responsabilidad ambiental y compromiso social.

De esta manera, la gestión energética trasciende el ámbito técnico y se convierte en una herramienta estratégica para contribuir a la construcción de sociedades más sostenibles y resilientes frente a los desafíos ambientales del siglo XXI (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Recomendaciones para universidades interesadas en implementar un Sistema de gestión energética

La implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001 representa una oportunidad para mejorar el desempeño energético y fortalecer las estrategias de sustentabilidad institucional. Sin embargo, para lograr resultados exitosos es necesario considerar diversos aspectos durante el proceso de planificación e implementación.

Una de las principales recomendaciones consiste en asegurar el compromiso de la alta dirección. El liderazgo institucional resulta fundamental para asignar recursos, establecer objetivos y promover una cultura organizacional orientada hacia la eficiencia energética. Sin el respaldo de las autoridades universitarias, las iniciativas suelen enfrentar dificultades para consolidarse y mantenerse en el tiempo. Asimismo, es importante realizar un diagnóstico energético inicial que permita identificar los principales consumos, detectar oportunidades de mejora y establecer una línea base para evaluar el desempeño futuro. La información obtenida durante esta etapa constituye un elemento esencial para la toma de decisiones.

Otra recomendación consiste en conformar equipos multidisciplinarios que integren a personal administrativo, académico y técnico. La diversidad de conocimientos y experiencias favorece la generación de soluciones innovadoras y fortalece la participación de la comunidad universitaria en el proceso de gestión energética. La capacitación permanente representa

también un factor clave para el éxito de cualquier estrategia. Informar y sensibilizar a estudiantes, docentes y trabajadores sobre la importancia del uso eficiente de la energía contribuye a fortalecer los hábitos responsables y maximizar los beneficios de las acciones implementadas.

Las universidades deben aprovechar además las oportunidades que ofrecen las nuevas tecnologías. Sistemas de monitoreo inteligente, iluminación eficiente, automatización de procesos y energías renovables pueden complementar las acciones de gestión energética y mejorar significativamente los resultados obtenidos.

Finalmente, se recomienda establecer mecanismos de seguimiento y evaluación que permitan medir los avances alcanzados y promover la mejora continua. La gestión energética debe entenderse como un proceso permanente que evoluciona conforme cambian las necesidades institucionales y los desafíos ambientales. La experiencia desarrollada en CUTonalá demuestra que las instituciones de educación superior cuentan con el potencial necesario para impulsar procesos de transformación orientados a la sostenibilidad. Compartir experiencias, generar redes de colaboración y promover el intercambio de buenas prácticas permitirá que un mayor número de universidades avance hacia modelos de gestión energética más eficientes y responsables.

Impacto de la gestión energética en la comunidad universitaria

La implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001 no genera beneficios únicamente en términos de ahorro económico o reducción del consumo energético. Su impacto también se refleja en la formación de una comunidad universitaria más consciente de la importancia del uso responsable de los recursos y comprometida con la sustentabilidad.

Las universidades constituyen espacios privilegiados para promover cambios culturales relacionados con el cuidado del medio ambiente. Miles de estudiantes, docentes y trabajadores desarrollan diariamente actividades dentro de los campus universitarios, lo que convierte a estas

instituciones en escenarios ideales para fomentar hábitos sostenibles que posteriormente pueden replicarse en los hogares, centros de trabajo y comunidades.

La adopción de prácticas de eficiencia energética permite que los estudiantes comprendan de manera directa la relación existente entre el consumo de energía, los costos económicos y los impactos ambientales. De esta forma, el campus se transforma en un espacio de aprendizaje donde la sustentabilidad deja de ser únicamente un concepto teórico para convertirse en una experiencia cotidiana.

Asimismo, la implementación de programas de sensibilización y capacitación fortalece la participación activa de la comunidad universitaria. Acciones sencillas como el uso responsable de la iluminación, el aprovechamiento eficiente de equipos eléctricos y la reducción de consumos innecesarios pueden generar resultados significativos cuando son adoptadas de manera colectiva.

Otro aspecto relevante es el fortalecimiento de la responsabilidad social universitaria. Las instituciones de educación superior tienen la capacidad de influir positivamente en la sociedad mediante el ejemplo. Cuando una universidad demuestra que es posible reducir el consumo energético y operar de manera más eficiente, transmite un mensaje de compromiso ambiental que puede inspirar a otras organizaciones públicas y privadas.

En el caso de CUTonalá, la implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001 podría contribuir no solo a mejorar el desempeño energético institucional, sino también a consolidar una cultura de sustentabilidad entre estudiantes, académicos y personal administrativo. Esto favorecería la formación de profesionales con una mayor conciencia ambiental y una mejor comprensión de los desafíos energéticos que enfrenta la sociedad contemporánea.

Finalmente, la gestión energética debe entenderse como una herramienta para impulsar procesos de transformación cultural orientados al desarrollo sostenible. Su impacto trasciende los aspectos técnicos y económicos, convirtiéndose en una estrategia educativa capaz de generar beneficios duraderos para la universidad y para la sociedad en general.

La importancia de la educación ambiental y energética en las universidades

Las universidades desempeñan un papel fundamental en la formación de ciudadanos capaces de enfrentar los desafíos ambientales del siglo XXI. Además de generar conocimiento científico y tecnológico, estas instituciones tienen la responsabilidad de promover valores, actitudes y comportamientos orientados al cuidado del medio ambiente y al uso responsable de los recursos naturales.

En este contexto, la educación ambiental y energética adquiere una relevancia especial. El crecimiento de la demanda energética a nivel mundial, así como los efectos asociados al cambio climático, hacen necesario que las nuevas generaciones comprendan la importancia de utilizar la energía de manera eficiente y sostenible. Las universidades constituyen espacios privilegiados para fomentar esta conciencia y promover prácticas responsables que puedan extenderse a la sociedad en general.

La implementación de un sistema de gestión energética basado en la norma ISO 50001 representa una oportunidad para fortalecer los procesos educativos relacionados con la sustentabilidad. Más allá de sus beneficios técnicos y económicos, este tipo de iniciativas permite que estudiantes, docentes y personal administrativo participen activamente en acciones orientadas al ahorro energético y la protección del medio ambiente.

La experiencia demuestra que las estrategias de eficiencia energética generan mejores resultados cuando se acompañan de procesos de sensibilización y capacitación. Informar a la comunidad universitaria sobre el impacto de sus hábitos de consumo favorece la adopción de prácticas responsables, como el uso adecuado de la iluminación, el aprovechamiento eficiente de equipos eléctricos y la reducción de consumos innecesarios.

Asimismo, la educación ambiental contribuye a fortalecer la responsabilidad social universitaria. Los conocimientos y valores adquiridos durante la formación profesional pueden influir en las decisiones que los egresados tomarán en sus futuros espacios laborales y comunitarios. De esta manera, las acciones implementadas dentro de los campus universitarios tienen el potencial de generar efectos positivos que trascienden los límites de la institución.

En el caso de CUTonalá, la implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001 podría convertirse en una herramienta de aprendizaje que complemente la formación académica de los estudiantes. La participación en proyectos relacionados con eficiencia energética, sustentabilidad y gestión ambiental permitiría fortalecer competencias profesionales y promover una mayor conciencia sobre los desafíos energéticos y ambientales actuales.

Por ello, la gestión energética debe entenderse no solo como una estrategia administrativa, sino también como una oportunidad educativa capaz de contribuir a la formación de profesionales comprometidos con el desarrollo sostenible y con la construcción de sociedades más responsables con el medio ambiente.

La transición hacia modelos de desarrollo más sostenibles exige la participación activa de las instituciones de educación superior. La experiencia analizada demuestra que la gestión energética puede convertirse en un elemento estratégico para fortalecer la sustentabilidad universitaria, optimizar recursos y contribuir a la formación de ciudadanos comprometidos con el cuidado del medio ambiente. La norma ISO 50001 ofrece una oportunidad para integrar la eficiencia energética a la planeación institucional y promover procesos de mejora continua que generen beneficios económicos, sociales y ambientales.

Conclusiones

La energía constituye uno de los recursos más importantes para el funcionamiento de las instituciones de educación superior. El crecimiento de la infraestructura, el aumento de la matrícula estudiantil y la incorporación constante de nuevas tecnologías hacen necesario implementar estrategias que permitan gestionar de manera eficiente el consumo energético sin afectar las actividades sustantivas de docencia, investigación y extensión.

La experiencia analizada en el Centro Universitario de Tonalá demuestra que la implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001 representa una alternativa viable para fortalecer las acciones institucionales orientadas a la sustentabilidad. Su

aplicación permite establecer mecanismos de planeación, seguimiento y mejora continua que favorecen el uso responsable de la energía y la optimización de los recursos disponibles.

Más allá de los beneficios económicos asociados a la reducción del consumo energético, la adopción de este tipo de sistemas contribuye a disminuir los impactos ambientales, fortalecer la cultura organizacional y promover una mayor conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad. Asimismo, favorece la participación de estudiantes, académicos y personal administrativo en la construcción de una comunidad universitaria comprometida con el cuidado del medio ambiente.

Las universidades tienen la capacidad de convertirse en laboratorios vivos de innovación y buenas prácticas ambientales. En este sentido, la implementación de la norma ISO 50001 no debe entenderse únicamente como una herramienta técnica, sino como una oportunidad para impulsar cambios culturales que trasciendan los límites del campus y generen beneficios para la sociedad en su conjunto.

El caso de CUTonalá pone de manifiesto que la gestión energética puede integrarse exitosamente a la planeación institucional y convertirse en un elemento estratégico para alcanzar objetivos de sustentabilidad. La experiencia presentada puede servir como referencia para otras instituciones de educación superior interesadas en desarrollar modelos de gestión más eficientes, responsables y alineados con los desafíos energéticos y ambientales del siglo XXI.

Finalmente, avanzar hacia una cultura de eficiencia energética implica reconocer que cada acción cuenta. Desde la planeación institucional hasta los hábitos cotidianos de quienes integran la comunidad universitaria, todos tienen la capacidad de contribuir a la construcción de un futuro más sostenible para las próximas generaciones.

Referencias

Cañizares-Pentón, G., Rivero-Aragón, M. F., Pérez-Bermúdez, R. A. & González-Suárez, E. (2014). La gestión energética y su impacto en el sector industrial de la provincia de Villa Clara, Cuba. *Tecnología Química*, *34*(1), 11–23.

Correa Soto, J., Borroto Nordelo, A. E., Alpha Bah, M., González Álvarez, R., Curbelo Martínez, M. & Díaz Rodríguez, A. M. (2014). Design and implementation of a planning process for energy according to NC-ISO 50001:2011. *Revista de Ingeniería Energética*, *35*(3), 38–47.

Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE). (2016). Horario de verano. https://www.fide.org.mx

Fundación Repsol. (2013). *Indicador social Repsol de eficiencia energética*. https://www.fundacionrepsol.com

International Organization for Standardization. (2018). ISO 50001:2018. Energy management systems—Requirements with guidance for use.

Ivanovich, M. (2011). ISO 50001: The new energy management paradigm. *Consulting-Specifying Engineer*, *48*(8), 21.

Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible*.

Sánchez Rosales, A. (2017). *Análisis para la implementación de un sistema de gestión energética (ISO 50001) en el Centro Universitario de Tonalá* [Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara].

Secretaría de Energía. (2008). *Metodologías para la estimación de ahorros de energía eléctrica, criterios y factores homologados. Gobierno de México*.

Secretaría de Energía. (2016). *Prospectivas del sector energético. Gobierno de México*. https://www.gob.mx/sener

Universidad de Guadalajara. (2016). *Centro Universitario de Tonalá*. https://www.udg.mx/es/centros-universitarios/cutonala

Capítulo **14**

De las hormigas y las aves al agua y la energía: Cómo la naturaleza inspira nuevos algoritmos para la sostenibilidad

Jesús Águila León[1]
César J. Aceves Jiménez[2]
Beatriz Castillo Téllez[1]
Gerardo A. Mejía Pérez[3]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008110

[1] Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara.
[2] Licenciatura de Ingeniería en Ciencias Computacionales, Departamento de Ciencias de la Información y Desarrollos Tecnológicos, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara.
[3] Departamento de Ingenierías, Centro Universitario de Tlaquepaque, Universidad de Guadalajara.

Resumen

La optimización forma parte de nuestra vida cotidiana, aunque muchas veces no seamos plenamente conscientes de ello. Elegir una ruta más rápida, comprar un producto con la mejor relación entre calidad y precio o buscar una solución que reduzca costos y aumente beneficios son ejemplos sencillos de una misma idea: encontrar la mejor alternativa posible bajo ciertas restricciones. Sin embargo, cuando el número de variables, combinaciones y condiciones crece de manera acelerada, algunos problemas se vuelven tan complejos que resulta impráctico resolverlos probando todas las opciones una por una. Ante este escenario, la naturaleza ofrece una fuente valiosa de inspiración, pues durante millones de años ha desarrollado mecanismos de adaptación, búsqueda, cooperación y equilibrio que permiten enfrentar entornos cambiantes de forma eficiente. A partir de estas observaciones surgen los algoritmos bioinspirados, métodos computacionales que traducen comportamientos naturales, como la evolución genética, el movimiento de las parvadas, el rastro de feromonas de las hormigas o la organización de una manada de lobos, en estrategias para explorar y mejorar soluciones. Este capítulo presenta, desde un enfoque introductorio, cómo estos algoritmos permiten abordar problemas complejos de la ingeniería, especialmente en aplicaciones relacionadas con la energía y el agua, como el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos, el diseño de parques eólicos y la optimización de redes de distribución de agua potable. Finalmente, se reflexiona sobre la importancia de seleccionar adecuadamente cada algoritmo según la naturaleza del problema, reconociendo que no existen soluciones universales, sino herramientas cuyo verdadero potencial aparece cuando se comprenden sus alcances, limitaciones y posibilidades dentro de los sistemas sostenibles.

Introducción

Más de una vez hemos escuchado el término perfeccionista aplicado a aquellas personas que, de una u otra manera, buscan siempre que algo esté "perfecto": ya sea el acomodo de los objetos en su casa, la posición de una maceta en el pórtico, la combinación de colores o el estilo de los muebles en una habitación, o el más mínimo detalle en la redacción de un correo. Este mismo ímpetu por la perfección puede trasladarse al ámbito de las ciencias y las ingenierías, donde no se trata de algo arbitrario, sino más bien deseable. Buscar la mejor aleación de materiales para obtener la máxima dureza posible en el acero, o mejorar una línea de producción para maximizar la cantidad de piezas fabricadas, son ejemplos de esa búsqueda "de la perfección" que, al final, tiene por objetivo reducir costos o maximizar rendimientos. A esto es lo que llamamos optimización.

En términos sencillos, optimizar no significa perseguir una perfección abstracta, sino elegir de manera razonada entre varias posibilidades. A veces esa elección se hace con números, como cuando se comparan costos, tiempos o rendimientos; otras veces se hace con criterios menos evidentes, como comodidad, seguridad o confiabilidad. Lo importante es que siempre existe una pregunta de fondo: ¿cuál alternativa cumple mejor con lo que necesitamos, respetando los límites que no podemos cambiar? Esta forma de pensar es muy útil porque permite ordenar problemas que, de otro modo, parecerían solo una acumulación de decisiones aisladas. Cuando se identifican los objetivos y las restricciones, el problema deja de ser una intuición y se convierte en una búsqueda orientada.

En la vida cotidiana, todas las personas optimizamos de manera natural, sin darnos cuenta. Por ejemplo, cuando vamos al supermercado y tenemos varios productos frente a nosotros, por lo regular elegimos el que mejor cumple nuestras expectativas, que casi siempre consisten en obtener la mejor calidad al menor precio posible. Otro ejemplo lo encontramos al ir de casa al trabajo: buscamos la ruta más corta o la más rápida, aunque sea echando un vistazo rápido a Google Maps o Waze antes de salir, para prevenir atascos o accidentes.

En estos ejemplos de "ptimización cotidiana" hay un hecho que vale la pena evidenciar, aunque tras señalarlo pueda parecer obvio. Cuando hablamos de obtener el mejor beneficio de un producto que compramos en el supermercado, hay una parte que buscamos maximizar, por ejemplo, la calidad del producto, y otra que buscamos minimizar, por lo general, su costo. Y este juego entre maximizar y minimizar se encuentra restringido por un límite: la cantidad de dinero disponible en nuestra tarjeta o nuestro crédito. Es decir, todo proceso de optimización involucra variables que se maximizan, variables que se minimizan y restricciones o límites que deben respetarse.

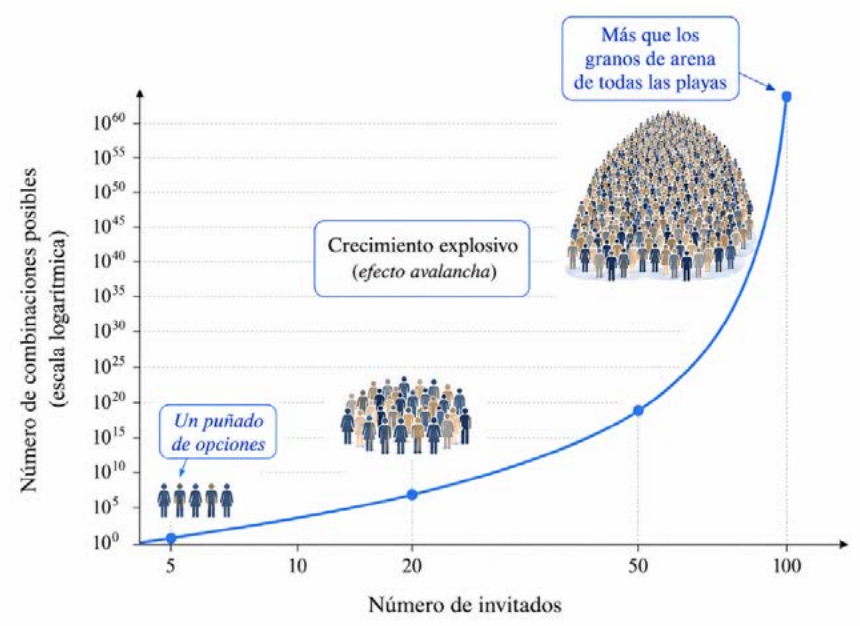
Hasta este momento hemos hablado de optimizar situaciones sencillas, como elegir la ruta más corta para llegar a nuestro destino o comprar el producto de mejor calidad con la menor cantidad de dinero posible. Dichos problemas suelen ser bastante fáciles de resolver, ya que con un simple cálculo mental podemos saber cuál es nuestra mejor opción; dicho de otro modo, sabemos perfectamente qué variables maximizar o minimizar para obtener el mejor beneficio con muy poco esfuerzo. Sin embargo, como todo en la vida, existen situaciones en las cuales optimizar algo se puede convertir en un verdadero reto.

Imagina la siguiente situación. Sofía está muy emocionada porque en un par de semanas se va a casar, pero hay algo que le preocupa. Invitó a muchas personas a su boda (amigos, primos, tíos, conocidos) y muchos de ellos le pusieron condiciones para asistir. Por ejemplo, su amigo Ernesto se peleó con su otra amiga Dulce y no quiere sentarse en la misma mesa; su prima Mariana pidió estar al lado de la pista de baile; y sabe perfectamente que no puede sentar a sus tíos junto a sus primos, porque seguro se pelean por los terrenos del abuelo. Y como estas, hay decenas de peticiones más que debe cumplir para que todos estén felices. Ante este dolor de cabeza, Sofía llama a su amiga Emma, quien estudia computación y es muy buena con las matemáticas, y que acepta ayudarle a organizar las mesas. Sin embargo, cuando se sientan a buscar la combinación perfecta para que nadie se queje, pronto se dan cuenta de que el número de opciones posibles es tan ridículamente inmenso que resulta imposible probarlas una por una. Sofía y Emma se acaban de topar con lo que en ciencias de la computación se conoce como un problema NP-

hard: un desafío tan complejo que, para encontrar la solución óptima absoluta, probar todas las combinaciones posibles una por una le tomaría millones de años incluso a la supercomputadora más potente del mundo.

¿Por qué algo que parece tan sencillo a simple vista, como acomodar personas en una mesa, se convierte en un desafío tan monstruoso? La respuesta está en un fenómeno que podemos llamar "efecto bola de nieve". Si Sofía hubiera invitado solamente a 5 personas, acomodarlas siguiendo las reglas habría sido un juego de niños, ya que apenas existiría un puñado de opciones. El problema comienza cuando la lista de invitados crece. En este tipo de problemas, cada persona o condición extra que agregas no suma solo un poco más de trabajo; al contrario, multiplica el número de opciones de manera explosiva. Por ejemplo, si pasas de 5 invitados a 10, el número de opciones no se duplica: se cuenta por millones, y cuando llegas a 100 invitados, las combinaciones posibles superan la cantidad de granos de arena que hay en todas las playas del mundo. Es como una pequeña bola de nieve que rueda montaña abajo y termina convirtiéndose en una avalancha. Por eso el problema no está en la lógica, sino en la multiplicación masiva de opciones. Esta diferencia entre elegir y probarlo todo es fundamental. Muchas veces creemos que una computadora resuelve un problema difícil simplemente porque es rápida, pero la velocidad no basta cuando el número de posibilidades crece de forma desmedida. Una máquina puede hacer millones de operaciones por segundo y, aun así, quedar rebasada por un problema cuyo número de combinaciones se multiplica sin control. Por eso, en ciencia e ingeniería no siempre buscamos revisar todas las respuestas posibles, sino encontrar caminos inteligentes para acercarnos a respuestas suficientemente buenas. En otras palabras, el reto no consiste únicamente en tener más capacidad de cálculo, sino en saber guiar la búsqueda.

Figura 1. *Crecimiento explosivo de combinaciones: el efecto avalancha*.



Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, hay problemas que en principio pueden sonar sencillos, pero cuya solución se vuelve impráctica si se aborda mediante la fuerza bruta, es decir, probando todas las combinaciones posibles una por una. Sin embargo, diversos sistemas naturales, ya sean biológicos, físicos o químicos, tienden por sí mismos a encontrar puntos de equilibrio, adaptándose de manera maravillosa a su entorno. La naturaleza lleva millones de años aplicando métodos que permiten a estos sistemas ajustarse a condiciones cambiantes y a un número enorme de combinaciones posibles de forma efectiva, sin necesidad de cálculos matemáticos: simplemente, de manera espontánea, encuentran formas eficientes de funcionar. Esto lo vemos, por ejemplo, en la evolución de las especies animales y vegetales, donde los progenitores combinan lo mejor de su genética para dar lugar a descendientes más aptos para sobrevivir en su entorno.

Además de los mecanismos de la evolución de las especies, en la naturaleza encontramos también formas de adaptación al entorno basadas en el comportamiento. Un ejemplo es la conducta colectiva de distintas especies que despliegan estrategias conjuntas durante la búsqueda o la cacería de sus presas. Los lobos, por ejemplo, poseen comportamientos de manada bien definidos: un líder encabeza el grupo, le siguen otros individuos subordinados y, detrás, el resto de la manada, coordinándose durante la caza. Otro tipo de inteligencia colectiva, orientada a hacer más eficiente la búsqueda de alimento, es la que observamos en las hormigas, que se organizan sin un líder y, aun así, de forma colectiva logran encontrar el camino más corto entre el hormiguero y su fuente de comida. Asimismo, existen comportamientos colectivos de enjambre, como las parvadas de aves que vuelan de manera coordinada sin chocar mientras buscan alimento o emprenden largas travesías de migración, adoptando formaciones de vuelo bien definidas que les permiten reducir la resistencia del aire y desplazarse con menor esfuerzo.

Así, los científicos e ingenieros, al observar estos comportamientos de mejora evolutiva, de caza coordinada y otras formas de conducta colectiva en diversas especies, se han planteado una pregunta: si la naturaleza puede resolver problemas complejos de una manera tan elegante y eficiente, ¿por qué nosotros no podríamos hacer lo mismo con los problemas de ingeniería? De este modo, inspirándose en la naturaleza, desde hace algunas décadas se han dado a la tarea de, primero, traducir matemáticamente estos comportamientos y estrategias, y luego convertirlos en una serie de pasos ordenados que puedan aplicarse a la solución de problemas en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería.

Fundamentos y aplicaciones de los algoritmos bioinspirados

Históricamente, antes de volver la mirada hacia la naturaleza como inspiración para diseñar métodos de solución, se desarrollaron métodos matemáticos exactos para lograrlo. La mayoría de ellos se basan en buscar la solución mediante alguna estrategia de "tanteo". Imagina que estás en una montaña cubierta por una densa niebla que no te deja ver

con claridad, y quieres bajar. Como prácticamente no ves nada, lo que tienes que hacer es sentir el terreno: das un paso y, si notas que tu pie queda en una posición más alta, eso significa que vas subiendo en lugar de bajar, así que conviene corregir el rumbo hacia donde el terreno desciende. Repetir este procedimiento, eligiendo en cada paso la dirección en la que el terreno baja, es lo que te permitirá llegar al fondo del valle. A este método, que matemáticamente avanza siempre en la dirección de mayor descenso, se le conoce como el método del descenso de gradiente.

Otra alternativa dentro de los métodos clásicos de optimización es la que busca siempre obtener lo mejor, o al menos lo que parece lo mejor, en cada momento, sin pensar en las consecuencias futuras. A esto podríamos llamarlo tomar las mejores decisiones inmediatas, sin prestar atención a si esas decisiones nos llevarán o no a un buen resultado final. Por ejemplo, cuando salimos de excursión y nos encontramos con dos caminos, uno a la derecha y otro a la izquierda, tendemos a tomar aquel que a simple vista parece subir menos. Esa decisión la tomamos sin consultar un mapa ni conocer cómo continúa la ruta más adelante. Esto es, justamente, decidir con base en lo que creemos mejor para el aquí y el ahora, sin ver el panorama completo del camino que tenemos por delante. A este tipo de métodos, que en cada paso eligen la opción que parece mejor en el momento, se les conoce como algoritmos codiciosos.

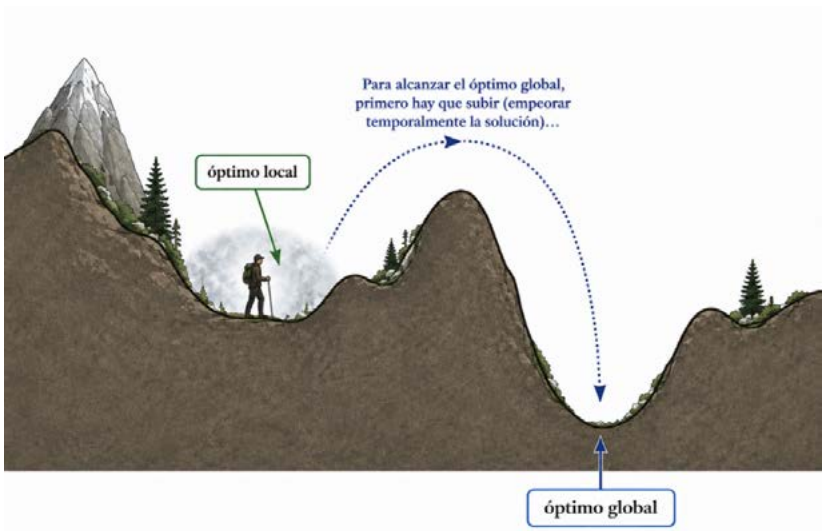
Los dos métodos descritos, el de bajar la montaña "sintiendo" cuál es el paso que desciende más y el de elegir el camino que en apariencia es más sencillo, comparten una debilidad: ambos se basan en información local. Pero entonces, ¿qué ocurre cuando la solución de un problema es compleja y decidir solo con información local, sin considerar otros factores, no es lo más conveniente? Esa es precisamente la flaqueza de este tipo de métodos clásicos. Tanto el descenso de gradiente como los algoritmos codiciosos se apoyan en información inmediata y no contemplan el panorama general del problema, de modo que pueden quedar atrapados en soluciones que no son las óptimas, es decir, óptimos locales.

La idea del óptimo local también aparece con frecuencia fuera de las matemáticas. En una ciudad, por ejemplo, una ruta puede parecer la mejor si solo observamos las calles cercanas, aunque exista otra mucho más eficiente unas cuadras más adelante. En una red de agua, una combinación de tuberías puede funcionar de manera aceptable en una colonia, pero

generar problemas de presión en otra zona. En un sistema energético, una decisión que reduce el costo inmediato puede provocar pérdidas o restricciones horas después. Estos ejemplos muestran que la información local puede ser útil, pero también puede engañarnos cuando el sistema completo tiene relaciones que no alcanzamos a ver desde un solo punto.

Retomemos el ejemplo de bajar la montaña rodeados de una densa niebla. Al descender sintiendo el terreno, puede que en algún momento lleguemos a una hondonada a media ladera. A nuestro alrededor, lo único que percibimos con los pies es que el terreno sube en todas direcciones; sin embargo, en realidad el fondo del valle está muy por debajo de esa hondonada. Como estamos limitados por la política de no considerar el conjunto del entorno, nos quedamos ahí, convencidos de haber encontrado el fondo del valle, que irónicamente podría estar justo detrás de una loma vecina a la hondonada donde hemos quedado atrapados. En optimización, dar con este tipo de solución, esta hondonada, es lo que se denomina óptimo local, mientras que el verdadero fondo del valle corresponde al óptimo global.

Figura 2. *Óptimo local y óptimo global en un paisaje de búsqueda*



Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

Esta debilidad de quedar atrapados en hondonadas secundarias, es decir, en óptimos locales, es lo que motivó a científicos e ingenieros a proponer métodos dispuestos a sacrificar temporalmente la solución encontrada con tal de comprobar si en zonas cercanas existe una mejor, o si el terreno indica que podría haberla; en nuestro ejemplo, una hondonada aún más profunda que la hallada antes. Es en este punto donde volvemos la mirada hacia la naturaleza como inspiración, para tomar prestadas sus estrategias de exploración y explotación de soluciones.

Conviene aclarar que inspirarse en la naturaleza no significa copiarla de manera literal. Una hormiga real no resuelve ecuaciones, un ave no calcula vectores y un lobo no conoce una función objetivo. Lo que hacen los científicos es observar ciertos patrones generales de comportamiento y convertirlos en reglas simples que una computadora sí puede ejecutar. Esta traducción requiere separar la metáfora de la realidad biológica: no se busca construir una colonia de hormigas dentro de la máquina, sino aprovechar la lógica colectiva que permite a muchas hormigas explorar, reforzar caminos útiles y abandonar rutas poco convenientes. Ahí reside el verdadero valor de los algoritmos bioinspirados.

La naturaleza como fuente de soluciones

Como se expuso anteriormente, la naturaleza lleva millones de años refinando diferentes sistemas para adaptarse a condiciones cambiantes y encontrar maneras eficientes de funcionar. No sorprende a nadie que estas características hayan llamado fuertemente la atención de algunos científicos de la computación del siglo pasado, quienes se dieron cuenta de que no tenían que reinventar la rueda para encontrar soluciones para problemas extremadamente complejos, sino que simplemente debían apartar la mirada de la pantalla y observar cómo las plantas y los seres vivos ya habían resuelto estos problemas de manera elegante y espontánea. Que la naturaleza nos enseñe nuevos algoritmos resulta incluso poético; sin embargo, no es tan sencillo trasladar los comportamientos naturales a instrucciones para una computadora. Para salvar esta dificultad, los programadores utilizaron “metáforas”, que no son más que puentes conceptuales entre la observación biológica y la lógica matemática. Una

metáfora permite abstraer las reglas de supervivencia de un ser vivo y traducirlas en variables, bucles y condicionales. Por ejemplo, la necesidad de una especie de buscar alimento se convierte en un problema de optimización, y los miembros de esa especie se transforman en agentes o "soluciones candidatas" dentro de un espacio de búsqueda virtual. Sin embargo, para que cualquier metáfora de la naturaleza funcione al ser trasladada a la computación, el algoritmo debe balancear dos fuerzas que rigen a todos los seres vivos: la exploración y la explotación.

Para explicar los mecanismos de exploración y de explotación de una manera mucho más visual, utilizaremos el ejemplo de una colonia de hormigas. El instinto de descubrir nuevas fuentes de alimento (la exploración) es el equivalente a cuando las hormigas salen del hormiguero y se dispersan de manera completamente aleatoria en todas las direcciones. No saben en qué punto está la comida, así que caminan al azar "explorando" el terreno desconocido. En programación, esto se traduce en buscar a lo largo y a lo ancho de todo el mapa de soluciones posibles, asumiendo riesgos y evitando quedarse atrapados en el primer lugar que parezca bueno. Sin la exploración, la computadora nunca descubriría soluciones que pueden ser radicalmente innovadoras.

Por otro lado, el instinto de aprovechamiento de las hormigas (la explotación) puede explicarse así: una vez que una de las hormigas encuentra algo de comida, como un trozo de pastel, regresa al hormiguero dejando un rastro químico (feromonas). El resto de las hormigas, al notar este rastro, dejan de caminar al azar y se concentran en seguir ese camino específico para recolectar el alimento encontrado de manera eficiente. Es decir, están explotando el conocimiento ya adquirido. En computación, la explotación consiste en refinar y exprimir las mejores soluciones que ya se han encontrado para acercarse lo más posible a la respuesta perfecta.

Figura 3. *Exploración y explotación en una colonia de hormigas*.



Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

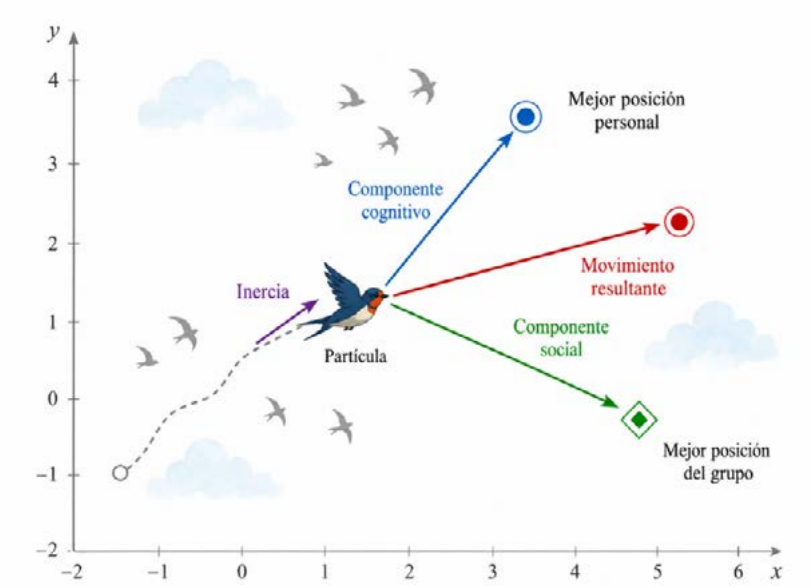
En resumen, a través del uso de metáforas, los programadores pueden extraer los mecanismos de exploración y de explotación de cualquier ser vivo y transformarlos en instrucciones para que una computadora pueda replicar este comportamiento natural. Una característica común de muchos de estos métodos es que no dependen de una sola solución que avanza paso a paso, sino de un conjunto de soluciones candidatas que se mueven, compiten o cooperan al mismo tiempo. Esta diferencia es importante porque permite observar el problema desde varios puntos del espacio de búsqueda. Mientras una solución puede quedar atrapada en una zona prometedora pero limitada, una población completa tiene mayor posibilidad de descubrir regiones diferentes y comparar sus resultados. Por eso, aunque estos algoritmos no garantizan siempre la solución perfecta, suelen ser muy útiles cuando el problema es demasiado grande, irregular o cambiante para resolverse mediante métodos directos. En las últimas décadas, los investigadores han realizado un gran esfuerzo por trasladar muchos comportamientos observados en la naturaleza a algoritmos de optimización. Debido a que sería imposible listar los cientos de algoritmos que se han propuesto hasta ahora, a continuación presentamos algunos de los más representativos.

Particle Swarm Optimizer (PSO) fue propuesto por Kennedy y Eberhart en 1995. Este algoritmo replica el comportamiento social y el movimiento de bandadas de aves o bancos de peces. La metáfora de este algoritmo es la siguiente: Imagina un grupo de aves que está buscando comida dentro de un área determinada. Ninguna sabe dónde está el alimento; sin embargo, sí saben qué tan lejos están de él en cada momento (gracias a una función matemática que mide el éxito, llamada función de aptitud).

Para lograr encontrar una fuente de alimento de manera eficiente, cada ave considera dos cosas: su propia experiencia, es decir, dónde ha estado antes y cuál fue el lugar más cercano a la comida que encontró por sí misma; y la experiencia del grupo, es decir, cuál es el lugar más cercano a la comida que cualquiera de sus compañeras ha encontrado hasta el momento. Dentro del PSO, cada ave, también conocida como solución candidata, actualiza su velocidad y su posición utilizando tres componentes: la inercia, la cual se define como la tendencia a seguir en la dirección en la que ya se movía; el componente cognitivo, es decir, la atracción hacia el récord personal (el lugar más cercano al alimento encontrado por sí misma); y el componente social, que es la atracción hacia el récord del grupo (el lugar más cercano a la comida encontrado por cualquiera de sus compañeras).

En el caso del PSO, la función de aptitud funciona como una especie de brújula matemática. No le dice al ave artificial exactamente dónde está la comida, pero sí le permite saber si la posición en la que se encuentra es mejor o peor que otras posiciones visitadas. Esta evaluación continua es la que permite que cada partícula conserve memoria de su propia experiencia y, al mismo tiempo, aprenda de los hallazgos del grupo. De esta manera, el movimiento no es completamente aleatorio ni completamente dirigido: combina la tendencia a seguir avanzando, la confianza en lo que cada individuo ya encontró y la influencia social de la mejor solución conocida por el enjambre.

Figura 4. *Movimiento de una partícula en PSO: inercia, memoria personal e información del grupo*.



Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

La optimización por enjambre de partículas es uno de los métodos de optimización más conocidos, y no es para menos: este algoritmo es bastante simple y requiere muy pocas líneas de código en comparación con otros métodos, tiene pocos parámetros de control (la inercia y los componentes cognitivo y social), lo que lo hace fácil de configurar, y además es eficiente, ya que por lo general tiene una rápida convergencia en muchos problemas complejos. Sin embargo, su desventaja más grande es que este algoritmo es muy susceptible a estancarse en óptimos locales, lo que quiere decir que el grupo es atraído a soluciones que parecen buenas, pero no son las mejores absolutas.

El Genetic Algorithm (GA) fue popularizado por David E. Goldberg en la década de los 80 para su uso en problemas de ingeniería. A diferencia de otros métodos que toman inspiración de un ser vivo en específico, el GA se basa en los principios de evolución y de selección natural obser-

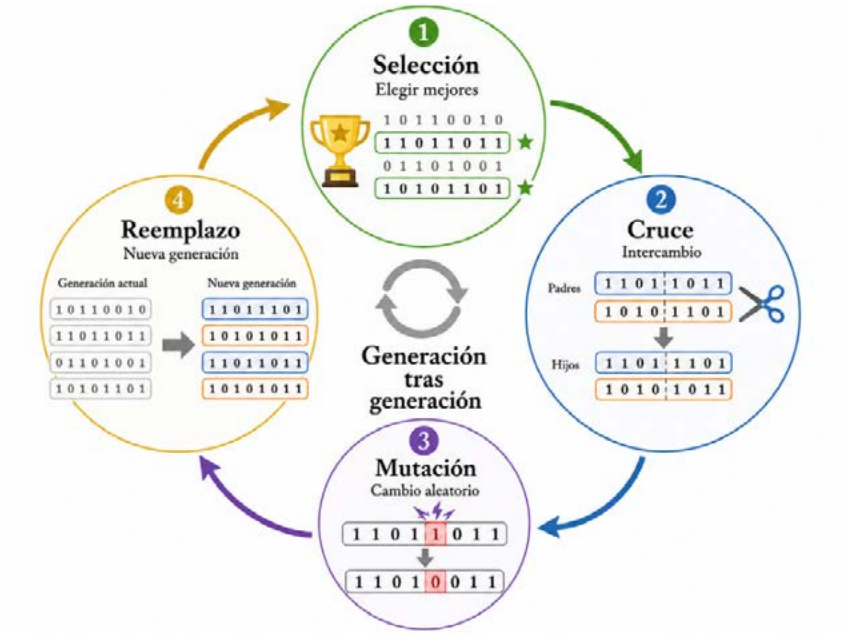
vados por el biólogo Charles Darwin. La metáfora del algoritmo genético se puede describir de la siguiente manera: El problema de optimización considera el medio ambiente donde los individuos evolucionarán; cada solución candidata representa un individuo o un organismo; la función de aptitud (de la cual hablamos en el algoritmo anterior) evalúa qué tan bien está adaptado un individuo para sobrevivir en ese entorno y los parámetros de la solución se codifican en un cromosoma (una cadena de unos y ceros) donde cada posición es un gen.

Para replicar el mecanismo de supervivencia del más apto, se siguen los siguientes pasos:

1. Selección: Se seleccionan a los individuos que tienen derecho a reproducirse (los que tienen una mayor aptitud).
2. Cruce: Las cadenas de los individuos seleccionados se combinan con la esperanza de que sobrevivan las mejores características de ambos en la descendencia.
3. Mutación: Se introducen unos y ceros de manera aleatoria en las cadenas de la descendencia generada; esto simula las mutaciones que sufre el ADN durante la reproducción.
4. Reemplazo: La descendencia generada reemplaza total o parcialmente a la población actual, lo que representa el paso de las generaciones en la población.

El algoritmo genético resulta especialmente intuitivo porque aprovecha una idea muy familiar: las mejores características tienden a conservarse y combinarse con el paso de las generaciones. Sin embargo, su utilidad no está solamente en seleccionar a los mejores individuos, sino también en mantener cierta diversidad dentro de la población. Si todos los individuos fueran demasiado parecidos, el algoritmo podría dejar de explorar alternativas nuevas y quedarse atrapado en una solución aceptable, pero no necesariamente superior. Por eso la mutación cumple un papel importante: introduce pequeñas variaciones que, aunque a veces no mejoren la solución, pueden abrir caminos inesperados hacia combinaciones más eficientes.

Figura 5. *Ciclo básico de un algoritmo genético: selección, cruce, mutación y reemplazo.*



Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

El algoritmo genético es, junto con el PSO, quizá uno de los dos mayores representantes de algoritmos basados en la naturaleza, y son los que sin duda inspiraron a la siguiente generación de algoritmos bioinspirados.

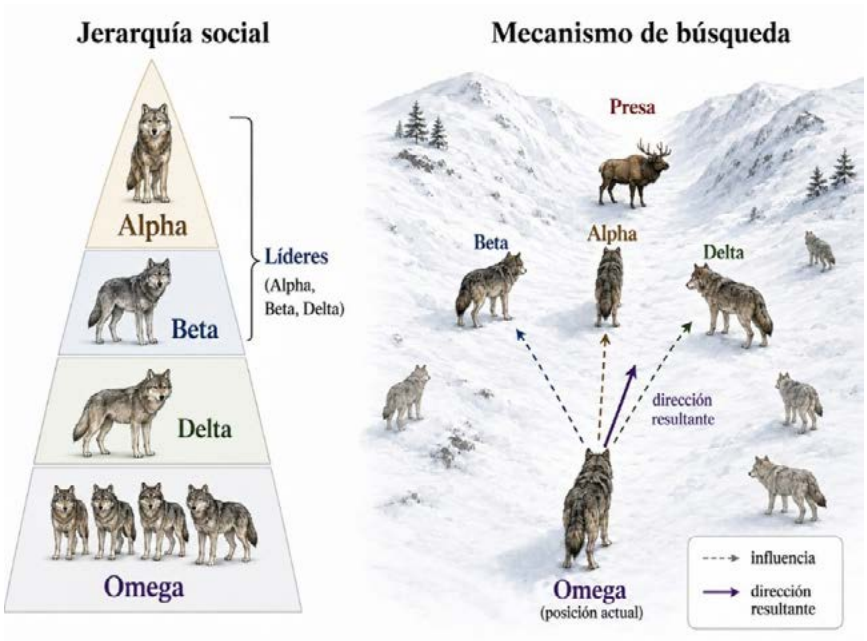
El Ant Colony Optimization (ACO) fue propuesto por Marco Dorigo a principios de la década de los noventa, y su fuente de inspiración es el comportamiento de las colonias de hormigas durante la búsqueda de alimento, en particular el rastro de feromonas que describimos al inicio de esta sección. La metáfora del ACO se puede entender de la siguiente manera: el problema de optimización se representa como un mapa de caminos posibles, cada hormiga artificial es una solución candidata que recorre ese mapa construyendo una ruta paso a paso, y la calidad de cada ruta encontrada se traduce en una cantidad de feromona que la hormiga deposita al regresar. Cuanto mejor es la solución, más fero-

mona deja, de modo que los buenos caminos se vuelven más atractivos para las siguientes hormigas. Sin embargo, para evitar que la colonia se obsesione demasiado rápido con la primera ruta aceptable y quede atrapada en un óptimo local, las feromonas se evaporan poco a poco con el tiempo, lo que obliga a seguir explorando otras posibilidades. De esta manera, el ACO equilibra de forma natural la exploración de nuevos caminos y la explotación de los mejores ya conocidos. Este algoritmo ha resultado especialmente eficaz en problemas donde la solución consiste en encontrar la mejor ruta o el mejor orden dentro de un conjunto de opciones, como el diseño de rutas de transporte o el enrutamiento en redes de comunicación. En el algoritmo de optimización por colonia de hormigas, aunque su metáfora parece sencilla, contiene una idea poderosa: las decisiones individuales pueden dejar señales que modifican el comportamiento colectivo. En un camino real, la feromona refuerza las rutas más prometedoras; en un algoritmo, esa señal se convierte en una memoria compartida del sistema. La evaporación también es esencial, porque evita que una primera solución aceptable domine para siempre la búsqueda. Vista así, la colonia no solo encuentra caminos, sino que aprende a olvidar parcialmente para seguir explorando.

El Grey Wolf Optimization (GWO) fue presentado por primera vez en un artículo científico en el año 2014 por Seyedali Mirjalili y sus colaboradores. La fuente de inspiración de este algoritmo es el comportamiento jerárquico y de caza de los lobos grises en la naturaleza. La metáfora principal del GWO se basa directamente en la estructura social rígida de una manada de lobos. En este algoritmo, el problema de optimización es representado como el espacio de búsqueda y la solución absoluta es la presa que se esconde dentro de él. Al igual que en otros algoritmos, cada lobo representa una solución candidata; sin embargo, en el GWO a cada lobo se le asigna un nivel dentro de la jerarquía social (el cual puede ser alpha, beta, delta u omega). Los tres primeros niveles representan las mejores soluciones descubiertas y actúan como los líderes del grupo, y solo estos tres saben cuál es la ubicación probable de la presa; el resto de la manada (los lobos clasificados como Omega) actualizan constantemente su posición en el espacio de búsqueda, siguiendo, acordonando y promediando los movimientos de los líderes Alpha, Beta y Delta. En el

GWO, la jerarquía no debe entenderse como una simple decoración de la metáfora, sino como una forma de organizar la información disponible. Las tres mejores soluciones no se toman como verdades absolutas, sino como referencias aproximadas de dónde podría estar la mejor respuesta. Los demás lobos ajustan su posición considerando esas referencias y, al hacerlo, rodean gradualmente la zona de búsqueda más prometedora. Esto permite que el algoritmo combine dirección y flexibilidad: sigue a los mejores individuos, pero no se reduce a copiar exactamente el movimiento de uno solo.

Figura 6. *Jerarquía y mecanismo de búsqueda en Grey Wolf Optimization*.



Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

El GWO se ha posicionado rápidamente como uno de los algoritmos predilectos, debido a su funcionamiento original, los pocos parámetros de control que se configuran, su rapidez computacional y los buenos resultados que ha mostrado en diversos problemas de ingeniería. Tam-

bién es importante señalar que ningún algoritmo bioinspirado trabaja por intuición, aunque su explicación se apoye en ejemplos naturales. Detrás de cada metáfora hay parámetros, criterios de parada, reglas de actualización y formas específicas de evaluar la calidad de cada solución. Por eso, aplicar estos métodos no consiste únicamente en elegir un nombre atractivo, sino en comprender cómo se comporta el algoritmo frente al problema real. Una mala configuración puede conducir a resultados pobres, de la misma manera que una buena metáfora puede perder utilidad si se aplica sin conocer sus límites.

Aplicaciones en agua y energía

Al pasar de la explicación de los algoritmos a sus aplicaciones, conviene recordar que los sistemas de agua y energía rara vez se comportan como problemas aislados. Una decisión en un punto del sistema puede modificar muchas otras partes. Encender una planta generadora, cambiar el voltaje de operación de un panel solar, mover una turbina eólica o modificar el diámetro de una tubería no son acciones independientes, pues alteran flujos, costos, pérdidas, presiones o niveles de disponibilidad. Por eso estos sistemas se prestan tan bien a la optimización: contienen muchas variables conectadas entre sí y obligan a buscar equilibrios entre eficiencia, seguridad, costo y confiabilidad.

Despacho de energía

El despacho de energía eléctrica es uno de los problemas más fascinantes de la ingeniería de sistemas de potencia. A grandes rasgos, el objetivo del despacho de energía es minimizar el costo total de la generación de electricidad para satisfacer la demanda de los usuarios en cada momento. Visto de esta manera, el problema suena bastante simple: si sube la demanda de electricidad, enciende la planta generadora más barata; sin embargo, el sistema eléctrico real no funciona de manera lineal ni inmediata. Las razones por las que el despacho de energía eléctrica es considerado un problema tan complejo y las computadoras no pueden encontrar una solución en un lapso de tiempo razonable son las siguientes:

1. Variables binarias: la decisión de comprometer una planta suele representarse como una variable binaria: está encendida o apagada; después, si está encendida, puede operar dentro de ciertos límites de carga. Esto transforma el despacho en un problema de optimización combinatoria. Por ejemplo, si tienes 2 plantas, tienes 4 combinaciones posibles (2^2), pero si tienes 100 plantas de generación eléctrica, existen aproximadamente (2^{100}) combinaciones posibles. Esto equivale a más de un millón de millones de millones de millones de millones de opciones; incluso una computadora capaz de evaluar mil millones de combinaciones por segundo tardaría alrededor de 40 billones de años en revisarlas todas.
2. Restricciones de tiempo: Considera que las decisiones que tomes a las 8:00 am te seguirán afectando hasta las 2:00 pm. Por ejemplo, si enciendes una planta de carbón, no la puedes apagar hasta 8 horas después debido al estrés térmico, o también considera que los costos de encender una planta fría se cuentan en miles de dólares antes de producir el primer megavatio de energía (considera que las turbinas se tienen que calentar mucho antes de empezar a producir electricidad).
3. La física de la red eléctrica: la electricidad no viaja por donde nosotros queremos, sino más bien por donde dictan las leyes de la física; considera, por ejemplo, que el flujo de potencia en corriente alterna se rige por ecuaciones trigonométricas complejas y no lineales.

Dado que una operadora eléctrica no puede esperar años a que una computadora calcule cuál es la mejor solución, una de sus opciones es utilizar diferentes algoritmos basados en la naturaleza, como la optimización por enjambre de partículas (PSO) o el algoritmo genético (GA), los cuales, aunque no encuentran la solución perfectamente óptima, pueden encontrar una solución excelente en apenas un par de minutos.

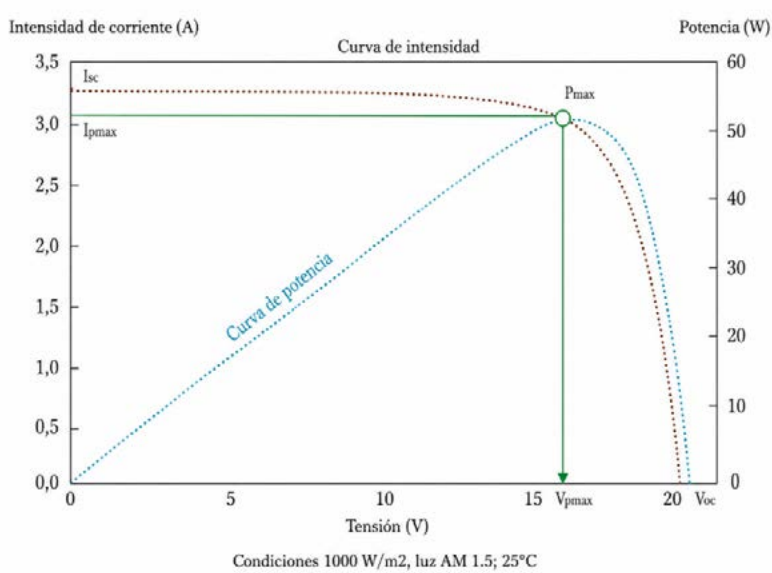
En el despacho de energía, además, el tiempo juega un papel central. No se trata solamente de decidir qué generador conviene usar en este instante, sino de prever cómo esa decisión afectará las siguientes horas. Algunas unidades tardan en arrancar, otras no pueden apagarse de inmediato, las fuentes renovables dependen del clima y la demanda cambia a lo largo del día. Esta combinación hace que el problema se parezca

menos a elegir una sola opción barata y más a organizar una secuencia completa de decisiones. En ese contexto, los algoritmos bioinspirados son valiosos porque pueden explorar muchas rutas posibles de operación y seleccionar aquellas que mantienen el sistema funcionando con menor costo y mayor estabilidad.

Seguimiento del punto de máxima potencia MPPT

Para comprender el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés), debemos saber que los paneles solares son "caprichosos" porque cambian su comportamiento drásticamente según la cantidad de sol (irradiancia), la temperatura y, sobre todo, la resistencia de la carga que se les conecte. Si graficas la corriente (I) frente al voltaje (V) de un panel solar, no obtienes una línea recta, sino una curva muy particular llamada curva I-V, la cual puedes observar a continuación:

Figura 7. *Curvas I–V y P–V de un panel fotovoltaico bajo condiciones estándar*.

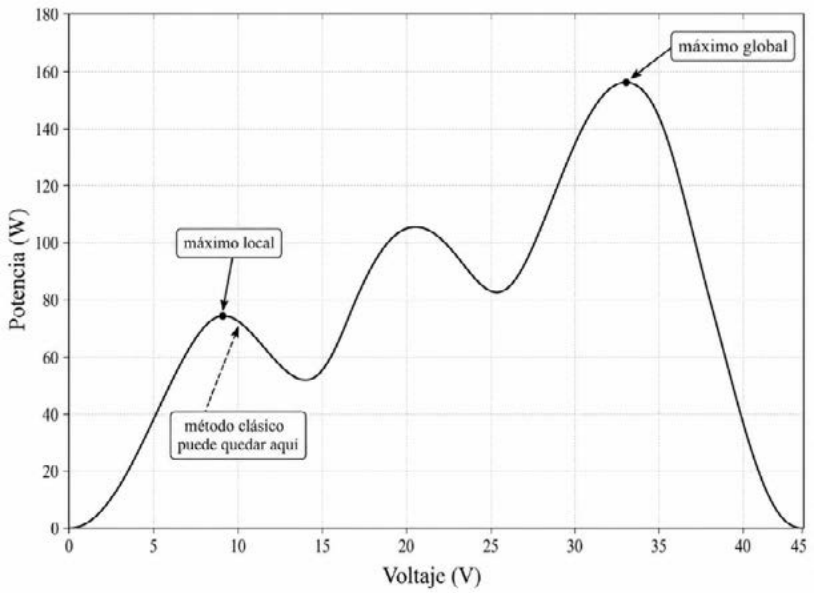


Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

Como puedes observar en la Figura 7, la potencia comienza en cero, sube hasta una "montaña" y después cae en picada. Esa cima de la montaña se considera como el punto de máxima potencia, y si el panel opera a un voltaje más alto o bajo de ese punto, se desperdicia la energía solar. Como ya te imaginarás, un panel solar no está bajo las mismas condiciones en todo momento; el sol cambia de lugar, pasan nubes y la temperatura del panel cambia a través del día, y esto a su vez provoca que la "cima" del punto de máxima potencia se mueva constantemente de lugar. Si dejaras el panel directamente conectado a una batería, el voltaje quedaría fijo (atrapado por el voltaje de la batería), haciendo que el panel trabaje fuera del punto donde produce la máxima cantidad de energía. Entonces, el objetivo del MPPT se trata de cambiar constantemente la "resistencia aparente" que ve el panel para forzarlo a trabajar siempre en el voltaje exacto del punto de máxima potencia. Imagina que es como la transmisión automática de un coche; si vas subiendo un camino muy empinado, el auto cambia la marcha para mantenerse en las revoluciones óptimas.

El verdadero reto viene cuando aparecen las sombras parciales; imagínate que una nube o un árbol cubre una esquina de panel solar, en ese momento deja de existir una sola curva y aparecen varias de ellas, cada una con su propia "cima" de punto de máxima potencia. El MPPT es un buen ejemplo de optimización en tiempo real, porque el problema no se resuelve una sola vez. La mejor condición de operación del panel cambia conforme cambian la radiación solar, la temperatura y las sombras sobre el módulo. En un día despejado, la búsqueda puede ser relativamente sencilla; pero cuando aparecen sombras parciales, la curva de potencia se vuelve más irregular y aparecen varios picos. En ese escenario, el controlador debe distinguir entre una cima pequeña y la mejor cima disponible. Esta situación conecta directamente con la idea del óptimo local y el óptimo global explicada al inicio del capítulo. Un algoritmo convencional que trata de encontrar el punto óptimo a través de ensayo y error escalaría la primera curva y se quedaría atrapado en ese óptimo local, ignorando que existen otros puntos que representan mucho mejores soluciones.

Figura 8. *Máximos locales y máximo global en el seguimiento de máxima potencia bajo sombreado parcial.*



Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

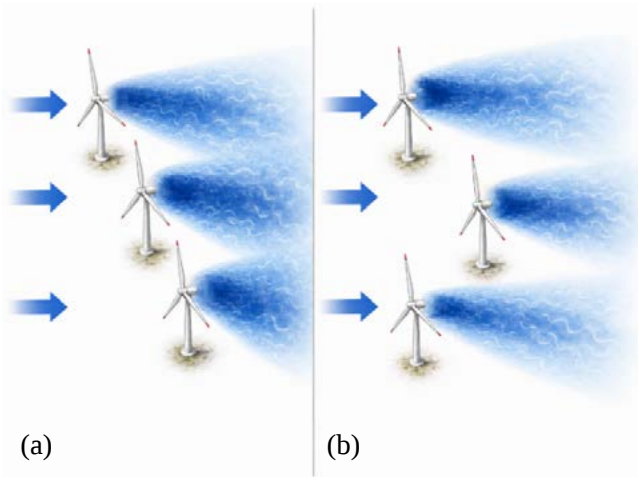
A diferencia de los métodos clásicos que se utilizan para encontrar el MPPT, un algoritmo basado en la naturaleza enviaría distintos individuos a distintas partes del voltaje de manera simultánea; luego estos agentes se comunicarían entre ellos y la población se movería hasta la cima más alta encontrada, ignorando las más pequeñas. La utilidad de estos métodos en sistemas solares no significa que siempre deban reemplazar a los controladores convencionales. En condiciones simples, un método clásico puede ser suficiente y más fácil de implementar. La ventaja de los algoritmos bioinspirados aparece con mayor claridad cuando el paisaje de búsqueda se vuelve irregular, como ocurre bajo sombras parciales, cambios rápidos de irradiancia o condiciones variables de operación. En esos casos, explorar varias regiones de la curva puede evitar que el sistema se conforme con una potencia aceptable, pero inferior a la máxima disponible.

Diseño de parques eólicos (ubicación de turbinas)

Piensa por un momento que eres un ingeniero, el cual trabaja para una compañía que se dedica a diseñar e instalar parques eólicos. Un día tu jefe te encarga que diseñes un parque eólico desde cero y más específicamente quiere que ubiques 20 turbinas dentro de un espacio determinado para aprovechar de la mejor manera el viento disponible. A simple vista no parece un problema tan complejo, ¿no es así? La intuición te dice que, si el viento viene del norte, simplemente colocas todas las turbinas de manera perpendicular y tienes el problema resuelto. Sin embargo, este es uno de los problemas más complejos e interesantes dentro de la ingeniería de energías renovables. ¿De dónde surge la complejidad de este problema? Pues bien, el principal problema es lo que se conoce como el efecto estela; considera que cuando el viento pasa a través de las aspas de una turbina, ocurre lo siguiente:

1. La turbina extrae energía cinética del viento para generar electricidad.
2. Detrás de la turbina, el viento sale con mucha menos velocidad y con una turbulencia enorme.

Figura 9. *Efecto estela en parques eólicos: (a) alineación problemática con interferencia directa entre aerogeneradores y (b) disposición escalonada con menor superposición de estelas.*



Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

Si colocaras una segunda turbina directamente detrás de la primera, esa segunda turbina recibiría un viento que ya ha sido usado y que es mucho más caótico, lo cual provocaría lo siguiente:

- Pérdida de energía: la segunda turbina produciría apenas una fracción de lo que debería.
- Fatiga mecánica: como el viento golpea de manera irregular en las aspas, desgasta los componentes mecánicos y acorta la vida útil del generador.

En resumen, el objetivo es ubicar N turbinas eólicas dentro de un terreno determinado para maximizar la producción de energía y reducir el efecto estela entre ellas. Esto se convierte en una pesadilla matemática por las siguientes razones:

1. Explosión combinatoria del problema: Para resolver este problema en una computadora, el terreno se suele dividir en cuadrículas; entonces, si tienes un terreno dividido en 100 posibles lugares y quieres colocar 20 posibles turbinas, el número de combinaciones posibles se calcula mediante combinatoria. Además, si el terreno es apenas un poco más grande o quieres colocar más turbinas, el número de combinaciones crece de manera explosiva; probar cada opción es imposible (una característica clásica de los problemas NP-Hard).
2. Interdependencia de cada turbina: La posición de la turbina 1 afecta la turbina 2, pero a su vez, la turbina 2 afecta la turbina 3. Si mueves la primera turbina apenas unos pocos metros, afectas el flujo del aire de todo el parque. En otras palabras, no puedes optimizar la posición de una turbina de forma aislada; tienes que optimizar todas las posiciones al mismo tiempo.
3. Volatilidad del viento: El viento no siempre sopla en la misma dirección y a la misma velocidad. Los ingenieros utilizan herramientas para medir en qué direcciones y con qué intensidad sopla el viento durante todo el año en una zona específica. El diseño del parque debe ser eficiente para todas esas condiciones climáticas combinadas.

Dado que una computadora tardaría miles de años en evaluar cada escenario posible por fuerza bruta, ¿cómo se diseña un parque eólico en la práctica? Como es de esperarse, la industria y la academia recurren a

los algoritmos bioinspirados para hallar soluciones altamente eficientes en un tiempo razonable. Un claro ejemplo son los algoritmos genéticos (GA). Bajo este enfoque, cada configuración del parque se trata como un "individuo". Aquellas distribuciones que maximizan la producción energética y mitigan el efecto estela logran "sobrevivir y reproducirse". Por el contrario, los diseños ineficientes o con excesiva turbulencia son descartados a lo largo de las generaciones. De este modo, la emulación de la selección natural nos permite resolver un problema masivo en cuestión de horas. En los parques eólicos, el viento debe entenderse como un recurso compartido. Cada turbina extrae parte de la energía disponible y modifica las condiciones que reciben las turbinas ubicadas detrás de ella. Por eso, una distribución aparentemente ordenada puede ser ineficiente si coloca varias máquinas dentro de la misma estela. La optimización del arreglo busca evitar, en la medida de lo posible, que las turbinas posteriores trabajen con viento debilitado y turbulento. No se trata solo de colocar más aerogeneradores en un terreno, sino de acomodarlos de forma que el conjunto produzca más y sufra menos desgaste.

Diseño de redes de distribución de agua potable

El diseño de redes de tuberías para la distribución de agua potable en una ciudad es uno de los mayores problemas que enfrentan los estados y gobiernos actualmente. A simple vista, parece que solo tienes que llevar agua del punto A al punto B; sin embargo, también tienes que garantizar que en cada punto llegue con la presión suficiente, con el menor costo posible y, por si fuera poco, sorteando las restricciones de la física. La complejidad del diseño de una red de agua potable viene principalmente de tres factores:

1. Decisiones discretas: Las tuberías solo se venden en diámetros preestablecidos (por ejemplo: 2, 4, 6, 8 pulgadas). Si quieres fabricar una red pequeña de 50 tramos y el fabricante te ofrece 10 diámetros de tubería distintos, el número de combinaciones es 10^50; una computadora que pruebe combinación por combinación tardaría millones de años en terminar.

2. Leyes de hidráulica: El agua no se comporta de manera lineal; si modificas el diámetro de una sola tubería en el norte de la ciudad, cambias las presiones y caudales de toda la red.
3. Restricciones de seguridad: Tienes que asegurar que el agua llegue con suficiente presión como para subir al segundo piso de una casa, pero tampoco que sea tan alta como para reventar o erosionar las tuberías de la red.

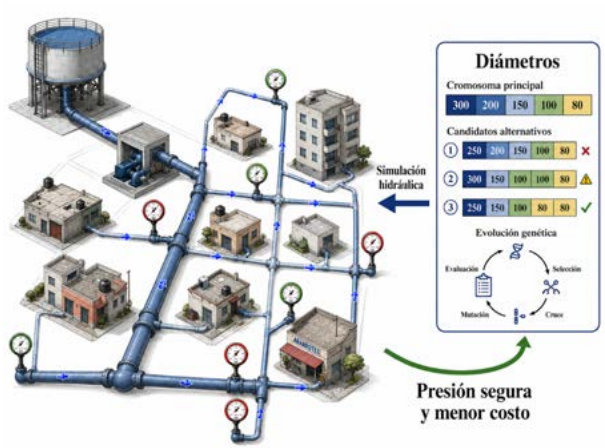
En el mundo real, para diseñar las redes de agua potable de una ciudad se utiliza software especializado que calcula la presión y los caudales de una combinación en específico; además, un algoritmo bioinspirado (como el algoritmo genético) se conecta al software, el cual tiene la tarea de generar las combinaciones que serán evaluadas. El proceso, a grandes rasgos, sigue los siguientes pasos:

1. El algoritmo genético crea un montón de redes de agua de manera aleatoria (cada una con diámetros de tubería distintos).
2. El software especializado simula cada red; si alguna de ellas deja sin agua a una colonia o las tuberías revientan por la presión, el algoritmo penaliza esas opciones de manera enorme.
3. Las redes que logran llevar agua a todos lados cumpliendo con las presiones adecuadas y además son baratas en materiales sobreviven y se reproducen entre sí.
4. Después de muchas generaciones, el algoritmo encuentra una combinación de diámetros que produce una red físicamente segura y además económica.

En el caso de las redes de agua potable, la optimización también tiene una dimensión social evidente. No basta con que la red sea barata en términos de materiales; debe garantizar que el agua llegue con presión suficiente a los usuarios y que la infraestructura no opere bajo condiciones que aumenten el riesgo de fallas. Una solución técnicamente económica puede ser inaceptable si deja sin servicio a una zona alta de la ciudad o si genera presiones excesivas en tuberías antiguas. Por esta razón, el algoritmo no solo compara costos, sino que penaliza las alternativas que

no cumplen con las condiciones mínimas de funcionamiento. Así, la mejor red no es simplemente la más barata, sino la que logra un equilibrio razonable entre costo, seguridad y servicio.

Figura 10. *Optimización bioinspirada de una red de agua potable mediante algoritmos genéticos*.



Fuente: elaboración propia, asistida mediante herramientas de inteligencia artificial generativa.

En la Figura 10, el algoritmo propone diferentes combinaciones de diámetros de tubería y la simulación hidráulica evalúa si la red cumple con presiones adecuadas y menor costo. Así, las mejores configuraciones sobreviven y se refinan generación tras generación. Como dato extra, este problema es tan complejo y ofrece una combinación de redes hidráulicas tan enorme que incluso un algoritmo genético a veces tiene problemas para converger y encontrar una solución óptima. Debido a esto, algunos trabajos han propuesto acotar las combinaciones posibles eliminando los diámetros de tubería que jamás funcionarían en ciertas calles y después introducir el algoritmo genético para refinar las soluciones restantes, reduciendo drásticamente el tiempo de cómputo que se requiere.

Estado actual y futuro

La proliferación de algoritmos inspirados en la naturaleza, basados en metáforas cada vez más diversas, está llegando a un punto de saturación. Existen tantos algoritmos, y fundamentados en analogías tan distintas, que cabe preguntarse si realmente hay un aporte genuino al emplear uno u otro. El planteamiento es el siguiente: si bien las hormigas son buenas para encontrar la ruta más corta hacia su hormiguero, y los lobos son eficientes cazando, ¿qué determina entonces la elección de un algoritmo sobre otro? Esto podría parecer una pregunta negativa, que condenara el hecho de que científicos e ingenieros desarrollen nuevos algoritmos a partir de nuevas metáforas. Sin embargo, recordemos que, así como en la naturaleza ningún animal (con la posible excepción del ser humano) es un generalista, ningún algoritmo lo es tampoco. Es decir, ninguna especie posee estrategias de búsqueda de alimento o de supervivencia que resulten óptimas en todos los entornos: los animales y las plantas son especialistas, perfectamente adaptados a su nicho, y si los trasladáramos a otro ecosistema, podrían no sobrevivir. Lo mismo ocurre con los algoritmos. El problema, sin embargo, no reside en los algoritmos en sí, sino en el tipo de problema que se está abordando. Así, no todos los problemas se resuelven igual de bien con todos los algoritmos. Esta idea, lejos de ser una simple intuición, está respaldada por un resultado matemático conocido como el teorema de la "no existencia de un almuerzo gratis" (No Free Lunch), el cual demuestra que, si se promedia el desempeño sobre todos los problemas posibles, ningún método de optimización es intrínsecamente superior a los demás: cada algoritmo destaca únicamente cuando sus mecanismos se ajustan bien a la naturaleza particular del problema que se desea resolver.

Una manera de navegar en este mar, cada vez más extenso, de algoritmos inspirados en la naturaleza, y poder determinar cuál es el más conveniente para una aplicación concreta, es seguir una serie de pasos que nos orienten hacia la elección más adecuada. En primer lugar, hay que tener bien identificadas las características generales del problema de optimización, principalmente su grado de complejidad (número de variables y de restricciones), así como la cantidad de objetivos a satisfacer.

Por ejemplo, en los problemas de despacho de energía contamos con una variedad de fuentes de generación (paneles solares fotovoltaicos, turbinas eólicas, generadores de biogás, entre otros) y con diversas unidades de almacenamiento o respaldo (baterías, generadores diésel, etc.). Sin embargo, no basta con conocer el problema: también es necesario disponer de un amplio catálogo de evaluaciones rigurosas y estandarizadas de los algoritmos, realizadas con funciones de prueba complejas y de elevada dimensión que sean representativas de distintos tipos de problemas. Esta es, precisamente, un área de interés y de trabajo a futuro: elaborar un mapeo de algoritmos de diversa naturaleza, catalogar su desempeño frente a una variedad de problemas y construir una base de datos que, en función de las características principales del problema por enfrentar, nos permita seleccionar entre los algoritmos más apropiados.

Otro punto de interés en la investigación, más allá de la creación de nuevas metáforas, consiste en ampliar y mejorar los algoritmos existentes integrando técnicas modernas de inteligencia artificial y capacidades multiobjetivo. Estas últimas son especialmente útiles en los sistemas combinados de energía y agua, donde intervienen numerosas variables de distinta naturaleza (por ejemplo, la potencia que aporta cada fuente de generación, el estado de carga de las baterías, el caudal y la presión en una red de distribución de agua, o el arranque y paro de las unidades de respaldo) y donde se busca simultáneamente maximizar los beneficios y minimizar los costos.

Conclusiones

Desde el punto de vista de la ingeniería, los sistemas son cada vez más complejos e involucran un mayor número de variables y de objetivos. Tal es el caso de los sistemas de aprovisionamiento de agua y energía en las ciudades, donde ambos confluyen en lo que se conoce como el nexo agua-energía, un vínculo que no puede separarse ni comprenderse por partes aisladas. Ante este panorama de problemas multidimensionales y con múltiples objetivos, la naturaleza nos enseña una lección importante: para que algo funcione no es necesario que lo haga con precisión

milimétrica, sobre todo en situaciones que sería imposible modelar con exactitud; basta con que seamos capaces de identificar soluciones lo más cercanas posible al óptimo global.

Sin embargo, los algoritmos de optimización inspirados en la naturaleza no son una solución mágica: requieren un conocimiento previo del problema y una experimentación inicial. Esto se debe a que no existen algoritmos generalistas; cada uno se basa en una metáfora distinta de la naturaleza y, por tanto, sus mecanismos de búsqueda están condicionados por esa misma metáfora que los inspira. De ahí la importancia de una investigación más profunda que permita determinar, de manera sistemática y según el tipo de problema, cuál es el algoritmo más adecuado. Si bien estos métodos son herramientas poderosas y de gran valor para los problemas de sostenibilidad, su verdadero potencial se libera únicamente cuando se seleccionan y ajustan de forma apropiada a cada aplicación concreta.

Al final, como especie, debemos reconocer que la naturaleza tiene mucho que enseñarnos. Conviene mirarla y tomarla como inspiración y modelo para construir una civilización sostenible, fundada en la búsqueda del equilibrio entre la generación y el consumo de bienes, servicios y recursos. Si bien durante buena parte de los siglos XIX y XX la corriente científica y filosófica predominante en la mayoría de las sociedades sostenía que, como seres inteligentes, teníamos el derecho y casi la obligación de dominar y doblegar a la naturaleza a nuestro antojo, los desafíos surgidos a finales del siglo XX (el calentamiento global, la amenaza de una creciente escasez energética, el aumento del hambre y las desigualdades sociales) y, más recientemente, la pandemia de COVID-19, nos han mostrado que, pese a nuestro poder tecnológico, la naturaleza es más grande que nosotros. Ello nos invita a volver a mirarla como fuente de inspiración para encontrar soluciones elegantes y eficientes a problemas complejos, tal como ella lo ha hecho durante millones y millones de años. Como dijo Carl Sagan: “La naturaleza es siempre más sutil, más intrincada y más elegante de lo que somos capaces de imaginar” (Sagan, 2000).

Referencias

Águila-León, J., Vargas-Salgado, C., Díaz-Bello, D. & Montagud-Montalvá, C. (2024). Optimizing photovoltaic systems: A meta-optimization approach with GWO-enhanced PSO algorithm for improving MPPT controllers. *Renewable Energy*, *230*, Artículo 120892. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120892

Dorigo, M., Maniezzo, V. & Colorni, A. (1996). Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, *26*(1), 29–41.

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley.

Hu, W., Yang, Q., Yuan, Z. & Yang, F. (2024). Wind farm layout optimization in complex terrain based on CFD and IGA-PSO. *Energy*, *288*, Artículo 129745. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129745

Kennedy, J. & Eberhart, R. C. (1995). Particle swarm optimization. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942–1948). IEEE.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, *69*, 46–61.

Reca, J., Martínez, J. & López, R. (2017). A hybrid water distribution networks design optimization method based on a search space reduction approach and a genetic algorithm. *Water*, *9*(11), 845. https://doi.org/10.3390/w9110845

Sagan, C. (2000). *El mundo y sus demonios: La ciencia como una luz en la oscuridad* (D. Udina, Trad.). Planeta. (Obra original publicada en 1995).

Capítulo 15

Cómo la inteligencia artificial ayuda a diseñar receptores solares más eficientes para almacenar energía

Mónica Camas Náfate[1]
Jesus Aguila León[1]
Delmer Gómez Heleria[2]
Luis Alberto Borraz Jonapá[3]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008127

[1] Departamento de Estudios del Agua y la Energia. Centro Universitario de Tonala. Universidad de Guadalajara
[2] Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México; Instituto Mexicano de Tecnología
[3] Universidad Autonoma de Chiapas. Escuela de Ciencias Químicas Campus Ocozocuautla

Resumen

La transición energética en México requiere soluciones que atiendan el consumo de calor industrial, responsable de una parte importante de la demanda energética nacional. En este contexto, el almacenamiento térmico se presenta como una estrategia clave para integrar energías renovables, reducir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la resiliencia de sectores como el alimentario, químico, papelero, cementero y siderúrgico. El capítulo analiza cómo la selección de tecnologías depende del nivel de temperatura requerido, desde sistemas solares para baja temperatura hasta almacenamiento de alta temperatura mediante partículas sólidas en sistemas de concentración solar (CSP). Asimismo, se destaca el potencial de las comunidades térmicas inteligentes para compartir infraestructura energética y optimizar el uso del calor entre diferentes usuarios industriales. Posteriormente, se explora el papel de la inteligencia artificial como herramienta para acelerar el diseño y la optimización de sistemas de almacenamiento térmico. Mediante algoritmos bioinspirados, redes neuronales y simulaciones computacionales, es posible evaluar miles de configuraciones y encontrar diseños con mayor eficiencia térmica, menor uso de materiales y menores esfuerzos mecánicos. Como caso de estudio, se presenta la optimización de un receptor solar para sistemas CSP utilizando el algoritmo ANEMMSO, cuyos resultados muestran reducciones cercanas al 32 % en la masa del receptor, disminución de esfuerzos térmicos y un incremento de la temperatura de operación, mejorando la capacidad de almacenamiento energético. Se concluye que la convergencia entre almacenamiento térmico e inteligencia artificial constituye una oportunidad estratégica para impulsar la descarbonización y la competitividad de la industria mexicana.

Introducción

Las energías renovables buscan ser partícipes importantes del marco energético de muchos países en el mundo; México no es la excepción. Sin embargo, una de las características que ha impedido la consolidación del uso de energías renovables en la transición energética es la inestabilidad del recurso. Por ejemplo, en el caso de la energía fotovoltaica, cuya generación se interrumpe por completo durante la noche y sufre fluctuaciones abruptas durante el día debido a la nubosidad transitoria; un fenómeno que, según la CEPAL (2018), exige una alta resiliencia y sistemas de almacenamiento que la región aún está desarrollando a gran escala. Por su parte, la energía eólica introduce una alta volatilidad debido a la predictibilidad limitada de las corrientes de aire. En contextos como el mercado eléctrico colombiano, la literatura científica destaca que la variabilidad del viento, intensificada por fenómenos climáticos extremos como El Niño o La Niña, genera desajustes entre la oferta y la demanda, obligando a los países a depender de plantas térmicas de respaldo (fósiles) para evitar apagones y mantener la frecuencia de la red (Ramírez et al., 2020; Castillo y Benavides, 2021). Así, la integración masiva de estas tecnologías en la matriz latinoamericana no solo requiere infraestructura física, sino también marcos regulatorios flexibles que gestionen eficazmente el riesgo de desbalance energético.

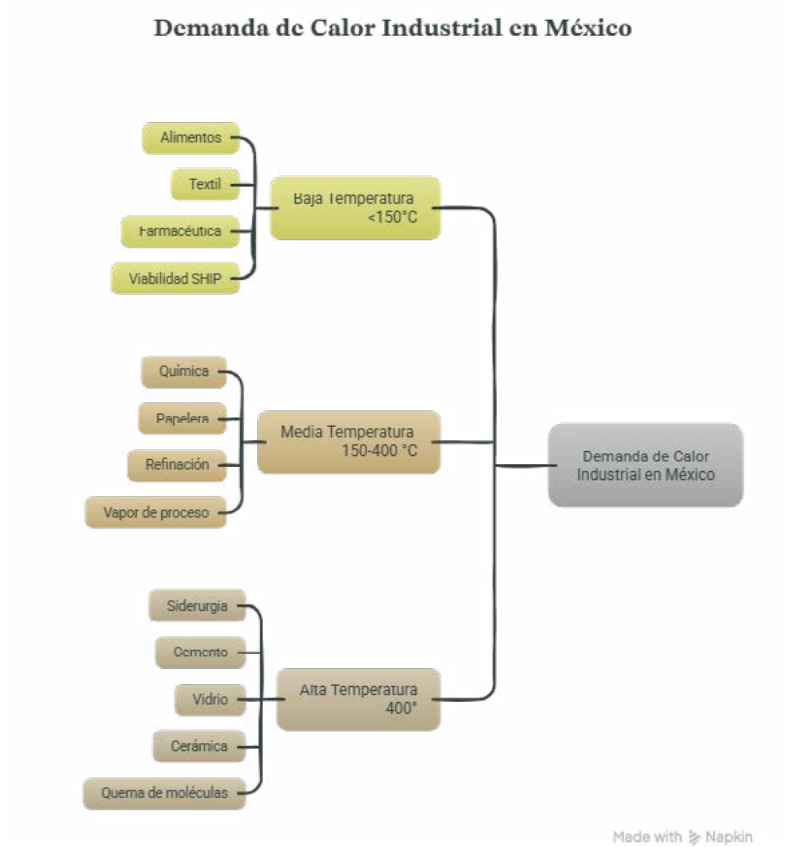
Por ello, el almacenamiento de energía se presenta como una adecuación y también como una herramienta útil para la transición energética. No obstante, el almacenamiento de energía debe estar asignado de manera correcta a la fuente de generación a la cual va a aportar.

Esto tiene que ver con lo que, muchas veces, se ve ignorado: la aplicación y uso final de la energía. Por citar un ejemplo, cuando el sector energético analiza la transición en México, la conversación suele gravitar con una fuerza desproporcionada hacia la matriz eléctrica y la adición de capacidad renovable a la red. Sin embargo, el Balance Nacional de Energía nos muestra una realidad distinta sobre el consumo real del tejido productivo: el sector industrial representa casi una tercera parte del consumo final total del país, y de ese universo, más del 65 % de los requerimientos energéticos no son eléctricos, sino térmicos (SENER,

2023; GIZ, 2021). El verdadero meollo del asunto en la transición energética de la manufactura mexicana no está en los cables de media y alta tensión, sino en las calderas, intercambiadores y hornos de proceso.

Actualmente, la demanda de calor industrial en México está profundamente anclada a la quema directa de combustibles fósiles, con el gas natural como el vector energético hegemónico debido a su alta densidad energética y competitividad en costos (SENER, 2023). Desplazar este consumo no es un problema de disponibilidad de recurso solar o eólico, sino un desafío de acoplamiento térmico y restricciones termodinámicas, donde las soluciones tecnológicas y su viabilidad financiera varían drásticamente según la escala de temperatura requerida:

Figura 1.

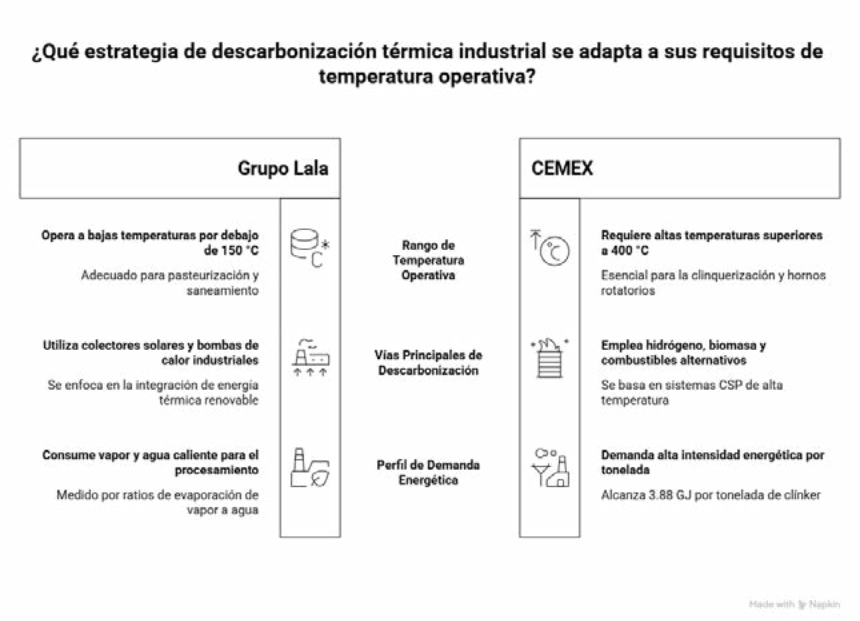


Elaboración propia mediante Napkin AI con base en Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2018) e International Energy Agency & ETSAP (2015).

Por lo que pensar en almacenamiento de energía para este sector suele ser ignorado en su totalidad, cuando en realidad presentan grandes áreas de oportunidades debido a los fluidos de trabajo y a los procesos de utilización del calor. Como bien explica la Figura 1, se tienen diferentes formas y temperaturas de aplicación de calor en la industria mexicana. Es por ello que se debe pensar en adecuaciones propias para cada sector industrial de acuerdo a sus necesidades de calor. A continuación se tiene un pequeño análisis por niveles de temperatura y viabilidad de sustitución:

- Baja temperatura (< 150 °C): Procesos de lavado, pasteurización, esterilización y secado, comunes en las industrias alimentaria, de bebidas y textil. Aquí es donde México presenta la mayor viabilidad técnica inmediata gracias a sus niveles de irradiancia global horizontal (GHI). Los sistemas SHIP (Solar Heat for Industrial Processes) mediante colectores parabólicos compuestos (CPC) o de placa plana son comercialmente competitivos hoy en día, ofreciendo un retorno de inversión atractivo al desplazar directamente gas LP o gas natural en el suministro de agua caliente o vapor de baja presión (Solar Payback, 2020).
- Media temperatura (150 °C a 400 °C): Principalmente, generación de vapor de proceso para las industrias química, petroquímica y papelera. En este segmento, la electrificación mediante bombas de calor industriales de alta temperatura (HTHP) comienza a ser una opción técnica. Sin embargo, el principal obstáculo es el spark spread: la diferencia entre las tarifas eléctricas industriales y el costo por millón de BTU del gas natural hace que el costo operativo (opex) de la reconversión tecnológica sea difícil de justificar financieramente bajo las condiciones actuales del mercado mexicano (CONUEE / GIZ, 2022).
- Alta temperatura (> 400 °C): El sector más complejo de la matriz de energía primaria. Industrias como la cementera, la siderúrgica y la del vidrio operan hornos que superan los 1,000 °C. A estas escalas, sustituir la combustión por arcos eléctricos de manera masiva colapsaría la infraestructura de transmisión local y comprometería la viabilidad económica del proceso (GIZ, 2021). La sustitución de combustibles fósiles en este nicho dependerá del desarrollo a escala de vectores limpios como el hidrógeno verde o el aprovechamiento de biomasa residual avanzada.

Figura 2. *Ejemplos de empresas operando en México, uso y aplicación del calor y opciones de descarbonización.*



Elaboración Propia mediante NAPKIN IA, con base en Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2018) e International Energy Agency & ETSAP (2015).

A medida que aumentan las temperaturas requeridas por los procesos industriales, también crece la complejidad tecnológica. Industrias como la papelera, química o cervecera necesitan producir vapor a temperaturas más elevadas y de forma continua. En estos casos, el almacenamiento térmico permite aprovechar electricidad procedente de fuentes renovables para generar calor cuando las condiciones son favorables y utilizarlo posteriormente en la producción. De esta manera, las empresas pueden reducir su dependencia de los combustibles fósiles sin comprometer la continuidad de sus operaciones.

El reto más importante aparece en las industrias de alta temperatura, como la cementera, siderúrgica o del vidrio. Estos sectores requieren temperaturas que pueden superar los mil grados Celsius y constituyen algunos de los procesos industriales más difíciles de descarbonizar a nivel mundial. Aunque todavía existen desafíos técnicos y económicos

por resolver, el desarrollo de baterías térmicas basadas en materiales cerámicos, ladrillos refractarios o lechos de roca está abriendo nuevas posibilidades para almacenar grandes cantidades de energía y suministrar calor a estos procesos de manera más sostenible. (International Energy Agency, 2023).

Esta diversidad de requerimientos térmicos demuestra que no existe una única solución capaz de atender todas las necesidades energéticas de la industria mexicana. El desafío no consiste únicamente en generar calor renovable, sino en almacenarlo, gestionarlo y suministrarlo de forma eficiente según las características de cada proceso. Bajo esta perspectiva, el almacenamiento térmico deja de ser un componente aislado para convertirse en un elemento estratégico dentro de ecosistemas energéticos más amplios.

Iniciativas internacionales como SmartTESS (Smart Thermal Energy Storage Systems) han comenzado a explorar precisamente esta visión, integrando almacenamiento térmico, digitalización y control inteligente para optimizar el uso del calor en entornos industriales complejos.

Hoy en día, los sistemas de almacenamiento ya no se conciben únicamente como depósitos donde se guarda energía para utilizarla posteriormente. En cambio, comienzan a entenderse como componentes activos dentro de ecosistemas energéticos inteligentes capaces de interactuar con usuarios, fuentes renovables, procesos industriales y redes energéticas.

Esta evolución se refleja en iniciativas europeas como SmartTESS (Smart Thermal Energy Storage Systems), cuyo enfoque trasciende el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento para centrarse en la integración inteligente del calor dentro de sistemas energéticos cada vez más complejos. La idea fundamental es sencilla pero poderosa: almacenar energía no es suficiente; es necesario utilizarla en el momento adecuado, en el lugar adecuado y para el proceso adecuado. (FH Aachen University of Applied Sciences, 2025). Bajo esta visión, el almacenamiento térmico deja de ser un elemento aislado y se convierte en un componente estratégico para la gestión energética industrial.

La filosofía promovida por SmartTESS resulta particularmente relevante para México debido a la elevada participación del calor industrial en el consumo energético nacional. Sectores como el alimentario, cervecero,

azucarero, papelero y químico presentan perfiles de demanda térmica compatibles con estrategias de almacenamiento capaces de incrementar la penetración de energías renovables y mejorar la resiliencia energética de los procesos productivos. Más allá del almacenamiento individual, estos enfoques abren la posibilidad de desarrollar comunidades térmicas inteligentes donde múltiples usuarios compartan infraestructura de generación y almacenamiento, optimizando el aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles a escala regional.

Cuando se habla de energía, la atención suele dirigirse hacia la electricidad. Sin embargo, una gran parte del consumo energético industrial corresponde a calor de proceso.

La industria alimentaria constituye un ejemplo representativo. Actividades como la pasteurización de leche, la producción de cerveza, el procesamiento de frutas, la elaboración de conservas o el secado de alimentos requieren cantidades significativas de energía térmica. En muchos casos, esta demanda representa el principal consumo energético de la planta.

Paradójicamente, gran parte de este calor se produce mediante combustibles fósiles a pesar de que las temperaturas requeridas suelen encontrarse dentro de rangos compatibles con tecnologías renovables y sistemas de almacenamiento térmico. Aquí es donde proyectos como SmartTESS adquieren relevancia. Su planteamiento no consiste únicamente en sustituir combustibles fósiles por energías renovables, sino en desarrollar sistemas capaces de gestionar el calor de forma inteligente, maximizando el aprovechamiento de los recursos disponibles y reduciendo desperdicios energéticos.

La aplicación de estos conceptos resulta especialmente interesante para México. El país cuenta con una combinación poco común de características favorables: una elevada disponibilidad de recurso solar, una importante actividad agroindustrial y una creciente necesidad de mejorar la competitividad energética de sus procesos productivos. Sectores como el lácteo, cervecero, azucarero, tequilero, hortofrutícola y cárnico presentan demandas térmicas relativamente constantes a lo largo del año y operan en rangos de temperatura donde el almacenamiento térmico puede implementarse con tecnologías ya disponibles comercialmente.

Por ejemplo, una planta procesadora de alimentos podría almacenar energía solar captada durante las horas de mayor irradiación y utilizarla posteriormente durante los turnos nocturnos. De manera similar, una destilería podría aprovechar excedentes térmicos generados durante ciertas etapas del proceso para alimentar otras operaciones dentro de la misma instalación. No obstante, el verdadero potencial aparece cuando estos sistemas dejan de operar de forma aislada.

Uno de los conceptos más innovadores asociados a la filosofía SmartTESS es la integración de múltiples usuarios energéticos dentro de una misma infraestructura térmica. Tradicionalmente, cada empresa produce y consume su propio calor. Sin embargo, desde una perspectiva energética, esto no siempre resulta eficiente. En regiones donde se concentran actividades agroindustriales, diferentes empresas podrían compartir infraestructura de generación y almacenamiento térmico. Una instalación podría disponer de excedentes energéticos en determinados momentos, mientras otra enfrenta una demanda elevada. Mediante sistemas adecuados de gestión y distribución, el calor podría intercambiarse y aprovecharse de forma más eficiente.

Este enfoque es particularmente atractivo para regiones productivas mexicanas como Los Altos de Jalisco, la zona aguacatera de Michoacán, los corredores agroindustriales de Guanajuato o las regiones agrícolas del noroeste del país.

La creación de redes térmicas compartidas permitiría reducir costos energéticos, incrementar la penetración de energías renovables y fortalecer la competitividad regional.

Más allá de la tecnología, la adopción del almacenamiento térmico representa una oportunidad estratégica para la industria mexicana. La volatilidad en los precios internacionales de los combustibles ha demostrado que depender exclusivamente de fuentes fósiles implica riesgos económicos importantes. Incorporar sistemas capaces de almacenar energía permite a las empresas mejorar su resiliencia, optimizar sus costos operativos y aprovechar de forma más eficiente los recursos energéticos disponibles. (International Energy Agency & ETSAP, 2015; CONUEE, 2018).

Además, el almacenamiento térmico puede convertirse en un aliado para la integración de energías renovables dentro de parques industriales,

comunidades energéticas e incluso sistemas regionales de suministro de calor. En lugar de considerar la energía solar o eólica como recursos intermitentes, estas tecnologías permiten transformarlas en fuentes de energía gestionables y adaptadas a las necesidades reales de la producción industrial (Mahdi et al., 2024).

México cuenta con condiciones privilegiadas para avanzar en esta dirección. La disponibilidad de recurso solar, la creciente necesidad de reducir emisiones y la búsqueda de mayor competitividad industrial crean un escenario favorable para la incorporación de soluciones de almacenamiento energético. Si bien algunas aplicaciones todavía requieren investigación y desarrollo, otras ya pueden implementarse hoy en sectores industriales que demandan calor de baja y media temperatura.

En este contexto, el almacenamiento térmico deja de ser una tecnología del futuro para convertirse en una herramienta práctica que puede contribuir a una industria más eficiente, más limpia y mejor preparada para enfrentar los desafíos energéticos de las próximas décadas. Al final, la transición energética no dependerá únicamente de producir energía renovable, sino también de aprender a conservarla y utilizarla de manera inteligente cuando realmente se necesita.

El desarrollo tecnológico para este camino puede sonar gigantesco para un país del sur global. Sin embargo, se debe tomar en cuenta el capital humano especializado con el que cuenta México, además de una creciente población especialista en inteligencia artificial. Es ahí donde una combinación peculiar da paso a que la transferencia tecnológica en México no suene imposible.

Durante mucho tiempo, cuando se hablaba de inteligencia artificial (IA), la mayoría de las personas imaginaba robots, asistentes virtuales o sistemas capaces de generar texto e imágenes. Sin embargo, una de las aplicaciones más prometedoras de la IA se está desarrollando lejos de las pantallas y mucho más cerca de los sistemas energéticos que sostienen la actividad industrial.

En el caso del almacenamiento de energía térmica, la inteligencia artificial no reemplaza a las tecnologías existentes; las vuelve más eficientes, más económicas y fáciles de implementar. De hecho, buena parte de los avances recientes en energía solar térmica y almacenamiento dependen

cada vez más de herramientas capaces de analizar grandes cantidades de información y encontrar soluciones que serían prácticamente imposibles de identificar mediante métodos tradicionales.

Un ejemplo de ello puede observarse en el diseño de sistemas de almacenamiento térmico para energía solar de concentración (CSP). En investigaciones recientes se han utilizado algoritmos bioinspirados apoyados por redes neuronales para optimizar receptores solares capaces de operar a temperaturas superiores a 800 °C. Estos sistemas son capaces de explorar miles de configuraciones posibles, evaluando simultáneamente variables como la retención térmica, la resistencia mecánica y la cantidad de material utilizado, hasta encontrar diseños más eficientes que los obtenidos mediante procedimientos convencionales. En algunos casos, estos métodos han permitido reducir esfuerzos mecánicos, disminuir el uso de materiales y aumentar la temperatura alcanzada por el sistema, mejorando significativamente su desempeño global.

Aunque este tipo de desarrollos pueda parecer lejano a la realidad industrial mexicana, en realidad representa una muestra de lo que la inteligencia artificial podría aportar en prácticamente todas las escalas del calor industrial.

Diseñar mejores sistemas antes de construirlos

Uno de los mayores costos asociados a la implementación de nuevas tecnologías energéticas es la incertidumbre. Antes de instalar un sistema solar térmico o un almacenamiento de energía en una planta industrial, es necesario responder preguntas fundamentales:

- ¿Cuál es el tamaño adecuado?
- ¿Cuánta energía debe almacenarse?
- ¿Qué material es el más conveniente?
- ¿Cuál será el retorno de inversión?
- ¿Cómo afectarán las condiciones climáticas locales al desempeño del sistema?

Tradicionalmente, responder estas preguntas requería realizar simulaciones complejas y largos procesos de prueba y error. La inteligencia artificial puede acelerar enormemente este proceso.

A partir de información meteorológica, perfiles de consumo energético y características del proceso industrial, los algoritmos pueden generar miles de escenarios y determinar cuáles ofrecen el mejor equilibrio entre costo, eficiencia y confiabilidad.

Para una empresa mexicana del sector alimentario, por ejemplo, la IA podría ayudar a determinar cuántos colectores solares y qué capacidad de almacenamiento serían necesarios para cubrir la demanda de pasteurización durante todo el año, considerando incluso variaciones estacionales en la radiación solar.

Inteligencia artificial y almacenamiento energético una ventaja estratégica para la industria mexicana

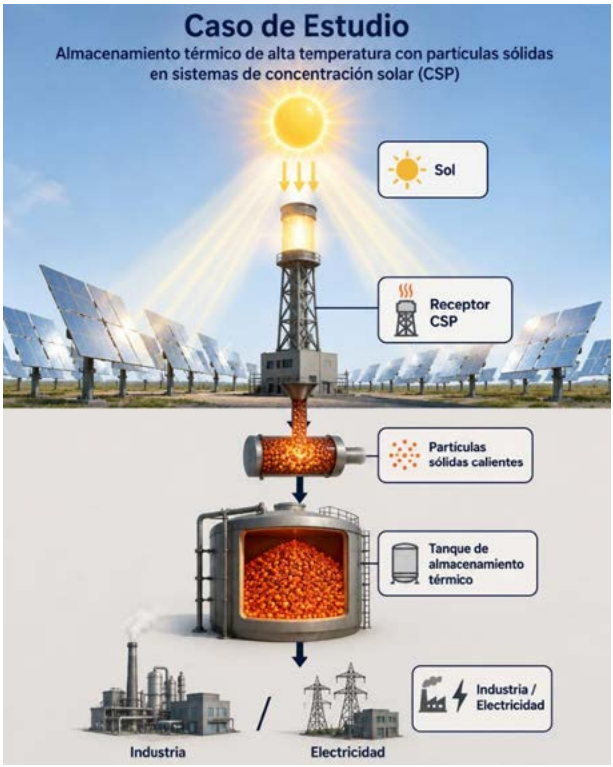
México cuenta con dos recursos particularmente valiosos para esta transición. Por un lado, dispone de una de las mejores disponibilidades de recurso solar del continente. Por otro, posee una base industrial diversa que abarca desde pequeñas empresas alimentarias hasta grandes complejos cementeros, siderúrgicos y petroquímicos (Secretaría de Energía, 2024; Prospectiva de energías renovables 2024–2038. Gobierno de México; International Energy Agency, 2023; Mexico energy outlook, 2023).

La inteligencia artificial puede actuar como el puente entre ambos mundos. No solo ayudando a diseñar mejores sistemas de almacenamiento, sino también permitiendo que estos operen de manera más eficiente y adaptada a las necesidades reales de cada industria. Quizá el verdadero potencial de la IA en la transición energética no radique en reemplazar a los ingenieros, sino en proporcionarles herramientas capaces de analizar millones de posibilidades en cuestión de minutos. De esta forma, los especialistas pueden concentrarse en la toma de decisiones estratégicas mientras los algoritmos exploran soluciones que antes habrían requerido años de trabajo.

En una industria cada vez más presionada para reducir emisiones, mejorar su competitividad y adaptarse a un entorno energético cambiante, la inteligencia artificial podría convertirse en una de las herramientas más importantes para transformar el calor industrial del futuro en México.

Basándose en modelos reducidos, simulaciones avanzadas y algoritmos adaptativos, como los empleados en investigaciones recientes sobre almacenamiento térmico solar, la IA está demostrando que también puede ser una pieza clave en la construcción de sistemas energéticos más eficientes, resilientes y sostenibles.

Figura 3. *Esquema simplificado de un sistema de concentración solar de potencia (CSP) con almacenamiento térmico mediante partículas sólidas.*



La energía solar es captada por un receptor de alta temperatura, transferida a partículas sólidas y almacenada térmicamente para su uso posterior en aplicaciones industriales o generación de electricidad. Elaboración propia con base en Ho e Iverson (2014), Ho (2017) e IEA (2024).

Hace apenas una década, la pregunta principal era cómo almacenar energía térmica. Hoy la pregunta comienza a ser distinta: cómo almacenar energía térmica de manera inteligente. Para comprender mejor, a conti-

nuación se presenta un caso de estudio propuesto por los autores. Que toma en cuenta las medidas recomendadas, además de las características de las necesidades térmicas de la industria mexicana. Llevar esta filosofía de gestión inteligente del calor a aplicaciones de media y alta temperatura requiere tecnologías capaces de almacenar grandes cantidades de energía térmica de forma segura y eficiente. Entre las alternativas más prometedoras se encuentran los sistemas de Concentración Solar de Potencia (CSP) acoplados a almacenamiento térmico mediante partículas sólidas, capaces de operar a temperaturas superiores a 800 °C y suministrar calor para procesos industriales de alta exigencia energética.

La Figura 3 presenta un esquema simplificado del funcionamiento de un sistema de concentración solar de potencia (CSP) acoplado a un sistema de almacenamiento térmico basado en partículas sólidas. El objetivo de esta configuración es captar energía solar, almacenarla en forma de calor y utilizarla posteriormente para suministrar energía a procesos industriales o para la generación de electricidad (Gil et al., 2010; IEA, 2024).

El receptor solar es el componente encargado de absorber la energía solar concentrada y transformarla en energía térmica. En una instalación real, la radiación reflejada por un campo de heliostatos se dirige hacia un receptor ubicado en la parte superior de una torre, donde la energía radiante se convierte en calor y es transferida al material de almacenamiento (Ho e Iverson, 2014).

Las partículas sólidas funcionan como medio de transferencia y almacenamiento de energía térmica. Materiales como arenas especiales, bauxitas y cerámicos refractarios pueden soportar temperaturas superiores a las alcanzadas por otros medios de almacenamiento convencionales, lo que los convierte en una alternativa prometedora para aplicaciones de alta temperatura (Albrecht et al., 2019; Ho, 2017).

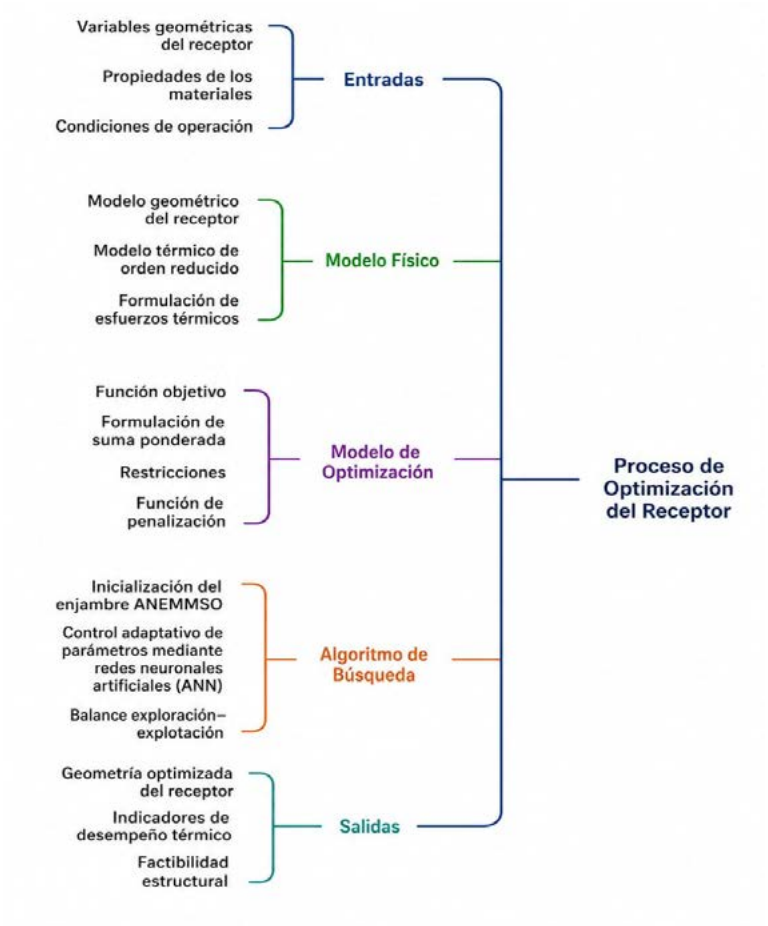
El tanque de almacenamiento permite conservar la energía térmica captada durante los periodos de alta radiación solar, posibilitando su aprovechamiento cuando la demanda energética lo requiera. Esta capacidad de desacoplar la generación solar del consumo energético constituye una de las principales ventajas de los sistemas CSP con almacenamiento térmico (Pelay et al., 2017).

La energía almacenada puede emplearse directamente en procesos industriales que demandan calor de media y alta temperatura o bien utilizarse para la generación de electricidad mediante ciclos termodinámicos convencionales, contribuyendo a incrementar la flexibilidad y confiabilidad de los sistemas energéticos renovables (IEA, 2024; IRENA, 2020).

El papel de la inteligencia artificial

La complejidad de estos sistemas hace prácticamente imposible gestionarlos únicamente mediante supervisión humana. Aquí es donde la inteligencia artificial comienza a desempeñar un papel central. Con el objetivo de ilustrar el potencial de la inteligencia artificial en el diseño de sistemas de almacenamiento térmico de alta temperatura, se presenta un caso de estudio basado en la optimización de un receptor solar para sistemas CSP mediante el algoritmo Adaptive Neural-Enhanced Mosquito Mating Swarm Optimization (ANEMMSO).

Figura 4. Diagrama de flujo del marco de optimización basado en ANEMMSO utilizado para explorar el espacio de diseño de receptores CSP de partículas sólidas cilíndricas



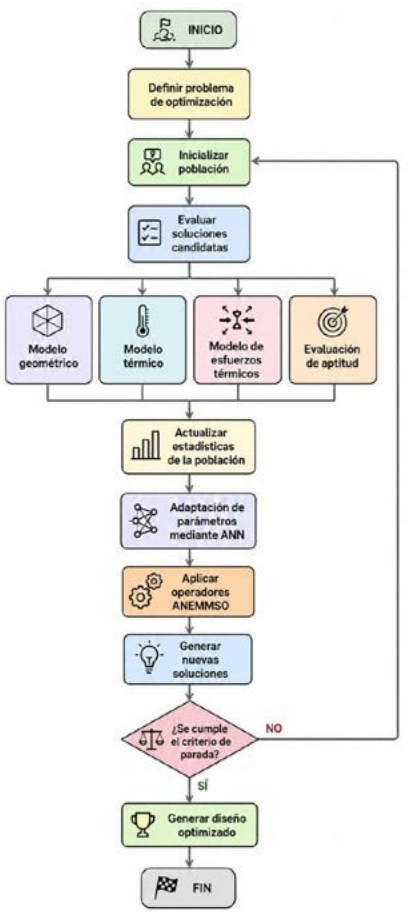
Un sistema inteligente puede analizar simultáneamente variables como:

- Radiación solar disponible.
- Pronósticos meteorológicos.
- Demanda térmica esperada.
- Estado de carga de los sistemas de almacenamiento.
- Horarios de producción.
- Costos energéticos.
- Disponibilidad de recursos renovables.

A partir de esta información, los algoritmos pueden anticipar necesidades futuras y optimizar la operación del sistema completo. La inteligencia artificial permite pasar de una gestión reactiva a una gestión predictiva. En lugar de responder a los problemas cuando aparecen, el sistema puede anticiparse a ellos y tomar decisiones preventivas. Esta capacidad resulta especialmente relevante para la industria agroalimentaria, donde la disponibilidad de materias primas, las condiciones climáticas y las necesidades de producción pueden variar significativamente a lo largo del año.

A pesar de las ventajas de los sistemas CSP con almacenamiento en partículas sólidas, su diseño presenta desafíos importantes. El receptor solar debe alcanzar temperaturas elevadas maximizando la captación de energía, pero al mismo tiempo debe limitar los esfuerzos térmicos y el uso de materiales para garantizar su viabilidad técnica y económica. Resolver este problema mediante procedimientos tradicionales de prueba y error resulta extremadamente costoso desde el punto de vista computacional. Por ello, se empleó el algoritmo Adaptive Neural-Enhanced Mosquito Mating Swarm Optimization (ANEMMSO), desarrollado para explorar de manera eficiente amplios espacios de diseño y encontrar.

Figura 5. *Diagrama de flujo del procedimiento de optimización basado en ANEMMSO utilizado para explorar el espacio de diseño del receptor CSP*.



Elaboración propia.

Uno de los mayores desafíos en el desarrollo de tecnologías de almacenamiento térmico consiste en encontrar diseños que sean simultáneamente eficientes, seguros y económicamente viables. A primera vista, podría parecer un problema sencillo. Si se desea almacenar más energía, bastaría con aumentar el tamaño del sistema. Sin embargo, la realidad es mucho más compleja. Un sistema de almacenamiento térmico de gran tamaño puede retener mayores cantidades de energía, pero también incrementa

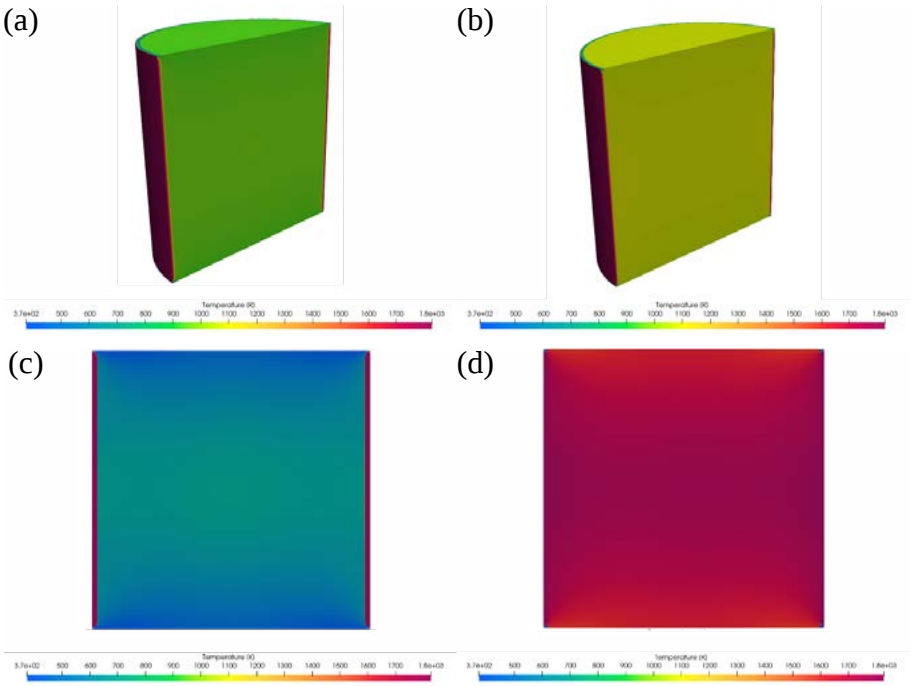
su peso, requiere más materiales y puede generar esfuerzos mecánicos significativos debido a las elevadas temperaturas de operación. Del mismo modo, un diseño demasiado compacto puede reducir costos de construcción, pero comprometer la capacidad de almacenamiento o acelerar las pérdidas térmicas.

En otras palabras, mejorar una característica suele afectar negativamente a otra. Este tipo de problemas son comunes en ingeniería y se conocen como problemas de optimización multicriterio.

Tradicionalmente, los ingenieros resolvían estas situaciones mediante largos procesos de simulación y prueba y error. Sin embargo, el crecimiento de la capacidad computacional y el desarrollo de herramientas de inteligencia artificial están transformando radicalmente esta forma de trabajo.

Las configuraciones generadas por ANEMMSO fueron posteriormente evaluadas mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD), permitiendo analizar la distribución de temperatura dentro del receptor y validar el desempeño térmico de las geometrías optimizadas.

Figura 6. *Resultados del campo térmico CFD*



(a) contorno de temperatura isométrico de diseño de referencia; (b) contorno de temperatura isométrico de diseño optimizado por ANEMMSO; (c) distribución de temperatura transversal de referencia en el medio poroso; y (d) distribución de temperatura transversal optimizada en el medio poroso.

Aprendiendo de la naturaleza para diseñar mejores sistemas

En los últimos años han surgido algoritmos inspirados en procesos biológicos capaces de explorar miles de alternativas de diseño en tiempos relativamente cortos. Estas herramientas pertenecen a una familia conocida como algoritmos bioinspirados, ya que reproducen comportamientos observados en la naturaleza, como la evolución, la cooperación entre organismos o los mecanismos de búsqueda de alimento. Como parte de esta tendencia, se desarrolló un estudio enfocado en el diseño de receptores solares de partículas sólidas para sistemas termosolares

de concentración. Estos receptores constituyen uno de los componentes más importantes dentro de las tecnologías de almacenamiento térmico de alta temperatura, ya que permiten captar energía solar y transferirla a materiales capaces de almacenar calor durante largos periodos.

La investigación combinó modelos térmicos simplificados, simulaciones computacionales avanzadas y un algoritmo adaptativo apoyado por inteligencia artificial para evaluar miles de configuraciones posibles del sistema. El objetivo era encontrar diseños que lograran almacenar más energía térmica utilizando menos material y manteniendo niveles seguros de esfuerzo mecánico.

¿Qué encontró la inteligencia artificial?

Los resultados mostraron que la inteligencia artificial fue capaz de identificar configuraciones significativamente mejores que el diseño de referencia utilizado inicialmente. El diseño optimizado logró reducir aproximadamente a la mitad los esfuerzos térmicos presentes en la estructura, disminuyendo el riesgo de daño asociado a las altas temperaturas de operación. Al mismo tiempo, se obtuvo una reducción cercana al 32 % en la masa total del receptor, lo que implica un menor consumo de materiales y potenciales reducciones en costos de fabricación. Pero quizá el resultado más interesante fue que el sistema optimizado alcanzó temperaturas medias superiores dentro del material de almacenamiento térmico. Mientras el diseño inicial operaba alrededor de 958 K, la configuración optimizada logró superar los 1074 K, incrementando significativamente la cantidad de energía útil que podía almacenarse.

En términos sencillos, la inteligencia artificial permitió diseñar un sistema más ligero, más seguro y con mayor capacidad de almacenamiento energético. A lo largo de este capítulo se ha mostrado que el almacenamiento térmico representa una de las herramientas más prometedoras para enfrentar los desafíos energéticos de la industria moderna. Su capacidad para desacoplar en el tiempo la generación y el consumo de energía permite aprovechar de manera más eficiente los recursos renovables disponibles, reducir la dependencia de combustibles fósiles y aumentar la flexibilidad operativa de los procesos industriales.

En México, donde una gran parte de la energía consumida por la industria se destina a la producción de calor, estas tecnologías adquieren una relevancia particular. Sectores como el alimentario, químico, papelero, cervecero, cementero o siderúrgico dependen de manera directa del suministro continuo de energía térmica. Por ello, cualquier estrategia orientada a la descarbonización industrial deberá considerar no solo la generación de energía renovable, sino también mecanismos eficientes para almacenarla y utilizarla cuando realmente se necesita.

Sin embargo, conforme aumentan las exigencias térmicas y operativas de los sistemas industriales, también aumenta la complejidad de su diseño. El desarrollo de sistemas de almacenamiento térmico involucra múltiples variables que interactúan entre sí: materiales, geometrías, propiedades termofísicas, condiciones de operación, costos, esfuerzos mecánicos y criterios de eficiencia energética. Mejorar una característica suele implicar compromisos en otras, convirtiendo el diseño en un problema multidimensional difícil de resolver mediante enfoques convencionales.

Es precisamente en este contexto donde la inteligencia artificial comienza a desempeñar un papel transformador. Más allá de las aplicaciones comúnmente asociadas con asistentes virtuales o análisis de datos, la IA está demostrando su capacidad para acelerar el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas. Herramientas como los algoritmos evolutivos, las redes neuronales, los modelos reducidos y los gemelos digitales permiten explorar miles de configuraciones posibles, identificar patrones complejos y optimizar diseños que anteriormente requerían largos periodos de simulación y experimentación.

El caso de estudio presentado en este capítulo constituye un ejemplo representativo de esta nueva forma de diseñar sistemas energéticos. Mediante la combinación de simulaciones numéricas avanzadas, modelos de aprendizaje automático y algoritmos bioinspirados de optimización multiobjetivo, fue posible analizar configuraciones de receptores para sistemas termosolares de concentración operando a temperaturas superiores a 800 °C. Los resultados mostraron que la inteligencia artificial puede contribuir simultáneamente a mejorar el desempeño térmico, reducir esfuerzos mecánicos y optimizar el uso de materiales, objetivos que tradicionalmente suelen entrar en conflicto durante el proceso de diseño.

Aunque la investigación se desarrolló en el contexto de receptores solares para sistemas CSP, sus implicaciones trascienden ampliamente esta aplicación específica. Los mismos principios pueden utilizarse para optimizar baterías térmicas de alta temperatura, sistemas de almacenamiento para calor industrial, intercambiadores de calor, bombas de calor industriales y futuras comunidades térmicas inteligentes. En todos estos casos, el desafío consiste en encontrar soluciones eficientes dentro de espacios de diseño cada vez más complejos, donde la interacción entre múltiples variables dificulta la identificación de configuraciones óptimas mediante métodos tradicionales.

Por ello, quizá la pregunta más importante ya no sea únicamente cómo almacenar energía térmica, sino cómo hacerlo de manera inteligente. En un escenario donde la industria enfrenta simultáneamente retos de competitividad, sostenibilidad y seguridad energética, la integración entre almacenamiento térmico e inteligencia artificial ofrece una oportunidad para desarrollar sistemas más eficientes, resilientes y adaptables. Más que reemplazar el conocimiento de los ingenieros, estas herramientas amplían su capacidad para explorar soluciones, acelerar la innovación y diseñar tecnologías capaces de responder a los desafíos energéticos del siglo XXI.

La transición energética no dependerá únicamente de la incorporación de nuevas fuentes renovables, sino también de la capacidad para almacenar, gestionar y utilizar la energía de forma inteligente. En este contexto, la convergencia entre almacenamiento térmico, modelado avanzado e inteligencia artificial representa una oportunidad estratégica para países como México, donde el calor industrial constituye una de las principales demandas energéticas del sector productivo.

Más que sustituir el conocimiento de los ingenieros, la inteligencia artificial amplía su capacidad para explorar soluciones, acelerar la innovación y enfrentar problemas cuya complejidad supera los métodos tradicionales de diseño. El futuro de la descarbonización industrial probablemente no estará definido únicamente por nuevos materiales o nuevas fuentes de energía, sino por sistemas capaces de aprender, adaptarse y optimizar continuamente su funcionamiento.

Referencias

Albrecht, K. J., Ho, C. K. & Schroeder, N. E. (2019). High-temperature particle receivers for concentrating solar power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2018). La transición energética en América Latina y el Caribe: Oportunidades y desafíos.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2018). *Energía solar térmica para procesos industriales en México: Estudio base de mercado*. Copenhagen Centre on Energy Efficiency.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2022). *Bombas de calor industriales de alta temperatura y oportunidades para la industria mexicana.* GIZ México.

European Commission. (2020). An EU strategy for energy system integration.

European Commission. (2023). Digitalisation of the energy system: EU action plan.

FH Aachen University of Applied Sciences. (2025). *smartTESS: Intelligent control for industrial energy supply systems with thermal storage systems.* Solar Institute Jülich.

Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2021). *Descarbonización del calor industrial en México: Oportunidades y barreras.* GIZ México.

Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B. & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(1), 31–55.

Ho, C. K. (2017). A review of high-temperature particle receivers for concentrating solar power. *Applied Thermal Engineering*, *109*, 958–969.

Ho, C. K. & Iverson, B. D. (2014). Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *29*, 835–846.

International Energy Agency (IEA). (2021). *Digital demand-driven electricity networks initiative: Using digitalization to enable a clean energy future*.

International Energy Agency (IEA). (2023a). Mexico energy outlook 2023.

International Energy Agency (IEA). (2023b). Net zero roadmap: A global pathway to keep the 1.5°C goal in reach.

International Energy Agency (IEA). (2024). Energy technology perspectives 2024.

International Energy Agency (IEA) & Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP). (2015). Solar heat for industrial processes (SHIP): Technology brief E21. IEA-ETSAP.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019). Innovation landscape for a renewable-powered future.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Innovation outlook: Thermal energy storage.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). Artificial intelligence for the energy transition.

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *29*, 36–52.

Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D. & Mathiesen, B. V. (2022). Smart energy systems and sector coupling for future sustainable energy systems. *Energy*, *257*, 124733.

Mahdi, Z., Herrmann, U. & Görner, K. (2024). Operation optimization of a power-to-heat system in PV-CSP hybrid power plants together with molten salt thermal storage. En Proceedings of the International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2023). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-455-6_22

Mahdi, Z., Merige, P. S., Chico Caminos, R. A., Schmitz, P., et al. (2022). Modeling the thermal behavior of solar salt in electrical resistance heaters for the application in PV-CSP hybrid power plants. *AIP Conference Proceedings*, *2445*(1), 030013. https://doi.org/10.1063/5.0086268

Pelay, U., Luo, L., Fan, Y., Stitou, D. & Rood, M. (2017). Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *79*, 82–100.

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. (2025). *El papel de los biocombustibles sólidos en la generación de calor verde (Cuaderno Temático No. 13)*. Gobierno de México.

Secretaría de Energía (SENER). (2023). Balance Nacional de Energía 2023. Gobierno de México.

Secretaría de Energía (SENER). (2024). Prospectiva de energías renovables 2024–2038. Gobierno de México.

Solar Payback. (2020). *Solar heat for industrial processes in Latin America: Market opportunities and implementation experiences*. Solar Payback Programme.

Tao, F., Zhang, H., Liu, A. & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *15*(4), 2405–2415.

Capítulo **16**

Ojos en el espacio y neuronas en la tierra: Cómo la inteligencia artificial limpia la mirada de los satélites para proteger nuestra agua

Arely Daniela Ayala Reyes[1]
Carlos Augusto Arellano Muro[2]
Marlene Alejandra Pérez Villalpando[2]
Virgilio Zúñiga Grajeda[1]

DOI: https://doi.org/10.61728/AE26008134

[1] Departmento de Ingeniería Industrial, Centro Universitario de Ciencias Exatas e Ingenierias. Universidad de Guadalajara, Guadalajara
[2] Departamento de Ciencias de la Información y Desarrollos Tecnológicos, Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara

Resumen

El monitoreo continuo de la calidad del agua en grandes masas superficiales continentales, como el Lago de Chapala, ha enfrentado históricamente severas limitaciones espaciales y temporales debido a los altos costos y la naturaleza intermitente de los muestreos físicos in situ. La teledetección satelital óptica (misiones Landsat 8/9) emerge como una alternativa global idónea, pero se ve obstaculizada de forma recurrente por la presencia de nubes, sombras proyectadas y distorsiones lumínicas como el destello solar. Este trabajo presenta una propuesta metodológica integral basada en inteligencia artificial y aprendizaje profundo orientada a actuar como un filtro corrector autónomo. En una primera fase, se implementa una red neuronal convolucional con arquitectura U-Net, entrenada con repositorios globales de biomas, para lograr una segmentación semántica precisa de formaciones nubosas pixel a pixel, superando las rigideces y los solapamientos espectrales de los métodos convencionales en biomas de agua y nieve. Tras la remoción de la nubosidad, las distorsiones por destellos superficiales se corrigen mediante el algoritmo físico de Lyzenga, mientras que las lagunas de información se reconstruyen de manera predictiva a través de un ensamble Random Forest Regressor, robustecido con interpolación geoestadística Universal Kriging y entrenado con datos históricos y de campo depurados mediante el Rango Intercuartílico. En la segunda fase, la matriz de reflectancia purificada y libre de ruido se introduce en una red neuronal convolucional de regresión para predecir cuantitativamente indicadores críticos de contaminación: turbidez, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales. Como hallazgo científico principal, se demuestra que la inyección explícita del Índice de Turbidez de Diferencia Normalizada como canal predictivo inicial optimiza el gradiente de la red, logrando una reducción del error cuadrático medio y un incremento neto del coeficiente de determinación (+0.425 en SST). Este enfoque integrado no solo restaura la integridad física de los datos

satelitales, sino que consolida un paradigma de monitoreo ambiental autónomo, de código abierto y bajo costo, democratizando la vigilancia ecológica de los recursos hídricos en el Sur Global.

Introducción

Desde el nacimiento de la teledetección moderna, la humanidad ha buscado incansablemente formas automatizadas y globales para monitorizar la salud de sus ecosistemas más críticos (Alvarez-Martinez, et al. 2025); tal es el caso de los trabajos U.S. Geological Survey 2022 o bien Justice et al. 2002. Entre estos recursos, las masas de agua continental, como el majestuoso e icónico Lago de Chapala en Jalisco, México, representan sistemas vitales cuya preservación exige una vigilancia constante, rigurosa y de gran alcance geográfico. Históricamente, evaluar la calidad del agua ha requerido de la presencia humana física en el sitio: expediciones en lanchas (Ritchie et al. 2003), recolección manual de muestras en botellas estériles, preservación en frío y un posterior transporte hacia laboratorios especializados (U.S. Geological Survey 2018), donde, días o semanas después, se obtienen valores de parámetros fisicoquímicos como la turbidez o la concentración de sólidos. Este enfoque tradicional, si bien es preciso a nivel de punto de muestreo, adolece de severas limitaciones temporales y espaciales. No permite capturar las dinámicas complejas y cambiantes de todo un cuerpo de agua de miles de kilómetros cuadrados de manera simultánea, y resulta prohibitivamente costoso para implementarse diariamente.

Es en este escenario donde los satélites de observación de la Tierra, particularmente las misiones Landsat operadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), siendo la última misión descrita en U.S. Geological Survey 2026, emergen como verdaderos vigías espaciales. Orbitando a cientos de kilómetros sobre nuestras cabezas, estos dispositivos capturan de forma continua bandas espectrales que registran la firma lumínica de la superficie terrestre. Un satélite no solo toma una fotografía en el espectro visible que los humanos podemos comprender, sino que descompone la radiación solar reflejada en múltiples longitudes de onda, incluyendo el infrarrojo cercano (NIR),

el infrarrojo de onda corta y el espectro térmico. Esta riqueza de datos ofrece una oportunidad sin precedentes para la hidrología predictiva: el agua, dependiendo de los elementos orgánicos e inorgánicos disueltos o suspendidos en ella, altera su forma de absorber y reflejar la luz del sol. Por lo tanto, un lago turbio o cargado de sedimentos devolverá una señal espectral radicalmente diferente a la de un lago cristalino. En teoría, descifrar estas señales ópticas nos permitiría diagnosticar el estado del agua de cualquier región del mundo de forma completamente remota y a un coste significativamente menor.

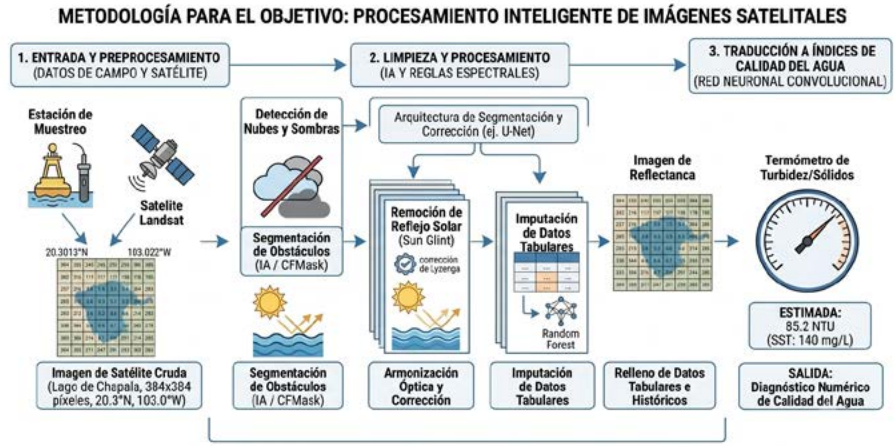
Sin embargo, la realidad de la teledetección óptica se enfrenta de manera constante a un colosal e inevitable obstáculo físico: la atmósfera terrestre. La capa de gases y partículas que envuelve nuestro planeta, indispensable para albergar la vida, actúa al mismo tiempo como un medio altamente dinámico e interferente para los sensores ópticos espaciales. El principal y más recurrente dolor de cabeza para los científicos de datos espaciales, según los trabajos Foga et al. 2017 y Zhu y Woodcock 2012, son las nubes y las densas sombras que proyectan sobre el suelo. En cualquier día del año, una fracción considerable de la superficie de la Tierra se encuentra cubierta por formaciones nubosas de diversas altitudes, densidades y composiciones cristalinas. Cuando un satélite pasa por encima de una zona de interés en el momento exacto de su órbita heliosíncrona, la presencia de una nube interrumpe por completo la trayectoria de la luz solar. La radiación no llega a la superficie del agua o, si lo hace de forma difusa, la luz reflejada es bloqueada y dispersada por la nube antes de alcanzar el sensor del satélite. Como consecuencia, los píxeles correspondientes a esa área en los archivos digitales del satélite quedan inservibles, saturados por la altísima reflectancia de las gotas de agua congelada de la nube, o bien oscurecidos artificialmente por una densa proyección.

El objetivo principal de este escrito es demostrar cómo la Inteligencia Artificial (IA) y el Aprendizaje Profundo actúan en la actualidad como filtros correctores indispensables en el flujo de procesamiento de datos geoespaciales. Los modelos matemáticos basados en redes neuronales y algoritmos de regresión avanzada poseen la capacidad única de limpiar de forma automatizada las interferencias atmosféricas más complejas

(Jeppesen et al. 2019), suprimir los efectos ópticos parásitos como el reflejo solar en el espejo de agua (Hedley et al. 2005) y reconstruir mediante técnicas predictivas los datos ausentes u ocultados por las nubes (Géron 2019; Belda et al. 2020; Breiman 2001; Matheron 1963). De este modo, la IA se convierte en el eslabón científico definitivo que permite transitar de imágenes satelitales en bruto e imperfectas hacia un sistema de diagnóstico ambiental robusto, autónomo, espacialmente continuo y permanente para la conservación de las aguas superficiales del planeta.

Tras haber comprendido las limitaciones físicas que imponen las condiciones atmosféricas y el papel fundamental de la inteligencia artificial como agente purificador, es imperativo descender al nivel operativo de nuestra propuesta. La Figura 1 detalla el flujo metodológico implementado para transformar los datos crudos —frecuentemente degradados por la nubosidad y las distorsiones lumínicas— en un insumo cartográfico confiable.

Figura 1. *Metodología Para El Objetivo: Procesamiento Inteligente De Imágenes Satelitales*.



Para comprender el impacto de esta revolución tecnológica, resulta útil apelar a una metáfora analógica muy sencilla: imagina que eres el encargado de evaluar la claridad y pureza del agua de una gran piscina pública,

pero te encuentras confinado en una habitación cerrada y tu única vía de observación es a través de una ventana de cristal antiguo. En un día perfecto, podrías ver el fondo con relativa facilidad. Sin embargo, la mayor parte del tiempo la ventana se encuentra empañada por el vapor interno, salpicada por gotas de lluvia externas o parcialmente cubierta por densas cortinas que se mueven con el viento, proyectando sombras confusas sobre el agua. Intentar medir la transparencia de la piscina en esas condiciones te llevaría a cometer errores flagrantes, confundiendo una sombra con suciedad o el empañamiento del vidrio con un brote de algas. En esta analogía, las nubes, la bruma atmosférica y las sombras son ese vapor y esas cortinas que distorsionan y fragmentan la realidad física del agua. La IA avanzada no intenta adivinar a ciegas lo que hay detrás; funciona como un limpiaparabrisas automatizado e inteligente que remueve el vapor del vidrio píxel a píxel, corre las cortinas de forma matemática y, analizando los patrones de luz sobrevivientes a los lados, reconstruye con asombrosa precisión el aspecto exacto de la piscina. La IA limpia el cristal óptico del satélite para que la ciencia pueda ver el agua real.

Tras haber comprendido las limitaciones físicas que imponen las condiciones atmosféricas y el papel fundamental de la inteligencia artificial como agente purificador, es imperativo descender al nivel operativo de nuestra propuesta. A continuación, se detalla el entramado técnico y los procesos algorítmicos que posibilitan, de forma secuencial, la restauración de la integridad óptica del Lago de Chapala, consolidando los cimientos metodológicos requeridos para la subsecuente inferencia inteligente de sus parámetros de calidad hídrica.

Preparando el lienzo: Segmentación, limpieza y reconstrucción digital

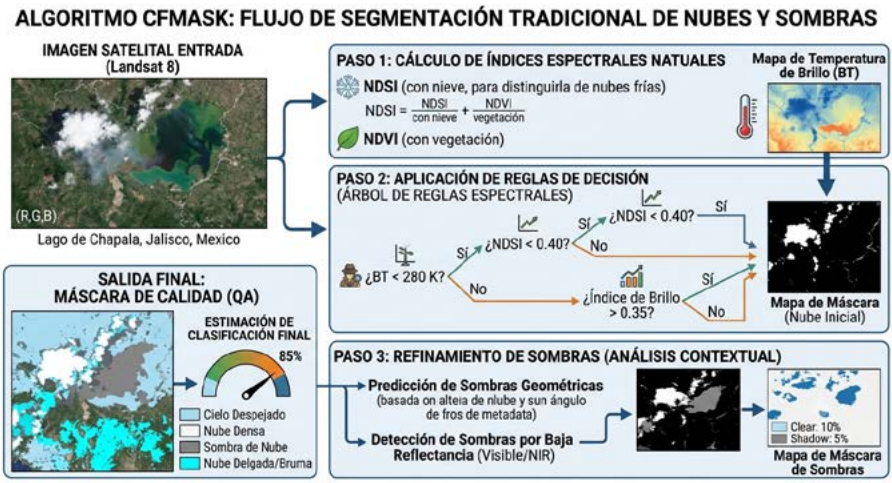
Para que una imagen capturada por un satélite a más de setecientos kilómetros de altura pueda convertirse en un mapa confiable de la calidad del agua, debe someterse a un riguroso y multifásico proceso de purificación digital. Este proceso puede compararse con la preparación minuciosa que un pintor realiza sobre su lienzo antes de aplicar las primeras pinceladas

de óleo: si la superficie subyacente contiene imperfecciones, polvo o grietas, cualquier obra de arte construida encima estará condenada al fracaso o a la distorsión. En el ámbito de la teledetección, las imperfecciones son los elementos atmosféricos y ópticos que alteran la radiación original. La primera gran etapa de nuestra metodología consiste, por tanto, en aislar las interferencias, corregir los artefactos lumínicos de la superficie del agua y reconstruir matemáticamente aquellas zonas donde la información original se ha perdido por completo debido a la opacidad de las nubes.

Separación

El paso inicial y conceptualmente más desafiante en la purificación de la imagen es la detección y segmentación de nubes y sombras. Históricamente, este procedimiento se realizaba mediante algoritmos basados en reglas espectrales rígidas y árboles de decisión empíricos, siendo el método CFMask el exponente más conocido (Foga et al. 2017). Estos métodos convencionales operan bajo un paradigma de análisis local: examinan cada píxel de forma aislada, aplicando umbrales matemáticos fijos a variables como la temperatura de brillo térmico o los índices de reflectancia en el espectro visible e infrarrojo. Este enfoque reduccionista, aunque eficiente en términos de procesamiento computacional, despoja a la imagen de su contexto geográfico y ambiental, tratando cada punto de la matriz de datos como una entidad independiente sin relación con su entorno inmediato. Vea la Figura 2, donde se muestra el flujo del algoritmo.

Figura 2. *Algoritmo CFMask: Flujo de segmentación tradicional de nubes y sombras.*

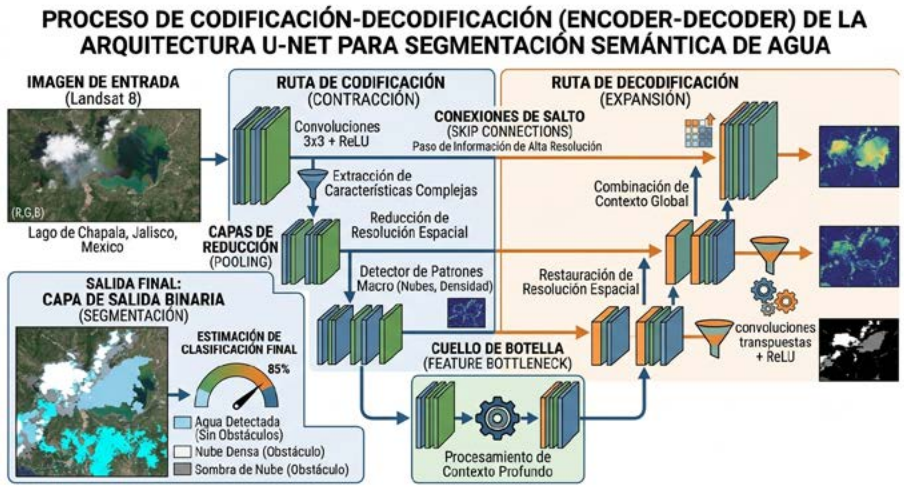


El principal defecto de estas reglas espectrales fijas radica en su incapacidad intrínseca para discriminar objetos que comparten firmas lumínicas casi idénticas, pero poseen naturalezas físicas totalmente divergentes. Los dos escenarios más críticos estudiados en la literatura científica son las regiones con presencia de nieve o hielo y los cuerpos de agua someros o altamente reflectantes. En el bioma del Lago de Chapala, las altas concentraciones de sedimentos disueltos o el fenómeno del destello solar —donde el agua actúa como un espejo perfecto hacia el sensor del satélite— elevan la reflectancia general de forma desproporcionada (Hedley et al. 2005). Los algoritmos tradicionales, al carecer de una comprensión semántica, sufren una masiva tasa de falsos positivos; clasifican erróneamente estas zonas de agua brillante, brumosa o con sedimentos como si fueran nubes delgadas, borrando del mapa de análisis áreas vitales del cuerpo hídrico.

Para superar esta rigidez, la ciencia moderna ha pivotado hacia el aprendizaje profundo, específicamente hacia la segmentación semántica binaria, donde destaca de manera sobresaliente la arquitectura de red neuronal convolucional conocida como U-Net (Jeppesen et al. 2019). A diferencia de los métodos tradicionales, una red U-Net no aplica reglas estáticas; opera mediante un enfoque contextual y espacial jerárquico

que intenta emular la capacidad humana de reconocimiento visual. Su estructura se divide en una ruta de contracción (codificador) y una ruta de expansión (decodificador). En la Figura 3 se observa cómo el codificador extrae patrones contextuales complejos a diferentes escalas: las primeras capas identifican microtexturas y bordes locales, mientras que las capas más profundas, al poseer un campo receptivo más amplio, capturan la geometría macro de las nubes y la relación de vecindad espacial entre una formación nubosa y su sombra proyectada.

Figura 3. *Proceso de codificación-decodificación de la arquitectura U-Net para segmentación semántica del agua.*



La genialidad arquitectónica de la U-Net reside en la inclusión de las llamadas "conexiones de salto" (skip connections), las cuales actúan como puentes de información que canalizan directamente los datos de alta resolución geométrica desde el codificador hacia el decodificador. Esto permite fusionar los patrones abstractos y profundos con la localización precisa a nivel de píxel individual, garantizando que el borde de una nube sea trazado con exactitud quirúrgica. Entrenada de manera supervisada con extensos repositorios internacionales validados por expertos (archivos globales de biomas de Landsat 8), la U-Net aprende de forma autónoma a ignorar el destello solar en el agua, a diferenciar

la nieve de una nube y a delinear con precisión los límites difusos de la bruma atmosférica, proporcionando un lienzo limpio para la siguiente etapa de restauración.

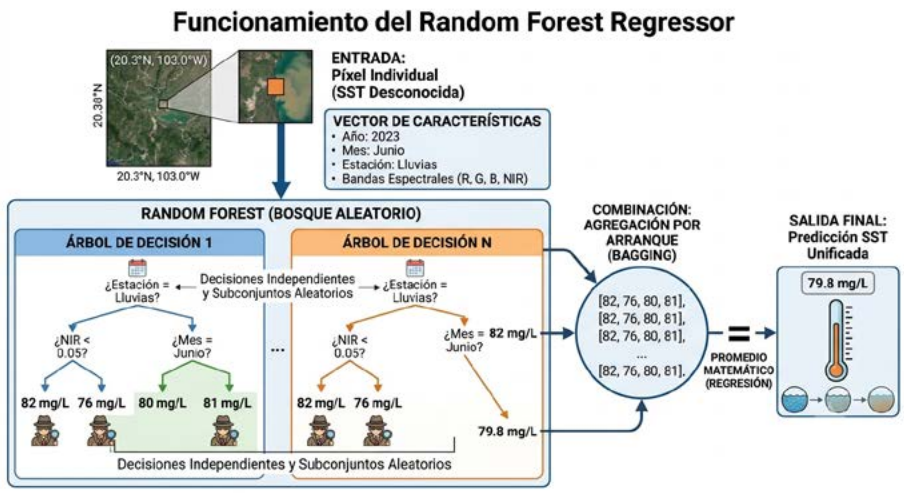
Restauración

Tras aplicar la máscara binaria generada por la U-Net y remover los píxeles corruptos, quedan huecos vacíos o parches de datos nulos en la imagen. Antes de proceder a rellenar predictivamente estas ausencias, es imperativo realizar una corrección óptica crítica. Incluso en las áreas que no fueron tapadas por nubes, la superficie del agua presenta un fenómeno físico complejo conocido como destello solar. Para visualizarlo, podemos imaginar el intento de fotografiar el fondo de una alberca en un día de sol intenso: los reflejos especulares del astro sobre el agua crean destellos tan brillantes que saturan el sensor y nos impiden distinguir con claridad los elementos sumergidos. Si estos brillos no se neutralizan, los algoritmos de inteligencia artificial los interpretarían erróneamente como variaciones en la turbidez o presencia de sedimentos, sesgando el diagnóstico ambiental.

Para solucionar este inconveniente, implementamos el algoritmo físico-matemático de Lyzenga (Hedley et al. 2005). Este método aprovecha una propiedad física del agua: su alta capacidad de absorción de luz en la banda del NIR. Al establecer relaciones lineales de covarianza entre las bandas visibles y esta banda NIR —que es absorbida casi por completo en los primeros centímetros del agua—, el algoritmo es capaz de "restar" el brillo excesivo, estandarizando la reflectancia de cada píxel acuático a una profundidad virtual de referencia. Este proceso limpia el "espejo" superficial, permitiéndonos observar la composición real del cuerpo hídrico sin la interferencia del reflejo solar.

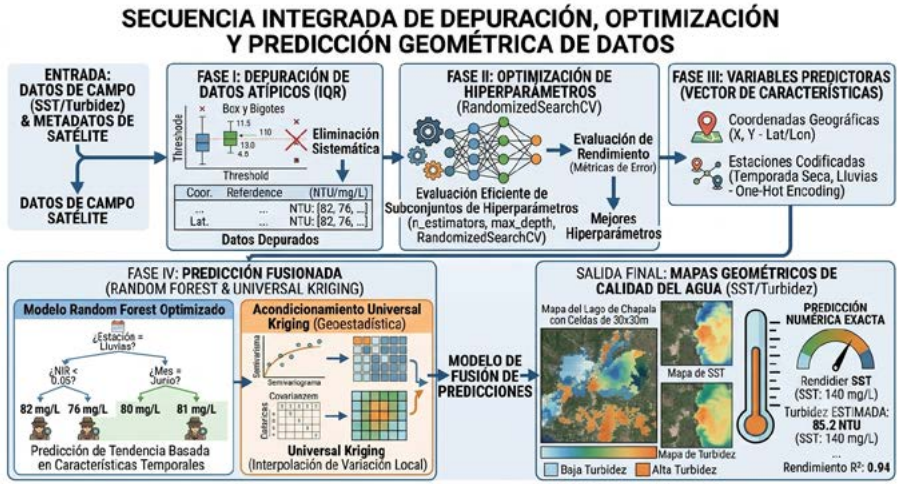
Una vez purificada la superficie visible, la metodología aborda la reconstrucción matemática de la información oculta originalmente por las nubes, recurriendo a un sistema dual de inteligencia artificial: el algoritmo de aprendizaje automático supervisado Random Forest Regressor (Breiman 2001), potenciado por técnicas geoestadísticas espaciales como el Universal Kriging (Matheron 1963).

Figura 4. *Funcionamiento del Random Forest Regressor.*



El Random Forest actúa como un panel de expertos; la Figura 4 muestra cómo se consideran cientos de árboles de decisión independientes, cada uno entrenado con una vasta base de datos histórica y tabular. Estos registros han sido recopilados durante más de dos décadas mediante campañas de campo sincronizadas con el paso orbital de los satélites, con el apoyo de instituciones como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA - RENAMECA). Para garantizar la calidad del insumo, la base de datos se depura sistemáticamente mediante el método del Rango Intercuartílico (IQR), eliminando valores atípicos, y se optimiza mediante Randomized Search CV. Las variables que alimentan este proceso incluyen coordenadas geográficas (X, Y), referencias temporales y codificación estacional (One-Hot Encoding) para distinguir dinámicas entre estiaje, lluvias e invierno (Géron 2019). Mientras el Random Forest aporta la predicción basada en la experiencia histórica, el Universal Kriging garantiza la coherencia espacial, asegurando que los valores reconstruidos fluyan de manera natural con sus vecinos. Como se observa en la Figura 5, esta integración permite rellenar de forma homogénea las zonas ciegas, devolviendo un lienzo digital con una continuidad matricial perfecta, lista para el diagnóstico definitivo.

Figura 5. *Secuencia integrada de depuración, optimización y predicción geométrica de datos.*



Una vez completado este complejo proceso de curaduría de datos, donde la imagen ha sido despojada de su ruido atmosférico y reconstruida en su totalidad, nos encontramos ante un insumo digital de alta fidelidad. Este lienzo, ahora libre de las interferencias que suelen cegar a los sensores convencionales, constituye la materia prima fundamental para el análisis predictivo. Es en este punto donde nuestra metodología transita de la esfera de la restauración geométrica y radiométrica hacia su objetivo último: la inferencia inteligente. La red neuronal ya no se ocupa de limpiar el entorno, sino de interpretar las señales luminosas restantes para extraer, con precisión técnica, la verdad oculta sobre la calidad del agua que fluye en el Lago de Chapala.

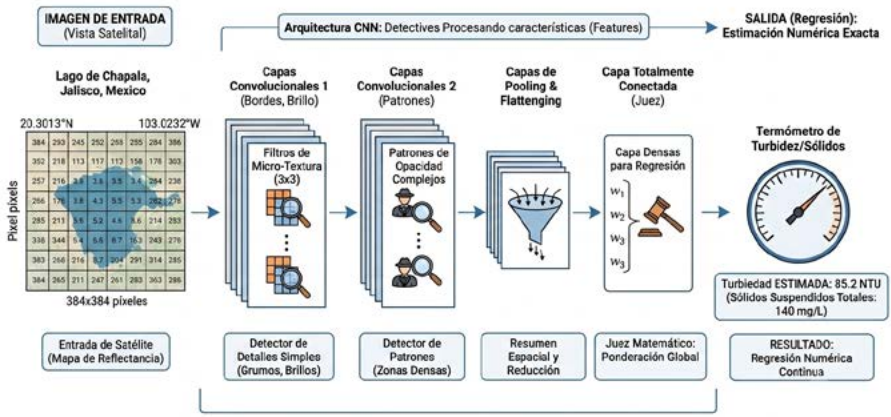
El diagnóstico final: Traduciendo luz en calidad del agua

Con el lienzo digital perfectamente purificado y dotado de una continuidad geométrica impecable, la metodología se adentra en su fase cumbre: el diagnóstico fino de los parámetros físico-ambientales del agua. El objetivo es descifrar las sutiles y complejas variaciones en las firmas

de reflectancia de la luz que emanan de la superficie corregida del Lago de Chapala y traducirlas en concentraciones numéricas exactas de tres indicadores críticos de la degradación ambiental: la turbidez física, los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y los Sólidos Disueltos Totales (SDT). Para alcanzar este fin, se implementa una arquitectura de IA basada en redes neuronales convolucionales (CNN) de tipo regresión, diseñadas específicamente para mapear relaciones funcionales complejas altamente no lineales y devolver un valor numérico escalar continuo a lo largo de un espectro infinito de posibilidades reales.

Para explicar el funcionamiento de esta red de forma lúdica a un público general, vea la Figura 6, donde se apela a la analogía de un selecto grupo de inspectores o "detectives de cocina" que examinan una sopa de verduras (el agua del lago) a partir de fotografías macro para adivinar qué tan espesa y cargada de grumos está. La imagen multiespectral ingresa a la red dividida en una cuadrícula de píxeles (la sopa cruda). De inmediato, los detectives de microdetalles (capas convolucionales iniciales) deslizan pequeñas lupas locales sobre áreas de pocos píxeles buscando microtexturas, bordes y variaciones sutiles en los tonos de color primarios. Detrás de ellos, los asistentes de consolidación de pistas (capas de pooling) elaboran un resumen ejecutivo del vecindario espacial, eliminando el ruido y reteniendo los patrones persistentes. Con estas notas purificadas, el comisario de la cocina (capas convolucionales profundas) unifica la información para construir conceptos abstractos macro, comprendiendo la geometría global de las plumas de dispersión de sedimentos o parches de algas. Finalmente, toda esta estructura es entregada a la capa totalmente conectada, que asume el rol del juez de cocina de la IA; este aplica coeficientes de peso numéricos a cada pista estructural y realiza un cálculo algebraico definitivo mediante una función de activación lineal, arrojando valores numéricos continuos exactos en una escala real (por ejemplo, determinando que una porción posee 32.4 NTU de turbidez o 68.2 mg/L de SST).

Figura 6. *Forma lúdica de representar el funcionamiento de la Red Neuronal Convolucional.*



El hallazgo: Para que esta red sea realmente brillante, no solo le damos la imagen, sino que le entregamos una “pista” de gran valor. Sabemos que, cuando el agua tiene mucho sedimento (lodo, tierra o arcilla), la luz roja rebota en esas partículas de una forma muy distinta a como lo hace la luz verde. Por ello, creamos un "índice de contraste" especial. Imagina que, en lugar de darle a nuestros detectives una foto normal, les damos una foto con un filtro de alto contraste que hace que el barro destaque instantáneamente sobre el agua, casi como si estuviera iluminado.

Este índice actúa como un mapa de “dónde buscar”. Al inyectar esta pista física desde el inicio, la IA no pierde tiempo tratando de adivinar qué es sedimento y qué no; el mapa le permite enfocarse directamente en medirlo con precisión. Es como si el detective de nuestra sopa tuviera un mapa que resalta las zonas con más ingredientes antes de empezar a analizar. Este cambio en la forma de presentar los datos fue determinante: el margen de error en nuestras mediciones se desplomó y la precisión para detectar sólidos suspendidos mejoró drásticamente, marcando una diferencia real en cómo entendemos la salud del lago y permitiendo que la tecnología sea mucho más confiable para el monitoreo ambiental.

Esta reconfiguración en el modelado de datos resultó fundamental: los márgenes de error experimental se redujeron ostensiblemente, mientras que la capacidad predictiva para la detección de sólidos en suspensión experimentó un avance significativo. Este progreso consolida un entendimiento profundo sobre la integridad ecológica del ecosistema lacustre, dotando al monitoreo ambiental de una robustez tecnológica y una fiabilidad sin precedentes.

Conclusión: El futuro del monitoreo ambiental autónomo

La convergencia científica expuesta a lo largo de este capítulo —que fusiona de forma elegante la física de la teledetección óptica espacial, las metodologías geoestadísticas de restauración de datos y el poder analítico del aprendizaje profundo a través de arquitecturas como U-Net y las redes neuronales convolucionales de regresión— marca un punto de inflexión histórico en la forma en que la sociedad moderna interactúa con el cuidado y la preservación de sus recursos naturales más estratégicos. El éxito alcanzado al limpiar de forma automatizada la mirada de los satélites Landsat y traducir sus señales lumínicas en mapas cuantitativos continuos de la calidad del agua en el Lago de Chapala no constituye únicamente un logro técnico aislado para la literatura académica; representa la edificación de un paradigma tecnológico completamente nuevo: el monitoreo ambiental autónomo y predictivo a escala planetaria.

El impacto más profundo y trascendental de esta revolución tecnológica radica en su capacidad intrínseca para democratizar de forma definitiva el cuidado del medio ambiente y la justicia climática. Históricamente, la capacidad para realizar una vigilancia ambiental rigurosa, científica y en tiempo real ha estado confinada de manera casi exclusiva a naciones industrializadas o a grandes metrópolis dotadas de presupuestos económicos masivos, capacidades de infraestructura institucional avanzada y laboratorios certificados equipados con costosos instrumentos analíticos. Para las comunidades rurales, las regiones indígenas o los municipios en vías de desarrollo que habitan en las periferias de los grandes cuerpos de agua y que dependen directamente de ellos para su subsistencia hídrica,

agrícola y pesquera, el monitoreo tradicional es una utopía inalcanzable. Estas poblaciones se encuentran a menudo sumidas en una total ceguera informativa, percatándose de las crisis de contaminación severas o de los brotes de algas tóxicas únicamente cuando los efectos sanitarios o económicos ya son devastadores, masivos e irreversibles.

La inteligencia artificial aplicada a los datos satelitales de libre acceso destruye esta asimetría histórica. Al transformar los algoritmos entrenados en software libre y código abierto accesible para cualquier ciudadano o científico local, se elimina de la ecuación la necesidad de depender de campañas de muestreo físico multimillonarias y permanentes. Cualquier comunidad del mundo que cuente con una computadora modesta y una conexión básica a internet puede beneficiarse de este vigía espacial purificado por la IA. El sistema propuesto posee la capacidad de operar de forma completamente autónoma: cada vez que un satélite Landsat completa su órbita y carga una nueva escena de la región a los servidores públicos globales, el flujo de inteligencia artificial puede ejecutarse en la nube de manera automática, aislando las nubes mediante la red U-Net, corrigiendo el destello solar superficial a través del algoritmo de Lyzenga, rellenando los parches ocultos mediante el Random Forest Regressor e interpolación geoestadística, y desplegando en cuestión de minutos un mapa a color de alta resolución espacial que detalla los niveles de turbidez y sólidos en cada rincón del lago. Esto permite transitar desde un esquema de monitoreo ambiental reactivo hacia una estrategia de resiliencia y alerta temprana de bajo costo y alta eficiencia comunitaria, permitiendo identificar focos rojos, descargas clandestinas de desechos industriales y predecir la llegada de frentes de sedimento hacia las tomas de agua potable locales. Al limpiar la mirada de los satélites y enseñarles a las neuronas artificiales a interpretar el lenguaje de la luz reflejada en el agua, la ciencia no solo expande las fronteras del conocimiento humano; dota a la Tierra de un sistema nervioso digital integrado, un escudo matemático de protección hídrica orientado a garantizar que el recurso más preciado siga fluyendo con pureza, claridad y abundancia para las generaciones del mañana.

Referencia

Alvarez-Martínez, J. M., et al. (2025). Four decades of remote sensing for monitoring terrestrial ecosystems: A global review and future challenges. *Remote Sensing of Environment*.

Belda, S., Pipia, L., Morcillo-Pallarés, P. & Verrelst, J. (2020). Optimizing cloud-clearing of Sentinel-2 time series for PVPs retrieval. Remote Sensing, 12(23), Artículo 3972. https://doi.org/10.3390/rs12233972

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Foga, S., Scaramuzza, P. L., Guo, S., Zhu, Z., Dilley, R. D., Beckmann, T., Schmidt, G. L., Dwyer, J. L., Hughes, M. J. & Laue, B. (2017). Cloud and cloud shadow detection in Landsat 4–8 data using a cloud-masking algorithm (Fmask). *Remote Sensing of Environment*, *202*, 280–292. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026

Géron, A. (2019). *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems* (2.ª ed.). O'Reilly Media.

Hedley, J. D., Harborne, A. R. & Mumby, P. J. (2005). Technical note: Simple and robust methods for removing sun glint from high resolution satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, *26*(10), 2107–2112. https://doi.org/10.1080/01431160500034086

Jeppesen, J. H., Jacobsen, R. H., Ingholt, F. & Toftegaard, T. S. (2019). Cloud detection in satellite imagery using deep learning. *Remote Sensing of Environment*, *233*, Artículo 111383. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383

Justice, C. O., Townshend, J. R., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., ... & Morisette, J. T. (2002). An overview of MODIS land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, *83*(1–2), 3–15.

Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology*, *58*(8), 1246–1266. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246

Ritchie, J. C., Zimba, P. V. & Everitt, J. H. (2003). Remote sensing techniques to assess water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, *81*(1), 359–368.

U.S. Geological Survey. (2018). *National field manual for the collection of water-quality data* (U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations).

U.S. Geological Survey. (2022). 50 years of Landsat: Continuous Earth observation for the benefit of all.

U.S. Geological Survey. (2026). Landsat project statistics and mission status updates. https://www.usgs.gov/landsat-missions

Zhu, Z. & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment, 118*, 83-94. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.028

Avances científicos, desarrollos tecnológicos y estrategias para la innovación sostenible en sistemas de agua y energía
Se terminó de editar en Octubre de 2026
en los talleres gráficos de Astra Ediciones
Av. Acueducto 829, Colonia Santa Margarita, C. P. 45140,
Zapopan, Jalisco
E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx
www.astraeditorialshop.com

El agua y la energía son recursos esenciales para el desarrollo de las sociedades y constituyen pilares fundamentales para garantizar el bienestar humano, la seguridad alimentaria, la salud pública y el crecimiento económico. Sin embargo, ambos enfrentan desafíos cada vez más complejos derivados del cambio climático, el crecimiento poblacional, la urbanización acelerada, la contaminación ambiental y la creciente demanda de recursos naturales. Ante este panorama, la generación de conocimiento científico, el desarrollo tecnológico y la formación de recursos humanos altamente especializados son elementos indispensables para construir un futuro más sostenible.

Con esta visión nace la obra *Avances científicos, desarrollos tecnológicos y estrategias para la innovación sostenible en sistemas de agua y energía*, un libro de divulgación científica que reúne el trabajo de estudiantes, egresados y profesores de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía de la Universidad de Guadalajara. Más que una recopilación de capítulos, esta obra representa el resultado del esfuerzo colectivo de una comunidad académica comprometida con la investigación, la innovación y la formación de profesionistas capaces de responder a los desafíos actuales en materia de agua y energía.

ISBN: 979-13-88349-53-9

Consulta y descarga

CENTRO UNIVERSITARIO DE TONALÁ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DEL AGUA Y LA ENERGÍA