






Artículo de divulgación

## Sorbentes de bajo costo y materiales reciclados para la remoción de contaminantes en agua

*Low-cost sorbents and recycled materials for water contaminant removal*

Miriam L. Flores-Avalos <sup>1</sup>, María Dolores J. Rodríguez-Rosales <sup>1</sup>, Adriana Robledo-Peralta <sup>1,2</sup>  
, María Gorety Contreras-Hernández <sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingenierías Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Durango, Felipe Pescador 1803 Ote, Colonia Nueva Vizcaya, 34080, Durango, Dgo., México.

<sup>2</sup> Estancias Posdoctorales para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México (SECIHTI).

\* Autor para correspondencia: [mgorety@itdurango.edu.mx](mailto:mgorety@itdurango.edu.mx)

### Recibido:

23/04/2026

### Aceptado:

28/05/2026

### Publicado:

1/06/2026

### RESUMEN

La contaminación del agua y la creciente escasez de agua potable exigen tecnologías de tratamiento eficientes y accesibles. Aunque la sorción es una opción eficaz, el alto costo de los materiales comerciales limita su uso a gran escala, especialmente en países en desarrollo. En este contexto, este trabajo explora la valorización de residuos agroindustriales y poliméricos como sorbentes de bajo costo. Se revisan los fundamentos del proceso, incluyendo mecanismos de fisisorción y quimisorción, así como modelos cinéticos e isotérmicos, y se destaca que, mediante modificaciones químicas y térmicas, estos materiales pueden alcanzar capacidades competitivas, superando en algunos casos los 400 mg/g para contaminantes como metales y colorantes. Desde una perspectiva de economía circular, esta estrategia es prometedora, aunque persisten desafíos en su escalado, regeneración y validación en condiciones reales.

**Palabras clave:** Adsorción; Tratamiento de aguas; Residuos agroindustriales; Polímeros reciclados; Economía circular.

### ABSTRACT

Water pollution and the growing scarcity of potable water demand efficient and accessible treatment technologies. Although sorption is an effective approach, the high cost of commercial materials limits its large-scale application, particularly in developing countries. In this context, this work explores the valorization of agro-industrial and polymeric wastes as low-cost sorbents. The fundamental aspects of the process are reviewed, including physisorption and chemisorption mechanisms, as well as kinetic and isotherm models, and it is highlighted that, through chemical and thermal modifications, these residual materials can achieve competitive capacities, in some cases exceeding 400 mg/g for contaminants such as metals and dyes. From a circular economy perspective, this strategy is promising; however, key challenges remain regarding scale-up, material regeneration, and validation under real-world conditions.

**Keywords:** Adsorption; Water treatment; Agro-industrial waste; Recycled polymers; Circular economy



## INTRODUCCIÓN

El acceso al agua limpia y segura es uno de los principales retos actuales. El informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo (2023) señala que su adecuada gestión es clave para la seguridad alimentaria, energética y sanitaria, así como para mitigar el cambio climático y restaurar los ecosistemas. En este contexto, la cooperación internacional es fundamental para cumplir los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS). Sin embargo, la situación sigue siendo crítica: en 2020, el 26% de la población mundial carecía de acceso a agua potable y el 46% no contaba con sistemas de saneamiento adecuados (UNESCO, 2023).

Para mitigar estos problemas, se han implementado tecnologías como la precipitación química, filtración por membranas e intercambio iónico. Aunque efectivas, presentan desventajas como alto consumo energético y generación de lodos que requieren disposición costosa, lo que evidencia la necesidad de desarrollar alternativas más sostenibles (Crini et al., 2019).

En este contexto, la sorción ha cobrado relevancia debido a su versatilidad y eficiencia. Esta se define como el proceso mediante el cual una molécula o ion (sorbato) se retiene en un sólido (sorbente) (Rathi y Kumar, 2021). Su eficiencia depende de factores como el área superficial, tamaño de poro, composición química y energía de los sitios activos (Alkhalidi et al., 2024). Además, presenta ventajas como diseño sencillo y bajo costo. Por ello, la investigación reciente se ha enfocado en el desarrollo de sorbentes a partir de residuos, priorizando materiales de bajo costo, alta capacidad de sorción y posibilidad de regeneración (Ho, 2022).

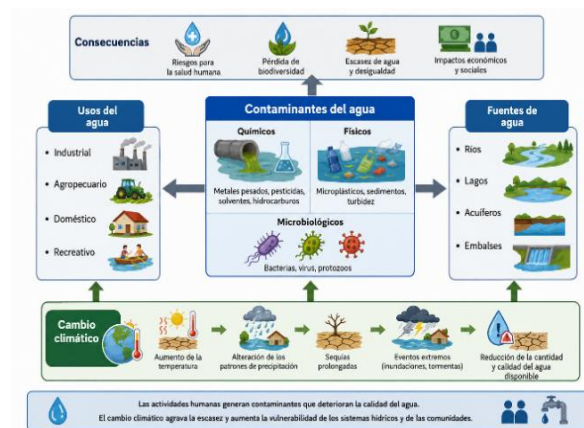
En este contexto, el presente trabajo explora el potencial de los residuos agroindustriales y poliméricos como una alternativa innovadora para el tratamiento de agua. A partir de la revisión de estudios recientes, se analiza cómo estos materiales pueden transformarse en sorbentes eficientes capaces de remover contaminantes prioritarios. Asimismo, se abordan los mecanismos que hacen posible este proceso y los

principales retos que aún deben superarse para llevar estas soluciones del laboratorio a aplicaciones reales.

## CONTAMINANTES EN AGUA Y SU IMPACTO

El agua es un recurso natural de vital importancia, dado que sin ella no podría existir la vida en el planeta. Sin embargo, diversas actividades antropogénicas, como la minería, industria, agricultura intensiva y las descargas de aguas residuales, han provocado problemas de contaminación del agua a nivel mundial, afectando la calidad de este recurso y poniendo en riesgo la salud humana (Benítez et al., 2021).

Además, el cambio climático también ha intensificado los problemas relacionados con la disponibilidad del agua, debido a alteraciones en los patrones de las lluvias, sequías prolongadas y reducción de las fuentes hídricas. Esta situación, aunada a la contaminación generada por las actividades humanas, incrementa la escasez y la desigualdad en el acceso al agua dependiendo de la región, tal como se muestra en la Figura 1 (Yang et al., 2025).



**Figura 1.** Impacto de las actividades humanas y el cambio climático en la calidad del agua. Fuente: elaborada con apoyo de ChatGPT (OpenAI, 2026).

Se estima que cada año entre 4.8 y 12.7 millones de toneladas de plástico llegan a mares y océanos. A esto se suman contaminantes provenientes de la agricultura, como fertilizantes y pesticidas, así como

descargas industriales, aguas residuales mal gestionadas y desbordamientos del alcantarillado (Benítez et al., 2021; Yang et al., 2025).

Entre los contaminantes más preocupantes se encuentran los metales pesados (Cu, Pb, Cd y Cr (VI)), debido a sus efectos nocivos sobre los ecosistemas y la salud humana (Cholico-González et al., 2020). Asimismo, han surgido los contaminantes emergentes (antibióticos, analgésicos, residuos de higiene personal, filtros ultravioleta, cosméticos, etc.), como fármacos y productos de cuidado personal, cuya regulación y efectos aún no están completamente definidos (Martínez-Alcalá et al., 2020).

Es por todo esto que el tratamiento del agua juega un papel importante en garantizar una gestión adecuada de este recurso hídrico; es importante conocer las tecnologías, sus avances, ventajas y desventajas para hacer un mejor uso de ellas. Entre estas alternativas, los procesos de sorción han adquirido gran relevancia debido a su eficiencia, facilidad de operación y potencial aplicación mediante materiales de bajo costo y origen residual. Por ello, resulta importante comprender en qué consisten estos procesos, así como sus principios básicos de funcionamiento y aplicación en la remoción de contaminantes presentes en el agua.

## PROCESOS DE SORCIÓN COMO OPERACIÓN UNITARIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS

La sorción es un proceso fisicoquímico mediante el cual un sorbato (sustancia que interesa retener) se adhiere a la superficie o al interior de un sólido (Robledo-Peralta et al., 2022). En términos generales, es la capacidad que tienen algunos materiales (de forma natural o mediante un proceso) de retener sustancias químicas presentes en el agua; por lo que este proceso se establece como una estrategia eficiente para el tratamiento del agua (Crini et al., 2019).

Desde un punto de vista científico, la sorción abarca dos procesos simultáneos, la adsorción (interacciones

en la superficie) y la absorción (cuando el adsorbato se incorpora a la estructura del sorbente), los cuales son influenciados por diferentes factores como la química del sorbente, contaminante a remover y condiciones físicas y químicas del sistema (Al-Ghouti y Da'ana, 2020).

Los mecanismos de sorción describen la forma en que los contaminantes se fijan a la superficie de un material sólido. Estos pueden ser físicos o químicos (Figura 2). La sorción física (fisisorción) implica interacciones débiles, como fuerzas de Van der Waals, donde las moléculas quedan retenidas sin formar enlaces permanentes (Musah et al., 2022). En cambio, la sorción química (quimisorción) ocurre cuando los contaminantes establecen enlaces más fuertes con los grupos funcionales presentes en el material sorbente, lo que genera una unión más estable y específica (Figura 2; Agboola y Benson, 2021).

Además, la presencia de cargas eléctricas tanto en el material como en el contaminante puede favorecer mecanismos de intercambio iónico o atracción electrostática. Comprender estos mecanismos permite seleccionar o diseñar materiales más eficientes para el tratamiento de agua, ya que determinan la capacidad, selectividad y estabilidad del proceso de remoción.

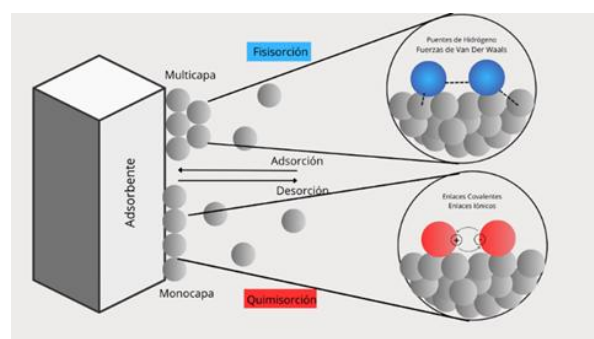


Figura 2. Mecanismos de adsorción. Fuente: Elaboración propia

## MODELOS CINÉTICOS E ISOTERMAS

La evaluación de materiales en procesos de sorción se realiza mediante modelos cinéticos e isotermas. Estas últimas describen cómo se distribuye el contaminante entre la fase líquida y la superficie del material,

permitiendo estimar su capacidad máxima. La eficiencia del proceso depende de factores como el pH, temperatura y concentración inicial del adsorbato (Hu et al., 2023).

Para evaluar la capacidad y eficiencia del proceso de sorción se utilizan distintos modelos, entre los que destacan Langmuir, Freundlich y Temkin (Tabla 1). Los datos experimentales se ajustan a estos modelos y aquel que presenta el mejor ajuste se emplea para describir el comportamiento del sistema (Al-Ghouti y Da'ana, 2020).

**Tabla 1.** Principales modelos de isothermas de sorción. (Al-Ghouti y Da'ana, 2020)

Modelo	Ecuación	Características
Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	Superficie homogénea Sitios equivalentes Monocapa
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	Superficie heterogénea Multicapa n>1 la adsorción es favorable
Temkin	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln(A_T C_e)$	Interacciones adsorbato-adsorbente Calor de adsorción disminuye linealmente

Por otro lado, los modelos cinéticos permiten entender la velocidad con la que ocurre el proceso y los mecanismos que lo controlan, ya sea difusión, interacción química o transferencia de masa. El conocimiento de estos mecanismos es fundamental para describir adecuadamente el sistema y establecer las condiciones óptimas del sistema (Wang y Guo, 2020). De la misma manera que las isothermas, los

resultados experimentales se modelan y ajustan a diferentes modelos; los más conocidos son: pseudo primer-orden, pseudo segundo-orden y Elovich (Tabla 2; Wang y Guo, 2020).

**Tabla 2.** Principales modelos de cinética de sorción (Wang y Guo, 2020)

Modelo	Ecuación	Características
Pseudo primer-orden	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	Proporcional a sitios vacíos Válido en etapa inicial
Pseudo segundo-orden	$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}$	Proporcional al cuadrado de sitios Controlado por quimisorción Buen ajuste en fase líquida
Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha\beta t)$	Superficie heterogénea Energía de activación variable
Difusión Intraparticular	$q_t = k_{id} t^{0.5} + C$	Control por difusión interna

## SORBENTE/ADSORBENTE

Un sorbente se define como el material sólido, poroso, en el que se retiene una sustancia de interés, presente en medio líquido o gaseoso. El material sólido proporciona gran área superficial y sitios activos, responsables de la capacidad de sorción del material (Al-Ghouti y Da'ana, 2020). Los tipos de sorbentes se engloban en dos grandes grupos, sintéticos y naturales.

Los sorbentes sintéticos (convencionales) son materiales obtenidos mediante procesos químicos o de ingeniería de materiales. Estos suelen fabricarse con estructuras porosas controladas, altas áreas superficiales y grupos funcionales específicos, lo que permite mejorar su selectividad y capacidad de

remoción frente a contaminantes definidos. Estos sorbentes incluyen arcillas modificadas, tierras Fuller, alúmina, resinas, nanomateriales y carbones activados, entre otros (Florez y Marulanda, 2020). Sin embargo, sus costos de producción y regeneración suelen ser elevados. Por ejemplo, el carbón activado comercial puede presentar costos aproximados entre 1 y 5 USD por kilogramo, dependiendo de la materia prima y el proceso de activación empleado, mientras que algunos nanomateriales funcionalizados pueden superar los 100 USD por kilogramo debido a la complejidad de su síntesis (Crini y Lichtfouse, 2019; Zakir et al., 2025).

Los sorbentes naturales (no convencionales, verdes o ecológicos) provienen del aprovechamiento de materia viva (algas, levaduras, hongos, etc.), residuos provenientes de la industria agrícola, pecuaria y alimentaria (biomasa vegetal como restos de cáscaras y bagazo de frutas, semillas, etc.) y de los residuos orgánicos forestales (corteza de árboles, tallos, etc.). Estos residuos se caracterizan por su alto contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, carbohidratos y proteínas que aportan grupos funcionales activos (Duany-Timosthe et al., 2022). Entre sus principales ventajas destacan su uso como materiales prístinos o funcionalizados, disponibilidad, abundancia y su bajo costo, con precios menores a 0.5 USD por kilogramo, reduciendo significativamente los gastos asociados al tratamiento de agua (Pathak et al., 2022; Florez y Marulanda, 2020).

En los últimos años, los sorbentes poliméricos han ganado interés y pueden clasificarse como naturales o sintéticos según su origen. Su relevancia radica en su estabilidad química y térmica, así como en su facilidad de modificación, lo que les permite alcanzar altas capacidades de sorción (Zaimee et al., 2021). No obstante, es importante señalar que estos materiales, tanto naturales como sintéticos, suelen someterse a procesos de funcionalización para mejorar su desempeño. Porque la modificación de su superficie incrementa la afinidad por los contaminantes al introducir o potenciar grupos activos, lo que mejora notablemente la eficiencia de sorción (Ungureanu et al., 2023). Su principal desventaja radica en los

elevados costos de producción, modificación química y regeneración. Dependiendo de su composición y funcionalización, estos materiales pueden presentar costos aproximados entre 10 y 200 USD por kilogramo, especialmente en el caso de polímeros especializados diseñados para remover metales pesados o contaminantes emergentes (Crini, 2015).

Aunque la sorción es un proceso eficiente, su potencial aumenta al emplear materiales económicos con alta capacidad de remoción. En este sentido, el uso de residuos ha sido reconocido como una estrategia viable y sostenible, siempre que cumplan con características como disponibilidad, bajo impacto ambiental, accesibilidad local y bajo costo (Duany-Timosthe et al., 2022). En conjunto, el empleo de materiales reciclados como sorbentes representa una alternativa sostenible que reduce costos, disminuye residuos y contribuye al tratamiento eficiente de aguas contaminadas.

## RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

La generación masiva de residuos agroindustriales representa un problema ambiental relevante; sin embargo, su valorización como materiales para la remediación de agua ha cobrado interés (Ungureanu et al., 2023). Ya que su aprovechamiento contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, al reducir desperdicios y promover la bioeconomía. En México, se generan anualmente millones de toneladas de estos subproductos, como bagazo de caña (15 millones), mazorcas de maíz (4.4 millones), paja de trigo (650 mil) y hojas de plátano (619 mil), etc. (Ungureanu et al., 2023).

Estos residuos destacan por su alta capacidad para adsorber contaminantes presentes en agua (Duany-Timosthe et al., 2022); algunos ejemplos de estos residuos se presentan en la tabla 3. Para mejorar su eficiencia, generalmente se someten a tratamientos previos que implican lavado, secado, molienda y, en algunos casos, modificación química mediante ácidos (HCl, HNO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COOH y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) o bases (KOH, NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), lo que incrementa la afinidad del



material hacia los contaminantes (Madela y Skuza, 2021).

**Tabla 3.** Estudios comparativos de la capacidad de sorción de diferentes residuos agroindustriales (Cholico-González et al., 2020; Giraldo et al., 2022; Kataya et al., 2023; Robledo-Peralta et al., 2022)

Residuo	Modificación	Contaminante	$q_{\max}$ mg/g
Bagazo de agave	Ninguno (crudo/molido)	Pb (II)	93.1
		Cd (II)	28.5
		Zn (II)	24.6
Cáscara de naranja	Ninguno (crudo/polvo)	Azul de metileno	250
Biocarbón de cáscara de plátano	Pirólisis a 500°C	Cu (II)	54.9
Cáscara de naranja y manzana	Alcalino, carboxilación e impregnación con Zr	Fluoruro	4.85
			5.62

## RESIDUOS POLIMÉRICOS TRANSFORMADOS EN SORBENTES

Desde mediados del siglo XX, la producción de plásticos ha superado los 6300 millones de toneladas, de las cuales cerca del 80% se ha acumulado en vertederos o en el ambiente, con una producción anual cercana a 368 millones de toneladas (Pham, 2023). Su uso extendido en la industria, el comercio y la vida cotidiana, así como su acumulación en océanos y zonas costeras, evidencian la magnitud del problema. Frente a este panorama, la transformación de residuos plásticos en sorbentes surge como una alternativa viable, capaz incluso de competir con materiales convencionales (Escamilla-Lara et al., 2023).

Estos materiales pueden diseñarse con estructuras flexibles y superficies funcionalizables que fortalecen la interacción con contaminantes en agua (Alkhaldi et al., 2024). Por ejemplo, algunos polímeros sintéticos, como los polielectrolitos, han sido utilizados como

floculantes o sorbentes (Jing et al., 2024). En conjunto, estos sorbentes poliméricos ofrecen ventajas como estabilidad, buen desempeño mecánico y versatilidad, dependiendo de su diseño (Alkhaldi et al., 2024). La Tabla 4 muestra que tanto la naturaleza del residuo como su modificación influyen directamente en la capacidad de sorción, especialmente cuando se incrementan el área superficial, porosidad y sitios activos.

**Tabla 4.** Estudios comparativos de la capacidad de sorción de diferentes residuos poliméricos (Pham, 2023; Alwael et al., 2024; Hou et al., 2024; Aprilita et al., 2024; Khakbaz et al., 2023)

Residuo	Modificación	Contaminante	$q_{\max}$ mg/g
PET	Activación física con gas CO	Azul de metileno	18.28
Espuma de poliuretano	Funcionalizada con Sol-gel	Colorante textil eosina Y	37.64
Nailon	Coprecipitación de nailon y solución de FeSO <sub>4</sub> , FeCl <sub>3</sub> , NaOH	Cu (II)	11.57
Poliestireno	Nitración y magnetización	Pb <sup>2+</sup>	9.81

Entre las estrategias más destacadas se encuentra la conversión de plásticos en carbones activados, materiales altamente porosos cuya superficie puede ajustarse mediante procesos de activación, lo que los hace prometedores para la remoción de contaminantes (Pereira et al., 2025). Esta transformación no solo reduce el volumen de residuos, sino que al mismo tiempo genera productos de alto valor agregado.



En conjunto, la valorización de residuos poliméricos como sorbentes representa una alternativa prometedora para el tratamiento de agua. Estos materiales pueden diseñarse con química superficial ajustable y buena estabilidad, mientras que su estructura (películas, fibras o materiales porosos) favorece la incorporación de grupos funcionales y el acceso de los contaminantes a los sitios activos, mejorando su afinidad y selectividad (Alkhaldi et al., 2024). Desde la perspectiva de implementación, su carácter versátil y escalable facilita su integración con otras tecnologías de tratamiento en sistemas híbridos, lo que contribuye al desarrollo de soluciones eficientes y sostenibles alineadas con la economía circular (Alkhaldi et al., 2024; Saleh, 2024).

## **FACTORES QUE AFECTAN EN EL PROCESO DE SORCIÓN**

El rendimiento de la sorción depende de factores relacionados con el material, el contaminante y las condiciones del medio. En el sorbente, propiedades como el área superficial, tamaño de poro, química superficial y tamaño de partícula determinan su capacidad de interacción. Por su parte, características del contaminante como tamaño, estructura y solubilidad también influyen (Wang et al., 2024). Además, parámetros de la solución como el pH, especiación, fuerza iónica y temperatura modifican la afinidad entre ambas fases, mientras que condiciones operativas como la concentración, tiempo de contacto y transferencia de masa definen la velocidad y eficiencia del proceso (Alkhaldi et al., 2024).

En general, un pH adecuado puede favorecer la sorción según la carga del material y del contaminante; una mayor área superficial incrementa la capacidad de captura, y la temperatura tiende a favorecer procesos químicos sobre los físicos. Además, la presencia de otros contaminantes genera competencia por los sitios activos, reduciendo la eficiencia del proceso (Wang et al., 2024). En conjunto, comprender y optimizar estos factores permite mejorar significativamente la eficiencia del proceso de adsorción.

## **REUTILIZACIÓN Y REGENERACIÓN**

Los procesos de regeneración permiten emplear un material sorbente en múltiples ciclos sin que exista una disminución significativa en su eficiencia de remoción del contaminante. Entre sus principales ventajas destacan la reducción de costos, disminución en el consumo de nuevos materiales y, por ende, la menor generación de residuos sólidos. La capacidad de reutilización se convierte así en un indicador clave de sostenibilidad, ya que refleja la estabilidad estructural y funcional del material a lo largo del tiempo. Para los sorbentes ecológicos, la regeneración adecuada resulta esencial, pues les permite conservar su funcionalidad sin comprometer el medio ambiente (Liu et al., 2024).

Además, la regeneración debe ir acompañada de una estrategia correcta de disposición final de los residuos derivados del proceso, especialmente los que provienen de la desorción, debido al posible arrastre de contaminantes capturados previamente. Un plan adecuado evita impactos secundarios sobre el ambiente. En este contexto, se han desarrollado diversas estrategias de regeneración, como la desorción térmica y química, la regeneración electroquímica y los procesos fotocatalíticos, que permiten recuperar el material y prolongar su vida útil (Olawade et al., 2024).

La desorción es la eliminación de contaminantes retenidos en la superficie de los sorbentes, con el objetivo de regenerar el material. Entre las técnicas más utilizadas destaca la desorción térmica, basada en el calentamiento del material; sin embargo, la desorción química suele ser más selectiva y eficiente, ya que emplea agentes como ácidos o compuestos quelantes (p. ej., HCl o EDTA) para romper las interacciones entre el sorbato y el sorbente (Olawade et al., 2024).

Además, se han desarrollado estrategias para intensificar el proceso, como el uso de ultrasonido o fluidos supercríticos, que mejoran la velocidad y eficiencia de recuperación. En este sentido, Lu et al., (2023) demostraron que el lavado de lodos asistido por ultrasonido con EDTA y ácido cítrico permite remover

metales como Cd, Cr, Cu, Pb y Zn; no obstante, también puede incrementar la movilidad de las fracciones residuales, por lo que se recomienda aplicar múltiples etapas de lavado para reducir el riesgo ambiental.

Por su parte, la regeneración electroquímica implica la aplicación de una corriente eléctrica para desorber contaminantes y recuperar el material sorbente. Este método destaca por su selectividad, escalabilidad y menor impacto ambiental, aunque su desarrollo se centra en optimizar los materiales de los electrodos y las condiciones de operación para mejorar la eficiencia y reducir el consumo energético (Olawade et al., 2024).

Esta técnica permite la desorción de contaminantes mediante la inversión del campo eléctrico, un estudio con el uso de electrodos de carbón derivados de estructuras metalorgánicas, que permiten adsorber contaminantes como fosfatos bajo un voltaje aplicado y liberarlos al invertir el campo eléctrico. Este tipo de sistemas ha mostrado eficiencias de regeneración cercanas al 90% tras múltiples ciclos (He et al., 2022)

La regeneración fotocatalítica se basa en el uso de fotocatalizadores para que, con ayuda de la luz, de puedan recuperar los contaminantes adheridos al material mediante oxidación o reducción. Ofrecen ventajas como su escalabilidad, operación e integración a los procesos de tratamiento del agua para la eliminación de contaminantes (Olawade et al., 2024).

Investigaciones recientes han empleado compuestos como biochar combinado con  $\text{Bi}_2\text{WO}_6$ , demostrando que la luz visible puede degradar contaminantes orgánicos adsorbidos. A diferencia de la desorción química, este método mineraliza los contaminantes en lugar de transferirlos a otra fase, evitando la generación de residuos líquidos secundarios (Olawade et al., 2024).

## RETOS ACTUALES, PERSPECTIVAS FUTURAS Y ECONOMÍA CIRCULAR

El uso de sorbentes en el tratamiento de agua ha crecido notablemente; no obstante, aún enfrenta desafíos importantes. Es necesario desarrollar materiales más selectivos, económicos y reutilizables, capaces de mantener su eficiencia en condiciones reales, donde coexisten múltiples contaminantes (Alkhalidi et al., 2024).

Otro reto clave es su disposición final. Aunque se diseñan como materiales sostenibles, una vez saturados pueden concentrar contaminantes peligrosos, lo que exige estrategias adecuadas de regeneración, manejo y disposición segura.

En este contexto, la economía circular ofrece un enfoque prometedor al transformar residuos en materiales de valor. La conversión de desechos agroindustriales y poliméricos en sorbentes no solo reduce la generación de residuos, sino que también contribuye al desarrollo de soluciones sostenibles para la remediación del agua.

## CONCLUSIONES

La valorización de residuos agroindustriales y poliméricos como sorbentes de bajo costo es una alternativa sólida y sostenible para la remoción de contaminantes en agua. Estudios recientes muestran que, tras modificaciones químicas o térmicas, estos materiales pueden igualar o superar a adsorbentes comerciales, especialmente en la eliminación de metales y colorantes.

El rendimiento depende principalmente del diseño del material y las condiciones de operación, más que del origen del residuo, por lo que su selección debe ajustarse al contaminante y a la matriz acuosa. Desde la economía circular, esta estrategia reduce residuos y genera soluciones útiles; sin embargo, su aplicación real aún enfrenta retos en escalado, regeneración y validación en aguas complejas.



## Agradecimientos

Agradecemos al SECIHTI por la beca de maestría otorgada a Miriam Lizbeth Flores-Avalos (2088711) y beca posdoctoral de: Adriana Roble-Peralta (646143) y María Gorety Contreras-Hernández (489313).

## Literatura citada

- Agboola, O.D. y Benson, N.U. (2021) Physisorption and chemisorption mechanisms influencing micro (nano) plastics-organic chemical contaminants interactions: a review, *Frontiers in Environmental Science*, 9, 678574. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678574>
- Al-Ghouti, M.A. y Da'ana, D.A. (2020) Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
- Alkhalidi, H.; Alharthi, S.; Alharthi, S.; AlGhamdi, H.A.; AlZahrani, Y.M.; Mahmoud, S.A.; Amin, L.G.; Al-Shaalan, N.H.; Boraie, W.E.; Attia, M.S.; Al-Gahtany, S.A.; Aldaleeli, N.; Ghobashy, M.M.; Sharshir, A.I.; Madani, M.; Darwesh, R.; Abaza, S.F. (2024) Sustainable polymeric adsorbents for adsorption-based water remediation and pathogen deactivation: a review. *RSC Advances*, 14, 33143-33190. <https://doi.org/10.1039/D4RA05269B>
- Alwael, H.; Alsulami, A.N.; Abduljabbar, T.N.; Oubaha, M. y El-Shahawi, M.S. (2024) Innovative sol-gel functionalized polyurethane foam for sustainable water purification and analytical advances. *Frontiers in Chemistry*, 12, 324426. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1324426>
- Aprilita, N.H.; Ofens, T.F.P.; Nora, M.; Nassir, T.A. y Wahyuni, E.T. (2024) Conversion of styrofoam waste into a high-capacity and recoverable adsorbent for removing toxic Pb(II) from water media. *Global NEST Journal*, 26(2) 1–10. <https://doi.org/10.30955/gnj.005415>
- Benítez, E.M.L.; Verdecia, G.M. y Castell, M.A.P. (2021) Escasez y contaminación del agua, realidades del siglo XXI. *Revista científica 16 de abril*, 60(279), e854. [https://rev16deabril.sld.cu/index.php/16\\_04/articlos/view/854](https://rev16deabril.sld.cu/index.php/16_04/articlos/view/854)
- Cholico-González, D.; Ortiz Lara, N.; Fernández Macedo, A.M. y Chávez Salas, J. (2020) Adsorption behavior of Pb(II), Cd(II), and Zn(II) onto agave bagasse: characterization and mechanism. *ACS Omega*, 5(7), 3302–3314. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03385>
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. *Bioresource technology*, 97(9), 1061-1085. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>
- Crini, G.; Lichtfouse, E.; Wilson, L.D. y Morin-Crini, N. (2019) Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 195–213. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>
- Cusioli, L.F.; Mantovani, D.; Bergamasco, R.; Tusset, A.M. y Lenzi, G.G. (2023) Preparation of a new adsorbent material from agro-industrial waste and comparison with commercial adsorbent for emerging contaminant removal. *Processes*, 11(8), 2478. <https://doi.org/10.3390/pr11082478>
- Duany-Timosthe, S.; Arias-Lafargue, T.; Bessy-Horruitiner, T. y Rodríguez-Heredia, D. (2022) Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. *Tecnología Química*, 42(1), 94–113.
- Escamilla-Lara, K.A.; López-Téllez, J. y Rodríguez, J.A. (2023) Adsorbents obtained from recycled polymeric materials for retention of different pollutants: a review. *Chemosphere*, 335, 139159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139159>
- Flórez, E.C. y Marulanda, L.F. (2020) Uso de residuos de café como biosorbente para la remoción de metales pesados en aguas residuales. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 44–55. <https://doi.org/10.21500/20275846.4477>
- Giraldo, S.; Acelas, N.Y.; Ocampo-Pérez, R.; Padilla-Ortega, E.; Flórez, E.; Franco, C.A.; Cortés, F.B. y Forgionny, A. (2022) Application of orange peel waste as adsorbent for methylene blue and Cd<sup>2+</sup> simultaneous remediation. *Molecules*, 27(16), 5105. <https://doi.org/10.3390/molecules27165105>
- He, M.; Zhang, P.; Huo, S.; Zhang, X.; Gong, A.; Zhang, W. y Li, K. (2022) Remarkable phosphate electrosorption/desorption by bimetallic MOF-derived hierarchically porous carbon electrode.



- Chemical Engineering Journal*, 446, 137396.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137396>
- Hou, C.; Zhang, Y.; Liao, Q. y Chen, Q. (2024) Ultra-cheap and ultra-stable adsorption materials based on nylon and removal performance of copper ion. *Separation and Purification Technology*, 336, 126346.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126346>
- Hu, Q.; Lan, R.; He, L.; Liu, H. y Pei, X. (2023) A critical review of adsorption isotherm models for aqueous contaminants. *Journal of Environmental Management*, 329, 117104.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117104>
- Jing, L.; Shi, T.; Chang Y.; Meng X.; He S.; Xu H.; Yang, S. y Liu, J. (2024) Cellulose-based materials in environmental protection: a scientometric and visual analysis review. *Science of the Total Environment*, 929, 172576.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172576>
- Kataya, G.; Issa, M.; Jeguirim, M. y Hijazi, A. (2023) Characterization and environmental application potential of banana peels biochar. *Engineering Proceedings*, 37(1), 105.  
<https://doi.org/10.3390/ECP2023-14725>
- Khakbaz, M.; Ghaemi, A. y Mir Mohamad Sadeghi, G. (2023) Evaluation of hypercrosslinked waste polycarbonate for the removal of lead ions from aqueous solutions. *Polymer Bulletin*, 81, 2287–2318. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04813-6>
- Liu, Y.; Biswas, B.; Hassan, M. y Naidu, R. (2024) Green adsorbents for environmental remediation: synthesis methods, ecotoxicity, and reusability prospects. *Processes*, 12(6), 1195.  
<https://doi.org/10.3390/pr12061195>
- Lu, H.; Wu, Y.; Luo, Y.; Li, Z.; Wang, Z.; Peng, X. y Qiang, Y. 2023 Effect of ultrasound-assisted EDTA and citric acid washing on heavy metal removal, residual heavy metal mobility, and sewage sludge quality. *Water Science and Technology*, 88(6), 1594–1607.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2023.289>
- Madela, M. y Skuza, M. (2021) Towards a circular economy: analysis of the use of biowaste as biosorbent for the removal of heavy metals. *Energies*, 14(17), 5427.  
<https://doi.org/10.3390/en14175427>
- Martínez-Alcalá, I.; Soto, J. y Lahora, A. (2020) Antibióticos como contaminantes emergentes. *Ecosistemas*, 29(3), 2070.  
<https://doi.org/10.7818/ECOS.2070>
- Musah, M.; Azeh, Y., Mathew, J., Umar, M., Abdulhamid, Z. y Muhammad, A. (2022) Adsorption kinetics and isotherm models: a review. *Caliphate Journal of Science and Technology*, 4(1), 20–26.  
<https://doi.org/10.4314/cajost.v4i1.3>
- Olawade, D.B.; Wada, O.Z.; Egbewole, B.I.; Fapohunda, O.; Ige, A.O.; Usman, S.O. y Ajisafe, O. (2024) Metal and metal oxide nanomaterials for heavy metal remediation. *Frontiers in Nanotechnology*, 6, 1466721.  
<https://doi.org/10.3389/fnano.2024.1466721>
- OpenAI. (2026). *Impacto de las actividades humanas y el cambio climático en la calidad del agua*. (modelo GPT-5) [Imagen mejorada por inteligencia artificial]. ChatGPT. <https://chat.openai.com/>
- Pereira, L.; Martín-Lara, M.Á.; Garcia-Garcia, G.; Calvo, C.; Robledo, T.; Solís, R.R. y Calero, M. (2025) Plastic waste to carbon adsorbent: activation with sodium carbonate and functionalization with citric acid. *Applied Sciences*, 15(3), 1634.  
<https://doi.org/10.3390/app15031634>
- Pham, T. (2023) Synthesis of activated carbon from polyethylene terephthalate (PET) plastic waste. *Non-Metallic Material Science*, 5, 27-37  
<https://doi.org/10.30564/nmms.v5i1.5663>
- Robledo-Peralta, A.; García-Quiñonez, L.V.; Rodríguez-Beltrán, R.I. y Reynoso-Cuevas, L. (2022) Zr-based biocomposite materials as an alternative for fluoride removal. *Polymers*, 14(8), 1575. <https://doi.org/10.3390/polym14081575>
- Ungureanu, E.L.; Mocanu, A.L.; Stroe, C.A.; Panciu, C.M.; Berca, L.; Sionel, R.M. y Mustatea, G. (2023) Agricultural byproducts used as low-cost adsorbents. *Sustainability*, 15(7), 5999.  
<https://doi.org/10.3390/su15075999>
- Wang, J. y Guo, X. (2020) Adsorption kinetic models: physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 122156.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>



- Wang, X.; Xu, Y.; Ou, Q.; Chen, W.; van der Meer, W. y Liu, G. (2024) Adsorption characteristics and mechanisms of water-soluble polymers (PVP and PEG) on kaolin and montmorillonite minerals. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133592. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133592>
- Yang, W.; Schmidt, C.; Wu, S.; Zhao, Z.; Li, R.; Wang, Z.; Wang, H.; Hua, P.; Krebs, P. y Zhang, J. (2025) Exacerbated anthropogenic water pollution under climate change and urbanization. *Water Research*, 280, 123449. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123449>
- Zaimee, M.Z.A.; Sarjadi, M.S. y Rahman, M.L. (2021) Heavy metals removal from water by efficient adsorbents. *Water*, 13(19), 2659. <https://doi.org/10.3390/w13192659>
- Zakir, O.; Ait-Karra, A.; Khardazi, S.; Idouhli, R.; Khadiri, M. E.; Dikici, B.; Aboulaich, A.; Outzourhit, A y Abouelfida, A. (2025). Recent progress in nanomaterials for water treatment: A comprehensive review of adsorption, photocatalytic, and antibacterial applications. *Journal of Water Process Engineering*, 72, 107566. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107566>

**Aviso legal/Nota del editor:** Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

