www.mundonano.unam.mx | **Mundo Nano**
https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2026.36.69890 | **19(36), e69890, enero–junio 2026**

Nanocompuestos poliméricos para adsorción de contaminantes orgánicos◊

Polymeric nanocomposites for organic pollutants adsorption

Arantza Estefania Olvera Ramos,*,♦ Marlene Lariza Andrade Guel,* Carlos Alberto Ávila Orta,* Christian Javier Cabello Alvarado,* Gregorio Cadenas Pliego,* Jesús Gilberto Rodríguez Velázquez,* Sergio Gabriel Flores Gallardo*

ABSTRACT: Water pollution and water scarcity have become increasingly significant global challenges. Wastewater in reservoirs contains high concentrations of toxic pollutants, especially organic compounds. Exposure to these substances poses a latent risk to human health and ecosystems. To address this problem, the application of nanotechnology in producing adsorbent materials has been proposed. Polymer nanocomposites are multiphase systems in which at least one phase has nanometric dimensions. If an appropriate synergy between the components is achieved, the properties of the materials can be significantly improved. Moreover, adsorption is distinguished as an effective method for pollutant removal, offering numerous advantages at a low cost. Incorporating nanoclays, metallic nanoparticles, and carbon-based nanoparticles into polymer matrices is an example of materials that exhibit high adsorption levels of organic pollutants in aqueous media. This review analyses recent advances in developing and using polymer nanocomposites for the adsorption of dyes, drugs, and toxins in wastewater treatment.
KEYWORDS: nanocomposites, adsorption, organic pollutants, wastewater.

RESUMEN: La contaminación y escasez de agua se han consolidado como desafíos globales de creciente magnitud. Los efluentes presentes en reservas de agua contienen altas concentraciones de contaminantes tóxicos, destacándose entre ellos los compuestos orgánicos. La exposición a estas sustancias representa un riesgo latente tanto para la salud humana como para el ecosistema. Para abordar esta problemática, se ha propuesto la implementación de la nanotecnología en la creación de materiales con propiedades adsorbentes. Los nanocompuestos poliméricos son sistemas multifase en los cuales al menos una de las fases presenta dimensiones nanométricas y, cuando se logra una adecuada sinergia entre sus componentes, se pueden mejorar significativamente las propiedades del material. Asimismo, la adsorción se caracteriza por ser un método eficaz para la eliminación de contaminantes, ofreciendo múltiples ventajas

Recibido: 23 de mayo, 2025. Aceptado: 13 de septiembre, 2025. Publicado: 25 de octubre, 2025.

◊ Los autores agradecen el financiamiento de los Proyectos Conahcyt 320802: "Desarrollo de filtros selectivos nacionales a base de polímeros y nanopartículas modificadas, para mejorar el tratamiento de hemodiálisis y sustituir el acaparamiento del mercado de empresas extranjeras", y Secihti PEE-2025-G-119: "Filtros de colorantes en lavanderías de mezclilla a base de piedra pómez y tela no-tejida de nylon-6/piedra pómez: una estrategia sustentable para mitigar la contaminación del río Atoyac". Así como también, Arantza Olvera agradece a Conahcyt por la beca 813261 de maestría en Ciencia y Tecnología de Polímeros en la convocatoria Becas Nacionales (Tradicional) 2023-2.
* Centro de Investigación en Química Aplicada, Departamento de Materiales Avanzados. Saltillo, Coahuila, México.
♦ Autora de correspondencia: arantza.olvera.m23@ciqa.edu.mx

operativas a un bajo costo. La incorporación de nanoarcillas, nanopartículas metálicas y nanopartículas a base de carbono en matrices poliméricas son ejemplos de materiales que demuestran altos niveles de adsorción de contaminantes orgánicos en medio acuoso. En esta revisión se abordan los avances más recientes en el desarrollo y aplicación de nanocompuestos poliméricos para la adsorción de colorantes, fármacos y toxinas en el tratamiento de aguas residuales.
PALABRAS CLAVE: nanocompuestos, adsorción, contaminantes orgánicos, aguas residuales.

Introducción

El agua es un recurso esencial para mantener la vida y el ecosistema en la tierra. No obstante, el crecimiento desacelerado de la población ha incrementado significativamente la generación de aguas residuales y agravado la escasez de agua potable (Thakur *et al*., 2024).

Actualmente, solo el 30% del agua disponible es apta para consumo humano (Soni *et al*., 2023). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), para 2025, se estima que aproximadamente 1.8 billones de personas enfrentarán una escasez total de agua; y dos tercios de la población mundial vivirán bajo condiciones de estrés hídrico. En particular, en México existe una gran diversidad de reservas naturales de agua, pero la distribución territorial de este recurso presenta contrastes. De esta manera, en regiones del norte y centro del país, así como en zonas áridas, predomina una alta escasez de agua. En los años 60 la disponibilidad de agua anual per cápita en México correspondía a 10,000 m^3. Las proyecciones estiman que para 2030 esta cifra baje a 3,000 m^3 per cápita anual (Nava *et al*., 2024). Una forma de medir el estrés hídrico de una población es a partir del grado de presión sobre los recursos hídricos. Este porcentaje representa la cantidad de agua utilizada para uso agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida y termoeléctrica, con respecto al agua renovable total. De acuerdo con la clasificación que ofrece la ONU del indicador, un valor mayor al 40% se considera elevado e indica que la región es más propensa a enfrentar un estrés hídrico severo.

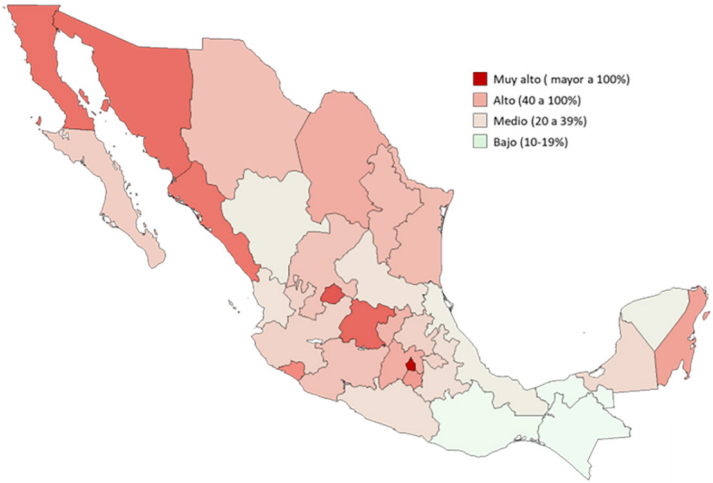
En la figura 1 se ilustra la distribución en grado de presión sobre el recurso hídrico en México, en donde se puede notar que los estados de mayor riesgo corresponden a la Ciudad de México, Aguascalientes, Guanajuato, Sonora, Baja California y Sinaloa (Conagua, 2018).

Las aguas residuales son líquidos generados por diversas actividades de una comunidad que contienen una o más sustancias contaminantes con un impacto negativo para la salud y el medio ambiente. Sus fuentes son variadas, pero pueden clasificarse principalmente en dos categorías: aguas residuales de origen industrial y doméstico (Crini y Lichtfouse, 2019; Karia *et al*., 2024).

En su gran mayoría, los contaminantes presentes en efluentes de aguas residuales consisten en patógenos, nutrientes (desechos de industria agrícola), sólidos suspendidos, compuestos inorgánicos (sales y metales), contaminantes radiactivos y compuestos orgánicos (Akpor *et al*., 2014). La remo-

https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2026.36.69890 | **19(36), e69890, enero–junio 2026**

FIGURA 1. Grado de presión sobre el recurso hídrico con base en datos de Semarnat en 2018.



Fuente: Conagua (2018).

ción de este último tipo de sustancias contaminantes es de reciente interés debido a que suelen encontrarse con un amplio rango de pH, temperatura, salinidad y turbidez, lo cual hace que su separación sea todavía más compleja.

También, la acumulación de compuestos orgánicos contaminantes representa un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Durante su descomposición, el oxígeno disuelto en el agua puede consumirse a una tasa mayor a la de su generación, provocando hipoxia ambiental con graves consecuencias para la biota del medio. Asimismo, su presencia en el agua ocasiona un hábitat inadecuado para una extensa variedad de organismos invertebrados. Los contaminantes orgánicos más habituales incluyen pesticidas, fertilizantes, fenoles, plastificantes, detergentes, aceites, colorantes, farmacéuticos, proteínas, carbohidratos y toxinas (Akpor *et al*., 2014; Nageeb, 2013).

Para superar los problemas relacionados con escasez de agua y exposición a contaminantes presentes en aguas residuales, es necesario desarrollar e implementar métodos efectivos para la recuperación y tratamiento del agua. Una propuesta interesante es la inclusión de la nanotecnología en la creación de materiales con propiedades avanzadas, utilizados en procesos como la adsorción, oxidación catalítica y desinfección (Marcelo *et al*., 2021). La adsorción resalta por su bajo costo de operación, accesibilidad y alta eficiencia de remoción de contaminantes presentes en aguas residuales. El uso de nanocompuestos, como materiales adsorbentes, se ha descrito en diferentes trabajos, como por ejemplo la incorporación de arcillas (Yadav *et al*., 2019), nanopartículas magnéticas a base de hierro (Marcelo *et al*., 2021), nanomateriales a base de carbono (Gusain *et al*., 2020), zeolitas (Roshanfekr Rad y Anbia, 2021), entre otros. En este documento, se hace una recopilación de avances

en el campo de purificación de agua, con particular enfoque en colorantes, medicamentos y toxinas, empleando nanocompuestos poliméricos adsorbentes, así como sus respectivas implicaciones.

Impacto ambiental y en la salud

Los contaminantes identificados en aguas residuales pueden ser clasificados en patógenos, sólidos suspendidos, nutrientes, contaminantes radioactivos, compuestos inorgánicos (metales y sales) y orgánicos (Pooja *et al*., 2019). El estudio de los contaminantes orgánicos es de particular relevancia debido a que su acumulación progresiva en el suelo y cuerpos de agua supone un gran riesgo para el medio ambiente y la salud humana. Cuando las descargas de agua contaminada entran a fuentes de agua limpia, los contaminantes son absorbidos por la vegetación terrestre y acuática, por lo cual ingresan a la cadena alimentaria y llegan a acumularse en los tejidos de animales y humanos (Saravanan *et al*., 2021).

Los contaminantes orgánicos se dividen en desechos biodegradables demandantes de oxígeno (papel, destilados, alimentos procesados, lácteos, etc.) y compuestos orgánicos sintéticos (colorantes, farmacéuticos, pesticidas, desechos industriales, hidrocarburos aromáticos, compuestos activos, compuestos orgánicos volátiles (COVs), etc.). En los compuestos orgánicos demandantes de oxígeno, la materia orgánica pasa por degradación y descomposición por actividad bacteriana. Sin embargo, el oxígeno disponible en cuerpos de agua es consumido por oxidación aerobia y esto puede llegar a generar condiciones anóxicas con graves consecuencias para el ecosistema marino. Por otro lado, los contaminantes orgánicos sintéticos tienen un alto riesgo de toxicidad para la flora, fauna y humanos, ya que no pueden ser degradados por bacterias e incluso se ha llegado a detectar su presencia en aguas tratadas o que pasaron por un proceso de purificación para consumo humano (R. Das, 2018).

Los riesgos para la salud asociados con los contaminantes químicos presentes en el agua, incluidos los compuestos orgánicos, resultan difíciles de evaluar en su totalidad, pues sus efectos adversos suelen manifestarse únicamente tras exposiciones prolongadas. Estos contaminantes se han vinculado con una amplia variedad de afecciones en la salud humana debido a su potencial toxicidad, así como a sus efectos mutagénicos y carcinogénicos. Entre las principales consecuencias de la exposición prolongada se encuentran disfunciones del sistema inmune, alteraciones hormonales y reproductivas, además de un incremento en el riesgo de desarrollar cáncer (Farhan Hanafi y Sapawe, 2020). Un ejemplo de ello es la exposición a pesticidas, la cual puede ocasionar efectos nocivos en la población infantil, incluyendo retrasos en el neurodesarrollo, disminución de la función pulmonar y una mayor incidencia de ciertos tipos de cáncer. Por otro lado, la propagación de antibióticos en el ambiente puede favorecer el desarrollo de genes de resistencia antimicrobiana, constituyendo una creciente preocupación para la salud pública global (Sun *et al*., 2020).

Los contaminantes orgánicos persistentes (COPs), son un subgrupo de sustancias de interés actual. Estos compuestos se encuentran presentes en grandes cantidades en el ambiente; se caracterizan por persistir a la degradación medioambiental (reacciones químicas, biológicas y fotolíticas) y, por lo tanto, son capaces de mantenerse presentes por décadas en el ambiente, causando graves problemas de salud en humanos (Alharbi *et al*., 2018; El-Shahawi *et al*., 2010). En aguas residuales se han detectado COPs que contienen bifenilos policlorados (BPCs), dibenzodioxinas policloradas (DDPCs), plaguicidas organoclorados (POCs) y éteres de difenilo polibromados (EDPBs). Debido a los efectos ecotoxicológicos de los COPs en el medioambiente, en ciertos países se ha restringido el uso de estos químicos (El-Shahawi *et al*., 2010).

Los estudios epidemiológicos señalan que los COPs pueden afectar el balance hormonal y funciones biológicas normales de los organismos. Como resultado puede producirse deficiencia del sistema inmunológico, afectación de sistemas reproductivos, formación de tumores y cáncer, daño neurológico y defectos en los principales órganos internos (Pawełczyk, 2013).

En la tabla 1 se describen los efectos toxicológicos de algunos contaminantes orgánicos. La información recopilada nos muestra que la exposición a estas sustancias puede provocar enfermedades graves, como dermatosis crónica, cáncer de piel, infecciones pulmonares e incluso afectaciones en el ADN (Saravanan *et al*., 2021).

Entre los productos de cuidado personal y farmacéuticos, se encuentran compuestos altamente tóxicos como nonilfenol, estrona, estradiol y etinilestradiol, conocidos también como sustancias disruptivas endocrinas. La presencia de estos compuestos en el organismo, incluso en concentraciones bajas, puede representar un riesgo significativo para la salud (Kesari *et al*., 2021).

Los compuestos orgánicos constituyen un grupo amplio de contaminantes, los cuales representan un riesgo significativo tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Se espera que, en los próximos años, se reconozcan con mayor detalle sus efectos adversos y aumente la urgencia de desarrollar estrategias más eficientes para su eliminación. En este contexto, resulta fundamental comprender su origen, clasificación y propiedades fisicoquímicas, así como los métodos actualmente empleados en el tratamiento de aguas residuales para su remoción.

Contaminantes orgánicos

Las principales fuentes de contaminación de agua incluyen la industrialización, las actividades humanas, la agricultura intensiva y otros cambios globales y ambientales. Cientos de contaminantes orgánicos se han identificado en cuerpos de agua, entre los cuales se encuentran fármacos, hormonas, químicos consumibles, toxinas y colorantes (Ali *et al*., 2012; Farhan Hanafi y Sapawe, 2020; Schaider *et al*., 2017; Weerakoon *et al*., 2023). Los compuestos orgánicos están constituidos principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno

Tabla 1. Efecto toxicológico de contaminantes orgánicos.

Contaminante	Efecto toxicológico	Referencia
Colorantes		
Azure B	Provoca ruptura en la estructura helicoidal del ADN.	Dutta *et al.* (2024)
Rojo disperso 1	Genera daño en ADN y desarrollo de linfoma en humanos. Causa hiperemia, necrosis y degeneración del hígado en fauna acuática.	Fernandes *et al.* (2015); Sripriya *et al.* (2014)
Rojo Congo	Carcinógeno, mutagénico.	Asses *et al.* (2018)
Azul brillante	Efecto adverso sobre el riñón y reducción de espermatogénesis.	Amin *et al.* (2010)
Índigo carmín	Carcinógeno, mutagénico. Puede causar irritación ocular, toxicidad aguda, daño en ambiente acuático.	A. Singh *et al.* (2020)
Rojo 40	Efectos adversos en capacidad reproductiva de organismos vivos. Afectación del sistema inmune.	A. Singh *et al.* (2020)
Rojo 3	Carcinógeno. Afectación del ADN en el área gastrointestinal. Efectos adversos en neurotransmisores. Genotóxico para las células eucariotas.	A. Singh *et al.* (2020)
Violeta ácido 7	Genera inhibición de actividad de la acetilcolinesterasa, aberración cromosómica y peroxidación lipídica de la membrana.	Roy y Saha (2021)
Farmacéuticos		
Estrona	Anomalías reproductivas y afectación en el desarrollo de diversos organismos.	Fakhri B. *et al.* (2024)
Naproxeno	Toxicidad aguda en fauna acuática, toxicidad crónica en fitoplancton.	Mohan *et al.* (2021)
Acetaminofeno	Destrucción del equilibrio electrolítico y molecular, oliguria, neoplasias hepáticas y ansiedad. Su degradación tiene efectos genotóxicos, mutagénicos y hepatotóxicos.	Fakhri B. *et al.* (2024) H. K. Khan *et al.* (2020)
Ibuprofeno	Efectos citotóxicos y genotóxicos. Tóxico para organismos acuáticos como *asterias rubens*, *Psammechinus miliaris*, *Arenicola marina*, etc. Inducción de estrés antioxidante, daños en respiración aeróbica, desarrollo esquelético y función inmunológica.	Chopra y Kumar (2020)
Diclofenaco	Causa estrés oxidativo, potencial y puede ser disruptor endocrino en fauna acuática. Cardiotoxicidad, hepatotoxicidad, nefrotoxicidad, neurotoxicidad y genotoxicidad en mamíferos.	Shamsudin *et al.* (2022)
Ketoprofeno	Índice de estrés oxidativo, interfiere con actividad catalítica, disminuye niveles de antioxidantes en vertebrados acuáticos. Plasmólisis, deformación de cloroplastos, reducción de clorofila y carotenoides en microalgas.	Tyumina *et al.* (2023)
Sulfonamidas	Puede causar reacciones alérgicas, necrosis hepática y síndrome Stevens-Johnson.	Fakhri B. *et al.* (2024)
Tetraciclinas	Reacciones gastrointestinales y daño hepático.	Warner *et al.* (2022)
Aditivos industriales		
Alquilfenoles	Efectos reproductivos y en desarrollo.	Mejía-López *et al.* (2022)
1,4-dioxano	Cancerígeno, puede causar cambios en la reproducción y daño en el hígado y al sistema nervioso central.	Mejía-López *et al.* (2022)
Bisfenol A	Aumenta el riesgo de cáncer y neurotoxicidad.	Mejía-López *et al.* (2022)

Fuente: Elaboración de los autores.

y azufre (J. Singh *et al*., 2020). Para lograr su remoción efectiva, la estructura química y la polaridad son factores clave en la selección del método de separación. Sin embargo, este proceso se complica debido a la coexistencia de una extensa variedad de compuestos con características diversas en el mismo medio.

Los métodos más recurridos para la eliminación de contaminantes orgánicos incluyen la oxidación, ósmosis inversa, intercambio iónico, electrolisis y adsorción. El uso de materiales adsorbentes para la remoción de contaminantes orgánicos se distingue por ser una técnica que ofrece resultados eficientes, combinados con múltiples ventajas operativas, como lo son la facilidad de aplicación a un costo accesible (Ali *et al*., 2012; Suyal y Soni, 2021).

Recientemente, la nanotecnología ha emergido como una estrategia prometedora para optimizar los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, enfocada en ofrecer una remoción de contaminantes más eficiente y a menores costos. Los materiales de tamaño nanométrico presentan propiedades altamente favorables, como elevada área superficial, alta reactividad, resistencia mecánica, porosidad, buena dispersabilidad y selectividad específica frente a distintos contaminantes. Entre las propuestas más destacadas se encuentran el desarrollo de nanofotocatalizadores, membranas poliméricas incorporadas con nanopartículas para distintas técnicas de tratamiento como nanofiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa, así como nanoadsorbentes (Yaqoob *et al*., 2020).

De la amplia variedad de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales, este documento se centrará en tres grupos específicos: colorantes, fármacos y toxinas, donde se explorará el uso de nanocompuestos como una estrategia prometedora para su remoción.

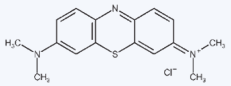
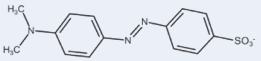
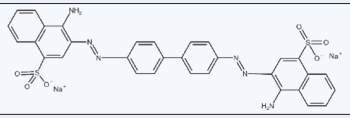
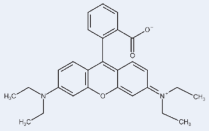
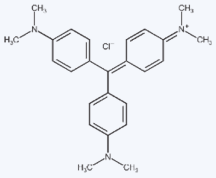
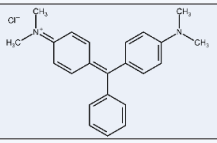
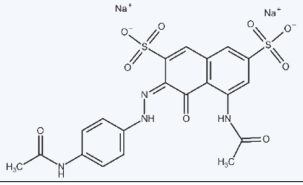
Colorantes

Los colorantes son compuestos químicos con la capacidad de impartir color a través de la unión física o química con un sustrato al que se aplican. Estos compuestos son capaces de absorber la luz en un rango de 400-700 nm, correspondiente al espectro visible, y, dependiendo del color presente, varía la estructura química del colorante (Alsukaibi, 2022). Cada colorante está compuesto por determinados grupos funcionales, denominados cromóforos, los cuales se encuentran unidos a un auxocromo y permiten el desarrollo de color (Dutta, Gupta *et al*., 2021).

En la tabla 2 se presentan algunos de los colorantes comerciales más utilizados y sus principales aplicaciones. Entre las industrias con mayor generación de residuos que contienen este tipo de contaminantes orgánicos, predominan la textil, la alimentaria, la de plásticos y la de productos de impresión.

Actualmente, existen alrededor de 100 mil colorantes disponibles en el mercado y se llegan a producir más de 700 mil toneladas métricas anuales a nivel mundial. Algunos de estos colorantes pueden ser tóxicos, carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos, haciendo urgente su remoción. Por ejemplo, se

Tabla 2. Lista de algunos colorantes comerciales.

Colorante	Estructura	Aplicación
Azul de metileno		Colorante de acetato, celulosa, algodón, rayón y poliéster. Ensayos analíticos, aplicaciones médicas.
Naranja de metilo		Ensayos analíticos, industria textil.
Rojo Congo		Elemento colorante de algodón.
Rodamina B		Industria textil, tinción, biomarcador, industria alimentaria y aplicaciones biotecnológicas.
Cristal violeta		Industria del papel, alimenticia, pintura, caucho y cosmética. Empleado en ensayos analíticos, aplicaciones médicas y agente antimicrobiano.
Verde malaquita		Elemento colorante en cuero, seda, industria del papel y agente antimicrobiano en acuicultura.
Violeta ácido 7		Industria textil, cosmética y alimenticia.

Fuente: Elaboración de los autores.

ha demostrado que el colorante Rojo #3 puede causar cáncer en animales. Además, se ha detectado bencidina, una sustancia cancerígena, en los colorantes Rojo #40 y Amarillo #5 y #6 (Kobylewski y Jacobson, 2012). Incluso algunos colorantes comestibles, como la tartrazina, eritrosina y carmoisina, se han asociado con el desarrollo de cáncer de hígado (Mishra, 2021).

La remoción de los colores en aguas residuales representa un desafío, pues, por naturaleza, son compuestos estables a la luz y al calor, resisten la oxidación y no son biodegradables. Como resultado, los tratamientos convencionales, tanto aeróbicos como anaeróbicos, no son efectivos para su eliminación (Hanafi y Sapawe, 2020).

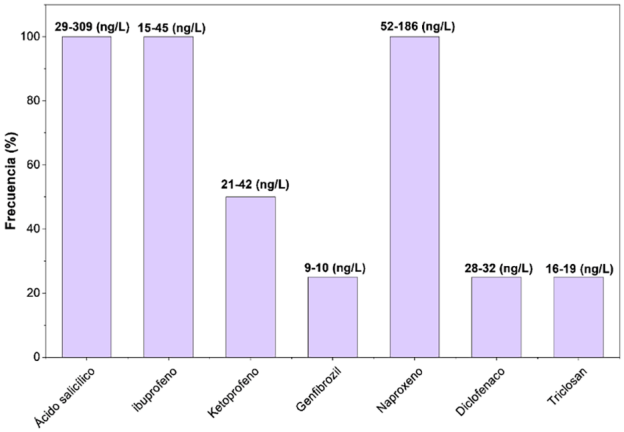
https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2026.36.69890 | **19(36), e69890, enero–junio 2026**

Medicamentos

Los antibióticos y productos farmacéuticos han sido ampliamente utilizados para mejorar la salud pública y la calidad de vida. Sin embargo, en la última década su consumo se ha incrementado de manera considerable; se estima que a nivel mundial se consumieron más de 14,272 toneladas entre 2016 y 2018 (Phoon *et al*., 2020). Este uso masivo ha traído consigo un aumento significativo en la presencia de residuos farmacéuticos en aguas residuales, representando un desafío emergente ambiental.

Las principales fuentes de contaminantes farmacéuticos en cuerpos de agua incluyen descargas hospitalarias, uso doméstico y la industria farmacéutica. Como resultado, estos compuestos se han detectado tanto en aguas superficiales como subterráneas, con el riesgo de alcanzar fuentes destinadas al consumo humano. En la ciudad de México, por ejemplo, el ácido salicílico, ibuprofeno y naproxeno figuran entre los fármacos con mayor frecuencia de detección en aguas superficiales provenientes de presas y ríos (Félix-Cañedo *et al*., 2013) (figura 2).

FIGURA 2. Frecuencia de detección de compuestos activos farmacéuticos en reservas de aguas superficiales de la Ciudad de México.



En la parte superior de la gráfica se describe el rango de concentración detectada en ng/L.
Fuente: Félix-Cañedo *et al*. (2013).

Más allá de su presencia, los efectos ambientales de estos contaminantes son motivo de creciente preocupación. La liberación de antibióticos en ecosistemas acuáticos puede llegar a alterar la estructura microbiana y modificar procesos biogeoquímicos como la transformación de nitrógeno (Schaider *et al*., 2017). De igual manera, se ha encontrado un aumento significativo de microrganismos presentes en el medio ambiente con resistencia a este tipo de compuestos, los cuales pueden transferirse mediante conjugación, transducción y transformación en

ambientes acuáticos. Esto convierte a ríos y arroyos no solo en reservorios de resistencia, sino también en vías potenciales de propagación hacia otros ecosistemas y, eventualmente, a la población humana (Jones *et al*., 2003).

Desde la perspectiva de la salud, la exposición prolongada a residuos farmacéuticos implica riesgos significativos debido a su potencial toxicidad. Dependiendo del compuesto, pueden provocar alteraciones en el sistema endocrino e inmunológico, además de afectar el funcionamiento de diversos órganos. A esto se suma la resistencia antimicrobiana derivada de su acumulación en el ambiente, considerada una de las amenazas más críticas para la salud pública a nivel global. Sin embargo, aún existe un vacío de información respecto a los efectos tóxicos de contaminantes comunes como fármacos anticancerígenos, reguladores lipídicos y betabloqueantes, así como el alcance de la contaminación por estos compuestos en países de bajo y mediano desarrollo (Fakhri-B. *et al*., 2024).

Ante este panorama, se han desarrollado estrategias para reducir la presencia de fármacos en aguas residuales, entre las cuales destacan procesos biológicos, adsorción, fotocatálisis, ozonación y tratamiento de humedales artificiales (Rienzie *et al*., 2019; Zaied *et al*., 2020). No obstante, la eficacia de estas tecnologías depende de factores como la naturaleza del contaminante, concentración y condiciones del medio, por lo que aún se requiere optimizar su aplicación a gran escala.

Toxinas

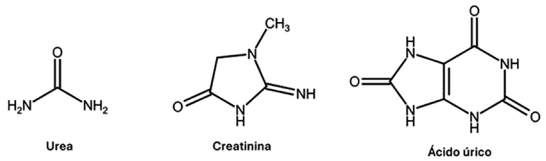
Las toxinas urémicas son una serie de sustancias obtenidas como subproductos de procesos biológicos (en su mayoría de metabolismo de proteínas) y que, frente a una falla renal, son acumuladas en el organismo, pudiendo ocasionar efectos adversos a la salud.

Hasta el día de hoy se han enlistado alrededor de 153 toxinas urémicas, pero la identificación de solutos desconocidos es una tarea continua (Falconi *et al*., 2021). Para facilitar su estudio, se clasifican en tres grupos de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas: moléculas pequeñas de pesos moleculares menores a 500 Dalton (Da) (ej. creatinina, urea, ácido úrico, etc.), moléculas de tamaño mediano con pesos moleculares entre 50 Da y 15,000 Da (ej. beta-2-microgloblina, leptina, etc.) y moléculas ligadas a proteínas de tamaños variables (ej. p-cresil sulfato, homocisteína, sulfato de indoxilo, etc.). La eliminación de este último tipo de sustancias puede llegar a ser perjudicial para el funcionamiento del cuerpo (Ofsthun *et al*., 2008; Rosner *et al*., 2021).

Generalmente, se hace énfasis en el estudio de las toxinas de bajo peso molecular, entre las cuales destacan la urea, la creatinina y el ácido úrico como biomarcadores fundamentales en la evaluación de pacientes con enfermedad renal crónica (Rodríguez de Cossío y Rodríguez Sánchez, 2011). En la figura 3 se ilustra la estructura química de estos solutos, en donde se distingue la presencia de grupos funcionales nitrogenados.

https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2026.36.69890 | **19(36), e69890, enero–junio 2026**

FIGURA 3. Estructura química de las principales toxinas urémicas empleadas como indicadores para pacientes con enfermedad renal crónica.



Fuente: Elaboración de los autores.

Los pacientes con enfermedad renal crónica en estado terminal son sometidos a un tratamiento de hemodiálisis en donde se lleva a cabo la separación, principalmente, de solutos de peso molecular menor a 10,000 Da por medio de una membrana artificial (Chmielewski, 2013).

La eficacia de remoción de la *membrana* de hemodiálisis depende en gran medida del tipo de material empleado. Las membranas actuales pueden ser a base de celulosa o de un material polimérico. Las membranas de celulosa fueron las primeras en utilizarse en este campo y sobresalen por tener una alta efectividad para la remoción de toxinas de bajos pesos moleculares. Sin embargo, debido a la alta concentración de grupos hidroxilos en su estructura química, el material resulta ser bioincompatible. Aun así, algunas de estas membranas siguen utilizándose en diversas partes del mundo debido a su bajo costo (Ismail *et al*., 2018; Ofsthun *et al*., 2008).

Los polímeros como el poliacrilonitrilo (PAN) y el polimetilacrilato (PMMA) fueron adaptados de la industria textil, mientras que polímeros como la polisulfona (PSU), el policarbonato (PC) y poliuretano (PU) se desarrollaron como materiales de ingeniería. A diferencia de las membranas fabricadas a partir de celulosa, estas pueden ofrecer mejores rendimientos de filtración debido a la presencia de poros de mayor tamaño y una estructura de pared más gruesa (Ofsthun *et al*., 2008).

Algunas de las estrategias en la innovación de nuevos materiales para hemodiálisis están dirigidas a realizar tratamientos superficiales físicos en materiales poliméricos, funcionalizar químicamente la superficie de la membrana o incorporar nanopartículas inorgánicas en una matriz polimérica (Radu y Voicu, 2022).

Es importante recalar que, para el tratamiento de hemodiálisis, se requiere un consumo significativo de agua pura (120 L de líquido dializador por sesión) (Shao *et al*., 2019). Este proceso puede contribuir a la presencia de toxinas urémicas en aguas residuales, provenientes de fuentes domésticas, industriales y agrícolas y, por lo tanto, generar un aumento en la concentración de nitrógeno en ecosistemas acuáticos, favoreciendo así procesos como la eutrofización (Weerakoon *et al*., 2023).

El desarrollo de métodos eficientes para la remoción de toxinas urémicas no solo tiene como objetivo mejorar la efectividad de tratamientos como la hemodiálisis, sino también procurar la recuperación de agua limpia en los ecosistemas.

En este panorama, la diversidad de contaminantes orgánicos, incluidos fármacos, toxinas y colorantes, limita los métodos convencionales de separación de contaminantes orgánicos. Esto ha llevado a un creciente interés por enfoques innovadores que permitan una remoción más selectiva y eficiente, como lo es el uso de nanocompuestos poliméricos como candidatos a materiales adsorbentes.

La nanotecnología

Hoy en día, la nanotecnología se ha consolidado como una de las principales tendencias en la ciencia de los materiales. Los nanomateriales se caracterizan por poseer una o más dimensiones (largo, ancho o grosor) en el rango nanométrico (1-100 nm).

A diferencia de las partículas convencionales, los nanomateriales presentan una proporción mucho mayor de moléculas y átomos en su superficie, lo cual origina que las fuerzas entre partículas se incrementen, como las fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas y atracciones magnéticas (A. Ávila-Orta *et al*., 2019). También, estos sistemas presentan propiedades únicas, entre las cuales se encuentran una extensa área superficial, potencial de autoensamble, alta reactividad, alta capacidad de adsorción, posibilidad de modificación a baja temperatura y un notable potencial catalítico (Tian *et al*., 2013).

El uso de estos materiales es particularmente atractivo debido a su capacidad de funcionalización con diversos grupos químicos, permitiendo incrementar su afinidad con sustancias específicas y facilitando su aplicación en la remoción de compuestos indeseados de sistemas complejos, tanto en contextos ambientales como biológicos (Tian *et al*., 2013).

Un buen material adsorbente debe cumplir con ciertas características clave: poseer una extensa área superficial, presencia de grupos funcionales (hidroxilos, grupos amino, etc.) adecuado tamaño de poro, accesibilidad y buenas propiedades mecánicas (Zhu *et al*., 2019).

Investigaciones recientes se centran en el uso de grafeno, nanopartículas magnéticas de óxido de hierro, zeolita, arcillas y nanotubos de carbono como materiales de tamaño nanométrico para el tratamiento de aguas residuales.

Nanocompuestos poliméricos

Los nanocompuestos se definen como sistemas multifase, en donde al menos una de ellas tiene dimensiones de tamaño nanométrico (10^{-9}m). La fase continua se conoce como “matriz” y las otras fases dispersas en la matriz son definidas como “refuerzo”. Los materiales compuestos han sido fabricados con una gran variedad de matrices, como metales, cerámicos, materiales carbonosos y polímeros, estos últimos distinguiéndose por su particular potencial tecnológico (Armstrong, 2015). Entre los tipos de nanomateriales que pueden incorporarse a una matriz polimérica destacan las nanopartículas, na-

https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2026.36.69890 | **19(36), e69890, enero–junio 2026**

nofibras y nanoarcillas, las cuales, a su vez, pueden ser de tipo metálico, no metálico o material polimérico (Omanović-Mikličanin *et al*., 2020). En estos sistemas se promueve la interacción entre interfaces, lo que conlleva a una mejora de las propiedades finales del material, incluyendo sus propiedades ópticas (la transmisión de luz depende del tamaño de partícula) y mecánicas (mejora de ductilidad manteniendo resistencia a la fractura) (Ávila-Orta *et al*., 2019). Para alcanzar tales atributos es clave lograr una buena sinergia entre sus constituyentes.

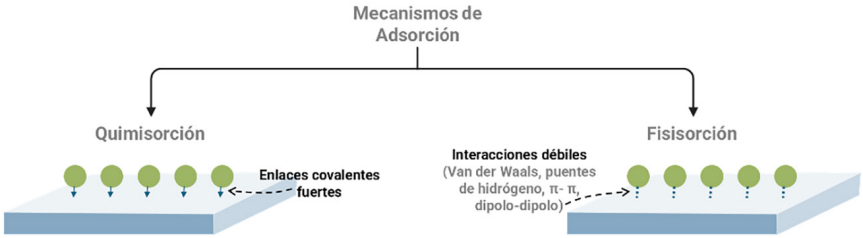
La versatilidad de estos materiales permite explorar su aplicación en distintas áreas, entre ellas, como materiales adsorbentes en procesos de separación. Una de sus principales ventajas radica en la capacidad de modificar tanto la matriz polimérica como las nanopartículas incorporadas, lo cual permite optimizar su desempeño y convertirlos en una alternativa altamente eficiente para procesos de remoción selectiva.

Nanocompuestos poliméricos adsorbentes

La adsorción se posiciona como uno de los métodos más prometedores para la remoción de contaminantes debido a su bajo costo, alta efectividad, no generación de subproductos y la posibilidad de reúso y recuperación de materiales. Cotidianamente, suele emplearse como método físico para remover concentraciones altas de colorantes en aguas residuales (Bal y Thakur, 2021).

La adsorción implica la adhesión de moléculas del adsorbato sobre la superficie del adsorbente mediante interacciones químicas (quimisorción) o físicas (fisisorción). En el caso de las interacciones químicas, se forman enlaces covalentes e iónicos entre los grupos funcionales del adsorbente (grupos fenólicos, carboxilos, carbonilos, lactonas, ésteres, etc.) y el adsorbato, o bien, interacciones electrostáticas entre ambos. Por otro lado, las interacciones físicas incluyen fuerzas débiles de Van der Waals, enlaces de hidrógeno, interacciones π–π, e interacciones hidrofóbicas entre adsorbato y adsorbente. En la figura 4 se muestra una representación gráfica de los mecanismos anteriormente descritos.

FIGURA 4. Posibles mecanismos de adsorción.

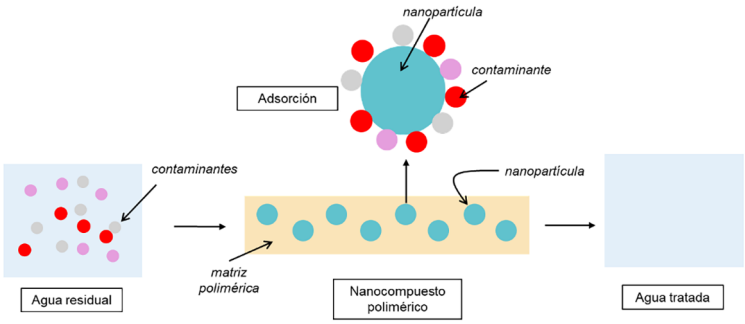


Fuente: Con base en Bilińska y Gmurek (2021); Hakami *et al*. (2020); Roy y Saha (2021); Samuel *et al*. (2023).

La creciente aparición de nuevos contaminantes, cuya remoción resulta cada vez más compleja, ha impulsado el desarrollo de materiales con propiedades de adsorción avanzadas para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales. En este contexto, los nanocompuestos poliméricos se destacan como una alternativa prometedora frente a las limitaciones de los adsorbentes convencionales, como lo es su baja selectividad. La figura 5 muestra un diagrama del proceso de tratamiento de aguas residuales mediante nanocompuestos poliméricos. La sinergia entre la matriz polimérica y las nanopartículas incorporadas otorga al material final propiedades mejoradas, entre ellas mayor permeabilidad, área superficial, estabilidad mecánica y térmica, mayor eficiencia de adsorción y, en algunos casos, actividad fotocatalítica (Akharame *et al*., 2018).

Además, una ventaja que presentan estos materiales es versatilidad en el diseño, al permitir la utilización de una amplia variedad de matrices poliméricas y nanopartículas (funcionalizadas o no funcionalizadas), facilitando la optimización de costos y el empleo de alternativas más sostenibles con el medio ambiente (Darwish *et al*., 2022).

FIGURA 5. Tratamiento de aguas residuales empleando nanocompuestos poliméricos.



Fuente: Elaboración de los autores.

En la tabla 3 se hace una recopilación de los trabajos más destacados en el desarrollo de nanocompuestos poliméricos adsorbentes para la remoción de compuestos orgánicos, así como sus respectivos resultados. En los datos obtenidos, se evidencia una amplia investigación enfocada en la remoción del colorante azul de metileno, en donde destaca el uso de nanopartículas de óxido de grafeno, con una eficiencia de eliminación cercana al 100%. La incorporación de nanopartículas metálicas como Fe_3O_4 y MnO_2 en matrices poliméricas también ha demostrado un desempeño sobresaliente en la eliminación de contaminantes orgánicos, alcanzando eficiencias de adsorción de hasta 98.0% para rojo Congo (Dutta, Srivastava *et al*., 2021) y 97.0% para rojo de metilo (Kamari y Shahbazi, 2020), así como en la remoción de compuestos farmacéuticos, incluyendo penicilina G (100%) (Ghamkhari *et al*., 2020), ami-

https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2026.36.69890 | **19(36), e69890, enero–junio 2026**

triptilina (98.3%) y otros agentes tricíclicos análogos (93.0-100%) (Cao *et al*., 2021). Asimismo, el polipirrol se ha posicionado como un polímero de creciente interés en la eliminación de contaminantes orgánicos debido a su carácter conductivo y no tóxico. Un ejemplo destacado es la adsorción del colorante verde malaquita, con una remoción reportada de 99.8% (Sarojini, Venkatesh Babu *et al*., 2022; Wang *et al*., 2021).

Otra propuesta atractiva es el uso de materiales de origen natural, como el quitosano, el cual, además de representar una alternativa ecológica, puede lograr altas eficiencias de adsorción para fármacos y toxinas. En el caso de la remoción de toxinas urémicas, el desarrollo de materiales se ha orientado hacia el uso de compuestos biocompatibles, lo cual permite su aplicación en procesos como la hemodiálisis. En este ámbito, destaca el uso de nanopartículas a base de carbono, particularmente el compuesto de Nylon 6 con negro de humo, que ha alcanzado eficiencias de remoción del 90.0% para urea y del 82.0% para ácido úrico. Asimismo, el ácido poliláctico con nanoarcillas modificadas sobresale por una eficiente capacidad de eliminación de creatinina.

Tabla 3. Adsorción de diferentes sistemas de nanocompuestos para la remoción de colorantes, medicamentos y toxinas.

Material a remover	Nanocompuesto	Parámetros operacionales	Remoción (%)	Capacidad de adsorción máx. (mg/g)	Referencia
Colorantes					
Azul de metileno	Nanoplaquetas de óxido de grafeno/ carboximetilcelulosa/ quitosano	pH 7.0, 80 min.	100.0	122.1	Kaur *et al.* (2019)
	Quitosano/ Poli(sebacato de glicerol)/ óxido de grafeno	pH 7.0, 300 min.	99.0	129.0	Rostamian *et al.* (2022)
	Carboximetilcelulosa/ Montmorillonita	pH 11.0, 60 min.	98.0		Peng *et al.* (2016)
	Polipirrol/ óxido de grafeno	pH 7.2	92.8	663.0	Anuma *et al.* (2021)
	goma ghatti-g-poli (ácido itacónico) / Fe_3O_4			410.2	Kulal y Badalamoole (2021)
	Copolímero de ácido acrílico y N-isopropil acrilamida/ nanotubos de carbono multipared			302.0	Hosseinzadeh *et al.* (2018)
Azul reactivo	Polipirrol/ Zeolita	pH 9.0	86.2		Senguttuvan *et al.* (2022)
Naranja de metilo	Polianilina/ $MnFe_2O_4$	pH 6.0, 15 min	90.0		P. Das *et al.* (2022)
	Polipirrol/ Bentonita	pH 8.0, 105 min		98.0	Z. Ahamad y Nasar (2024)

Continúa ▶

Tabla 3. Adsorción de diferentes sistemas de nanocompuestos para la remoción de colorantes, medicamentos y toxinas (continuación).

Material a remover	Nanocompuesto	Parámetros operacionales	Remoción (%)	Capacidad de adsorción máx. (mg/g)	Referencia
Colorantes					
Negro reactivo	Quitosano/ ZnO	pH 4.0	76	189.4	Çınar *et al.* (2017)
Rodamina B	Copolímero de ácido acrílico y N-isopropil acrilamida/ nanotubos de carbono multipared			231.0	Hosseinzadeh *et al.* (2018)
Rojo Congo	Polianilina/ MnO_2 y Fe_3O_4	pH 6.8	98	599.5	Dutta, Srivastava *et al.* (2021)
	Polipirrol/ óxido de grafeno	pH 5.0	92.2	68.1	Anuma *et al.* (2021)
	Polipirrol/ óxido de hierro	pH 3.0, 40 min.		500.0	Sarojini, *et al.* (2022)
Rojo de metilo	Polietersulfona/ Fe_3O_4		97.0		Kamari y Shahbazi (2020)
Rosa de Bengala	Quitosano/ TiO_2			79.4	Ahmed *et al.* (2018)
Verde de metilo	Polianilina/ MnO_2 y Fe_3O_4	pH 6.8	88.0	1142.2	Dutta, Srivastava *et al.* (2021)
Verde malaquita	Polipirrol/ Fe_3O_4		99.8	384.6	Sarojini, *et al.* (2022)
Violeta cristal	Copolímero de ácido acrílico y N-isopropil acrilamida/ nanotubos de carbono multipared			287.0	Hosseinzadeh *et al.* (2018)
	Polipirrol/ Bentonita	pH 5.0, 120 min.		78.7	Z. Ahamad y Nasar (2024)
Fármacos					
Analgésicos y antinflamatorios					
Diclofenaco	Poli (ácido metacrílico)/ Montmorillonita	40 min.	95.2	152.9	S. A. Khan *et al.* (2020)
Indometacina	Polipirrol/ $MnFe_2O_4$/ Bi_2MoO_6	120 min.	86.2		Wang *et al.* (2021)
Ketoprofeno	Polipirrol/ $MnFe_2O_4$/ Bi_2MoO_6	120 min.	87.0		Wang *et al.* (2021)
Antibióticos					
Amoxicilina	Poli (ácido metacrílico)/ Montmorillonita	40 min.	95.8	156.7	S. A. Khan *et al.* (2020)
Ciprofloxacino	Polietersulfona/ ZrP		99.7		Qalyoubi *et al.* (2022)
	Poliestireno/ Fe_3O_4	pH. 7.0, 37 min.	97.5		Mohammadi *et al.* 2020)
Levofloxacino	Quitosano/ $NTiO_2$-Bentonita	pH 4.0, 10 min.	92.5		Mahmoud *et al.* (2020)

Continúa ▶

https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2026.36.69890 | **19(36), e69890, enero–junio 2026**

Tabla 3. Adsorción de diferentes sistemas de nanocompuestos para la remoción de colorantes, medicamentos y toxinas (continuación).

Material a remover	Nanocompuesto	Parámetros operacionales	Remoción (%)	Capacidad de adsorción máx. (mg/g)	Referencia
Antibióticos					
Penicilina G	Poli (estireno-bloque-ácido acrílico)/ Fe_3O_4	pH 11.0, 50 min.	100.0		Ghamkhari *et al.* (2020)
Sulfametoxazol	Quitosano/ carboximetilcelulosa/ óxido de grafeno			312.3	Y. Liu *et al.* (2021)
Sulfapiridina	Quitosano/ carboximetilcelulosa/ óxido de grafeno			161.9	Y. Liu *et al.* (2021)
Tetraciclina	Poliacrilonitrilo/ Fe_3O_4	pH 6.0		257.1	Q. Liu *et al.* (2015)
	Polivinilpirrolidona/ óxido de grafeno/ $CuFe_2O_4$			193.8	Ahmed *et al.* (2023)
	Quitosano/ $MnFe_2O_4$			168.3	T. Ahamad *et al.* (2019)
Antihistamínicos					
Amitriptilina	Polímeros con impresión molecular magnética/ Fe_3O_4	pH 5.0-9.0, 25 min.	98.3	47.1	Cao *et al.* (2021)
Ceftriaxona	Quitosano/ $NTiO_2$-Bentonita	pH 5.0, 10 min	93.5		Mahmoud *et al.* (2020)
Ciproheptadina	Polímeros con impresión molecular magnética/ Fe_3O_4	pH 5.0-9.0, 25 min.	100.0	48.9	Cao *et al.* (2021)
8-cloroazatadina			98.9	46.9	
Desloratadina			100.0	47.3	
Fumarato de ketotifeno			99.0	42.1	
Toxinas					
Ácido úrico	Nylon 6/ Negro de humo	285 min.	82.0		Andrade-Guel *et al.* (2020)
	Ácido poliláctico/ nanoarcillas modificadas	300 min.	70.0	634.0	Andrade-Guel *et al.* (2021)
Creatinina	Ácido poliláctico/ nanoarcillas modificadas	300 min.	89.0	44.8	Andrade-Guel *et al.* (2021)
	Polietersulfona/ óxido de grafeno		78.3		Fahmi *et al.* (2018)
	Poliacrilonitrilo/ nanotubos de halloysita	180 min.	72.3		Ekhlasi *et al.* (2023)
	Poliéterimida/ óxido de grafeno	240 min.	68.0		Jacob Kaleekkas (2021)
	Polisulfona/ nanopartículas de quitosano		67.0		Zailani *et al.* (2021)

Continúa ▶

Tabla 3. Adsorción de diferentes sistemas de nanocompuestos para la remoción de colorantes, medicamentos y toxinas (continuación).

Material a remover	Nanocompuesto	Parámetros operacionales	Remoción (%)	Capacidad de adsorción máx. (mg/g)	Referencia
Toxinas					
p-cresol	Polietersulfona/ carbón activado	240 min.	80.0	108.7	Fu *et al.* (2020)
Urea	Nylon 6/negro de humo	300 min.	90.0	155.2	Andrade-Guel *et al.* (2022)
	Polisulfona/ nanopartículas de quitosano		85.0		Zailani *et al.* (2021)
	Poliéterimida/ óxido de grafeno	240 min	77.0		Jacob Kaleekkas (2021)

Fuente: Elaboración de los autores.

Riesgos del uso de nanomateriales

Los nanomateriales han demostrado un gran potencial en diversas aplicaciones, así como también representar una alternativa prometedora para innovar los tratamientos convencionales de purificación de agua. No obstante, la información disponible sobre los riesgos toxicológicos y ecológicos asociados con su exposición sigue siendo limitada. Una de las principales razones es la escasez de técnicas de caracterización capaces de evaluar con precisión sus mecanismos de transporte, degradación, acumulación y eliminación, al igual que su efecto en la salud humana. Esta falta de datos concretos también dificulta el establecimiento de parámetros regulatorios y la implementación de normas estandarizadas para su correcto manejo.

Hasta el momento, se ha reportado que ciertas nanopartículas pueden ejercer efectos tóxicos en el organismo, particularmente a nivel pulmonar, reproductivo, cardiaco, digestivo y cutáneo (Yaqoob *et al.*, 2020). La principal preocupación radica en que, debido a su tamaño nanométrico, estas partículas pueden persistir en el ambiente y en el cuerpo humano durante periodos más prolongados que compuestos de mayor tamaño. Esto genera una nueva forma de contaminación, denominada nanocontaminación, la cual podría convertirse en un factor ambiental preocupante a largo plazo (Gavrilescu *et al.*, 2018).

Conclusiones

La creciente escasez de agua limpia ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías para la eliminación de contaminantes de aguas residuales con una amplia variedad de características. La presencia de estas sustancias en el medio ambiente representa una amenaza tanto para la salud humana como para el ecosistema. En los últimos años, los nanocompuestos poliméricos adsor-

bentes han demostrado ser una alternativa eficaz y versátil para el tratamiento de aguas residuales. Dentro de las investigaciones para la remoción de compuestos orgánicos, se distinguen los materiales a base de nanoarcillas, nanopartículas metálicas y nanopartículas a base de carbono, los cuales han exhibido valores altos de remoción de sustancias como colorantes, fármacos y toxinas. Estos avances son prometedores para mejorar las técnicas de purificación actuales, permitiendo procesos más rápidos y selectivos. A pesar de los progresos en este campo, aún persisten desafíos, especialmente frente a los contaminantes emergentes, como microplásticos, nanopartículas, nuevos compuestos empleados en la industria cosmética, hormonas y aditivos industriales. Es imperativo continuar investigando para comprender mejor el impacto de estas sustancias y, de esta manera, desarrollar sistemas de remoción más eficientes y adaptables a una mayor variedad de impurezas.

Perspectiva a futuro

Los nanocompuestos poliméricos se posicionan como materiales con propiedades únicas abriendo paso al desarrollo de nuevas alternativas para procesos de tratamientos de aguas residuales. En este tema, existen todavía áreas de oportunidad por abordar en las que se incluye la optimización de costos y el uso de materiales con un menor impacto ambiental. Asimismo, es fundamental que las futuras investigaciones profundicen en las implicaciones toxicológicas de la carga de nanopartículas y su posible liberación al medio en el cual se exponen, con el fin de asegurar un producto seguro y eficiente. Se espera que en los próximos años aumente el estudio técnico de estos materiales para lograr un escalamiento industrial óptimo.

Contribución de autorías

A. E. Olvera-Ramos: diseño del artículo.
M. L. Andrade-Guel y C. J. Cabello-Alvarado: concepción y desarrollo metodológico.
G. Cadenas-Pliego, J. G. Rodríguez-Velázquez y S. G. Flores-Gallardo: análisis de datos.
C. A. Ávila-Orta: revisión y edición final.

Referencias

A. Ávila-Orta, C., González-Morones, P., Agüero- Valdez, D., González-Sánchez, A., G. Martínez-Colunga, J., M. Mata-Padilla, J. y J. Cruz-Delgado, V. (2019). Ultrasound- assisted melt extrusion of polymer nanocomposites. En *Nanocomposites – Recent evolutions*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.80216.

Ahamad, T., Ruksana, Chaudhary, A. A., Naushad, M. y Alshehri, S. M. (2019). Fabrication of MnFe2O4 nanoparticles embedded chitosan-diphenylureaformalde-

hyde resin for the removal of tetracycline from aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134: 180-188. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.204.

Ahamad, Z. y Nasar, A. (2024). Polypyrrole-decorated bentonite magnetic nanocomposite: a green approach for adsorption of anionic methyl orange and cationic crystal violet dyes from contaminated water. *Environmental Research*, 247: 118193. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118193.

Ahmed, M. A., Abdelbar, N. M. y Mohamed, A. A. (2018). Molecular imprinted chitosan-TiO2 nanocomposite for the selective removal of Rose Bengal from wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107: 1046-1053. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.082.

Ahmed, M. A., Ahmed, M. A. y Mohamed, A. A. (2023). Adsorptive removal of tetracycline antibiotic onto magnetic graphene oxide nanocomposite modified with polyvinylpyrroilidone. *Reactive and Functional Polymers*, 191: 105701. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105701.

Akharame, M. O., Fatoki, O. S., Opeolu, B. O., Olorunfemi, D. I. y Oputu, O. U. (2018). Polymeric nanocomposites (PNCs) for wastewater remediation: an overview. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(17): 1801-1827. https://doi.org/10.1080/03602559.2018.1434666.

Akpor, O., Otohinoyi, D. A., Olaolu, T. D. y Aderiye, J. B. I. (2014). Pollutants in wastewater effluents: impact and remediation processes. *International Journal of Environmental Research and Earth Science*, 3: 50-59. https://www.researchgate.net/publication/261834688.

Alharbi, O. M. L., Basheer, A. A., Khattab, R. A. y Ali, I. (2018). Health and environmental effects of persistent organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, 263, 442-453. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.029.

Ali, I., Asim, Mohd. y Khan, T. A. (2012). Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 113: 170-183. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.028.

Alsukaibi, A. K. D. (2022). Various approaches for the detoxification of toxic dyes in wastewater. *Processes*, 10(10): 1968. MDPI. https://doi.org/10.3390/pr10101968.

Amin, K. A., Abdel Hameid, H. y Abd Elsttar, A. H. (2010). Effect of food azo dyes tartrazine and carmoisine on biochemical parameters related to renal, hepatic function and oxidative stress biomarkers in young male rats. *Food and Chemical Toxicology*, 48(10): 2994-2999. https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.07.039.

Andrade-Guel, M., Ávila-Orta, C. A., Cadenas-Pliego, G., Cabello-Alvarado, C. J., Pérez-Alvarez, M., Reyes-Rodríguez, P., Inam, F., Cortés-Hernández, D. A. y Quiñones-Jurado, Z. V. (2020). Synthesis of nylon 6/modified carbon black nanocomposites for application in uric acid adsorption. *Materials*, 13(22): 5173. https://doi.org/10.3390/ma13225173.

Andrade-Guel, M., Cabello-Alvarado, C., Romero-Huitzil, R. L., Rodríguez-Fernández, O. S., Ávila-Orta, C. A., Cadenas-Pliego, G., Medellín-Banda, D. I., Gallardo-Vega, C. y Cepeda-Garza, J. (2021). Nanocomposite PLA/C20A nanoclay by ultrasound-assisted melt extrusion for adsorption of uremic toxins and

methylene blue dye. *Nanomaterials*, 11(10): 2477. https://doi.org/10.3390/nano11102477.

Andrade-Guel, M., Reyes-Rodríguez, P. Y., Cabello-Alvarado, C. J., Cadenas-Pliego, G. y Ávila-Orta, C. A. (2022). Influence of modified carbon black on nylon 6 nonwoven fabric and performance as adsorbent material. *Nanomaterials*, 12(23). https://doi.org/10.3390/nano12234247.

Anuma, S., Mishra, P. y Bhat, B. R. (2021). Polypyrrole functionalized cobalt oxide graphene (COPYGO) nanocomposite for the efficient removal of dyes and heavy metal pollutants from aqueous effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125929. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125929.

Armstrong, G. (2015). An introduction to polymer nanocomposites. *European Journal of Physics*, 36(6): 063001. https://doi.org/10.1088/0143-0807/36/6/063001.

Asses, N., Ayed, L., Hkiri, N. y Hamdi, M. (2018). Congo red decolorization and detoxification by *Aspergillus niger*: removal mechanisms and dye degradation pathway. *BioMed Research International*, 2018: 1-9. https://doi.org/10.1155/2018/3049686.

Bal, G. y Thakur, A. (2021). Distinct approaches of removal of dyes from wastewater: a review. *Materials Today: Proceedings*, 50: 1575-1579. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.119.

Bilińska, L. y Gmurek, M. (2021). Novel trends in AOPs for textile wastewater treatment. Enhanced dye by-products removal by catalytic and synergistic actions. *Water Resources and Industry*, 26: 100160. https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100160.

Cao, Y., Sheng, T., Yang, Z., Huang, D. y Sheng, L. (2021). Synthesis of molecular-imprinting polymer coated magnetic nanocomposites for selective capture and fast removal of environmental tricyclic analogs. *Chemical Engineering Journal*, 426: 128678. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128678.

Chmielewski, M., Heimbürger, O., P. Stenvinkel y B. Lindholm. (2013). *Uremic toxicity. Nutritional management of renal disease*. 3a ed. 49-77. Academic Press is an imprint of Elsevier.

Chopra, S. y Kumar, D. (2020). Ibuprofen as an emerging organic contaminant in environment, distribution and remediation. *Heliyon*, 6(6): e04087. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04087.

Çınar, S., Kaynar, Ü. H., Aydemir, T., Çam Kaynar, S. y Ayvacıklı, M. (2017). An efficient removal of RB5 from aqueous solution by adsorption onto nano-ZnO/chitosan composite beads. *International Journal of Biological Macromolecules*, 96: 459-465. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.12.021.

Conagua. (2018). *Estadísticas del agua en México 2018*. www.gob.mx/conagua

Crini, G. y Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1): 145-155. https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9.

Darwish, M. S. A., Mostafa, M. H. y Al-Harbi, L. M. (2022). Polymeric nanocomposites for environmental and industrial applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3): 1023. https://doi.org/10.3390/ijms23031023.

Das, P., Nisa, S., Debnath, A. y Saha, B. (2022). Enhanced adsorptive removal of toxic anionic dye by novel magnetic polymeric nanocomposite: optimization of process parameters. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 43(6): 880-895. https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1845958.

Das, R. (2018). *Carbon nanotubes for clean water*. R. Das (ed.). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95603-9.

Dutta, S., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Roy, D., Chatterjee, S., Chakraborty, A., Banerjee, D., Ganguly, A., Nanda, S. y Rajak, P. (2024). Contamination of textile dyes in aquatic environment: adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation. *Journal of Environmental Management*, 353: 120103. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120103.

Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S. K. y Gupta, A. K. (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: a critical review. *Materials Advances*, 2(14): 4497-4531. https://doi.org/10.1039/D1MA00354B.

Dutta, S., Srivastava, S. K., Gupta, B. y Gupta, A. K. (2021). Hollow polyaniline microsphere/MnO 2 /Fe 3 O 4 nanocomposites in adsorptive removal of toxic dyes from contaminated water. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(45): 54324-54338. https://doi.org/10.1021/acsami.1c15096.

Ekhlasi, A., Solouk, A., Haghbin Nazarpak, M., Pasbakhsh, P. y Shokrollahi, M. (2023). Electrospun polyacrylonitrile/halloysite nanofibrous membranes for creatinine removal from kidney failure patients. *Applied Clay Science*, 243: 107083. https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107083.

El-Shahawi, M. S., Hamza, A., Bashammakh, A. S. y Al-Saggaf, W. T. (2010). An overview on the accumulation, distribution, transformations, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants. *Talanta*, 80(5): 1587-1597. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.09.055.

Fahmi, M. Z., Wathoniyyah, M., Khasanah, M., Rahardjo, Y., Wafiroh, S. y Abdulloh, A. (2018). Incorporation of graphene oxide in polyethersulfone mixed matrix membranes to enhance hemodialysis membrane performance. *RSC Advances*, 8(2): 931-937. https://doi.org/10.1039/C7RA11247E.

Fakhri-B., M.-S., Ghassemi-Barghi, N., Moradnia-Mehdikhanmahaleh, M., Raeis-Zadeh, S.-M.-M., Mousavi, T., Rezaee, R., Daghighi, M. y Abdollahi, M. (2024). Pharmaceutical wastewater toxicity: an ignored threat to the public health. *Sustainable Environment*, 10(1). https://doi.org/10.1080/27658511.2024.2322821.

Falconi, C. A., Junho, C. V. da C., Fogaça-Ruiz, F., Vernier, I. C. S., da Cunha, R. S., Stinghen, A. E. M. y Carneiro-Ramos, M. S. (2021). Uremic toxins: an alarming danger concerning the cardiovascular system. En *Frontiers in Physiology*, vol. 12. Frontiers Media S. A. https://doi.org/10.3389/fphys.2021.686249.

Farhan Hanafi, M. y Sapawe, N. (2020). A review on the water problem associate with organic pollutants derived from phenol, methyl orange, and remazol brilliant blue dyes. *Materials Today: Proceedings*, 31: A141-A150. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.258.

Félix-Cañedo, T. E., Durán-Álvarez, J. C. y Jiménez-Cisneros, B. (2013). The occu-

rrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City's water sources. *Science of the Total Environment*, (454-455): 109-118. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.088.

Fernandes, F. H., Bustos-Obregon, E. y Salvadori, D. M. F. (2015). Disperse Red 1 (textile dye) induces cytotoxic and genotoxic effects in mouse germ cells. *Reproductive Toxicology*, 53: 75-81. https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2015.04.002.

Fu, C.-C., Hsiao, Y.-S., Ke, J.-W., Syu, W.-L., Liu, T.-Y., Liu, S.-H. y Juang, R.-S. (2020). Adsorptive removal of p-cresol and creatinine from simulated serum using porous polyethersulfone mixed-matrix membranes. *Separation and Purification Technology*, 245: 116884. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116884.

Gavrilescu, C.-M., Paraschiv, C., Horjinec, P., Sotropa, D.-M. y Barbu, R.-M. (2018). The advantages and disadvantages of nanotechnology. *Romanian Journal of Oral Rehabilitation*, 10(2): 153-159.

Ghamkhari, A., Mohamadi, L., Kazemzadeh, S., Zafar, M. N., Rahdar, A. y Khaksefidi, R. (2020). Synthesis and characterization of poly(styrene-block-acrylic acid) diblock copolymer modified magnetite nanocomposite for efficient removal of penicillin G. *Composites Part B: Engineering*, 182: 107643. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107643.

Gusain, R., Kumar, N. y Ray, S. S. (2020). Recent advances in carbon nanomaterial-based adsorbents for water purification. *Coordination Chemistry Reviews*, 405: 213111. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.213111.

Hakami, A. A. H., Wabaidur, S. M., Ali Khan, M., Abdullah Alothman, Z., Rafatullah, Mohd. y Siddiqui, M. R. (2020). Development of ultra-performance liquid chromatography – Mass spectrometry method for simultaneous determination of three cationic dyes in environmental samples. *Molecules*, 25(19): 4564. https://doi.org/10.3390/molecules25194564.

Hanafi, M. F. y Sapawe, N. (2020). A review on the current techniques and technologies of organic pollutants removal from water/wastewater. *Materials Today: Proceedings*, 31: A158-A165. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.265.

Hosseinzadeh, S., Hosseinzadeh, H., Pashaei, S. y Khodaparast, Z. (2018). Synthesis of magnetic functionalized MWCNT nanocomposite through surface RAFT co-polymerization of acrylic acid and N-isopropyl acrylamide for removal of cationic dyes from aqueous solutions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161: 34-44. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.063.

Ismail, A. F., Abidin, M. N. Z., Mansur, S., Zailani, M. Z., Said, N., Raharjo, Y., Rosid, S. M., Othman, M. H. D., Goh, P. S. y Hasbullah, H. (2018). Hemodialysis membrane for blood purification process. En *Membrane separation principles and applications: from material selection to mechanisms and industrial uses*, 283-314. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812815-2.00009-0.

Jacob Kaleekkal, N. (2021). Heparin immobilized graphene oxide in polyetherimide membranes for hemodialysis with enhanced hemocompatibility and removal of uremic toxins. *Journal of Membrane Science*, 623: 119068. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119068.

Jones, O. A. H., Voulvoulis, N. y Lester, J. N. (2003). Perspectives potential impact of

pharmaceuticals on environmental health. *Bulletin of the World Health Organization*, 81(10).

Kamari, S. y Shahbazi, A. (2020). Biocompatible Fe3O4@SiO2-NH2 nanocomposite as a green nanofiller embedded in PES – Nanofiltration membrane matrix for salts, heavy metal ion and dye removal: long-term operation and reusability tests. *Chemosphere*, 243: 125282. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125282.

Karia, G. L., Christian, R. A. y Jariwala, N. D. (2024). *Wastewater treatment: concepts and design approach*. 3a ed. Dehli: Asoke K, Ghosh, PHI Learning Private Limited, Rimjhim House.

Kaur, K., Jindal, R. y Meenu. (2019). Self-assembled GO incorporated CMC and chitosan-based nanocomposites in the removal of cationic dyes. *Carbohydrate Polymers*, 225: 115245. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115245.

Kesari, K. K., Soni, R., Jamal, Q. M. S., Tripathi, P., Lal, J. A., Jha, N. K., Siddiqui, M. H., Kumar, P., Tripathi, V. y Ruokolainen, J. (2021). Wastewater treatment and reuse: a review of its applications and health implications. *Water, Air & Soil Pollution*, 232(5): 208. https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8.

Khan, H. K., Rehman, M. Y. A. y Malik, R. N. (2020). Fate and toxicity of pharmaceuticals in water environment: an insight on their occurrence in South Asia. *Journal of Environmental Management*, 271: 111030. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111030.

Khan, S. A., Siddiqui, M. F. y Khan, T. A. (2020). Synthesis of poly(methacrylic acid)/montmorillonite hydrogel nanocomposite for efficient adsorption of amoxicillin and diclofenac from aqueous environment: kinetic, isotherm, reusability, and thermodynamic investigations. *ACS Omega*, 5(6): 2843-2855. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03617.

Kobylewski, S. y Jacobson, M. F. (2012). Toxicology of food dyes. I*nternational Journal of Occupational and Environmental Health*, 18(3): 220-246. https://doi.org/10.1179/1077352512Z.00000000034.

Kulal, P. y Badalamoole, V. (2021). Evaluation of gum ghatti-g-poly(itaconic acid) magnetite nanocomposite as an adsorbent material for water purification. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193: 2232-2242. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.055.

Liu, Q., Zhong, L.-B., Zhao, Q.-B., Frear, C. y Zheng, Y.-M. (2015). Synthesis of Fe 3 O 4 /polyacrylonitrile composite electrospun nanofiber mat for effective adsorption of tetracycline. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(27): 14573-14583. https://doi.org/10.1021/acsami.5b04598.

Liu, Y., Nie, P. y Yu, F. (2021). Enhanced adsorption of sulfonamides by a novel carboxymethyl cellulose and chitosan-based composite with sulfonated graphene oxide. *Bioresource Technology*, 320: 124373. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124373.

Mahmoud, M. E., El-Ghanam, A. M., Mohamed, R. H. A. y Saad, S. R. (2020). Enhanced adsorption of levofloxacin and ceftriaxone antibiotics from water by assembled composite of nanotitanium oxide/chitosan/nano-bentonite. *Materials Science and Engineering: C*, 108: 110199. https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110199.

Marcelo, L. R., de Gois, J. S., da Silva, A. A. y Cesar, D. V. (2021). Synthesis of iron-based magnetic nanocomposites and applications in adsorption processes for water treatment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2): 1229-1274. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01134-2.

Mejía-López, A. C., Ramírez-García, J. J. y Solache-Ríos, M. (2022). Removal of penicillin from wastewater: a short review. *Desalination and Water Treatment*, 272: 144-155. https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28815.

Mishra, D. (2021). Food colors and associated oxidative stress in chemical carcinogenesis. En *Handbook of oxidative stress in cancer: mechanistic aspects*, 1-14. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4501-6_182-1.

Mohammadi, L., Rahdar, A., Khaksefidi, R., Ghamkhari, A., Fytianos, G. y Kyzas, G. Z. (2020). Polystyrene magnetic nanocomposites as antibiotic adsorbents. *Polymers*, 12(6): 1313. https://doi.org/10.3390/polym12061313.

Mohan, H., Singh Rajput, S., Jadhav, E. B., Sankhala, M. S., Sonone, S. S., Jadhav, S. V. y Kumar, R. (2021). Ecotoxicity, occurrence, and removal of pharmaceuticals and illicit drugs from aquatic systems. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(5): 12530-12546. https://doi.org/10.33263/BRIAC115.1253012546.

Nageeb, M. (2013). Adsorption technique for the removal of organic pollutants from water and wastewater. En *Organic pollutants - Monitoring, risk and treatment*. InTech. https://doi.org/10.5772/54048.

Nava, L. F., Torres Bernardino, L. y Orozco, I. (2024). Crisis water management in Mexico. En *The Palgrave Encyclopedia of sustainable resources and ecosystem resilience*, 1-21. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67776-3_56-1.

Ofsthun, N. J., Karoor, S. y Suzuki, M. (2008). Hemodialysis membranes. En *Advanced membrane technology and applications*. https://doi.org/10.1002/9780470276280.ch19.

Omanović-Mikličanin, E., Badnjević, A., Kazlagić, A. y Hajlovac, M. (2020). Nanocomposites: a brief review. *Health and Technology*, 10(1): 51-59. https://doi.org/10.1007/s12553-019-00380-x.

Pawełczyk, A. (2013). Assessment of health risk associated with persistent organic pollutants in water. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(1): 497-508. https://doi.org/10.1007/s10661-012-2570-8.

Peng, N., Hu, D., Zeng, J., Li, Y., Liang, L. y Chang, C. (2016). Superabsorbent cellulose-clay nanocomposite hydrogels for highly efficient removal of dye in water. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(12): 7217-7224. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02178.

Phoon, B. L., Ong, C. C., Mohamed Saheed, M. S., Show, P.-L., Chang, J.-S., Ling, T. C., Lam, S. S. y Juan, J. C. (2020). Conventional and emerging technologies for removal of antibiotics from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 400: 122961. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122961.

Pooja, D., Kumar, P. y Singh, P. (2019). *Sensors in water pollutants monitoring: role of material advanced functional materials and sensors*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0.

Qalyoubi, L., Al-Othman, A. y Al-Asheh, S. (2022). Removal of ciprofloxacin antibiotic pollutants from wastewater using nano-composite adsorptive membranes. *Environmental Research*, 215: 114182. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114182.

Radu, E. R. y Voicu, S. I. (2022). Functionalized hemodialysis polysulfone membranes with improved hemocompatibility. *Polymers*, 14(6). MDPI. https://doi.org/10.3390/polym14061130.

Rienzie, R., Ramanayaka, S. y Adassooriya, N. M. (2019). Nanotechnology applications for the removal of environmental contaminants from pharmaceuticals and personal care products. En *Pharmaceuticals and personal care products: waste management and treatment technology emerging contaminants and micro pollutants*, 279-296. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816189-0.00012-3.

Rodríguez de Cossío, A. y Rodríguez Sánchez, R. (2011). Pruebas de laboratorio en atención primaria (II). *SEMERGEN - Medicina de Familia*, 37(3): 130-135. https://doi.org/10.1016/j.semerg.2010.12.003.

Roshanfekr Rad, L. y Anbia, M. (2021). Zeolite-based composites for the adsorption of toxic matters from water: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5): 106088. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106088.

Rosner, M. H., Reis, T., Husain-Syed, F., Vanholder, R., Hutchison, C., Stenvinkel, P., Blankestijn, P. J., Cozzolino, M., Juillard, L., Kashani, K., Kaushik, M., Kawanishi, H., Massy, Z., Sirich, T. L., Zuo, L. y Ronco, C. (2021). Classification of uremic toxins and their role in kidney failure. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, 16(12): 1918-1928. https://doi.org/10.2215/CJN.02660221.

Rostamian, M., Hosseini, H., Fakhri, V., Talouki, P. Y., Farahani, M., Gharehtzpeh, A. J., Goodarzi, V. y Su, C.-H. (2022). Introducing a bio sorbent for removal of methylene blue dye based on flexible poly(glycerol sebacate)/chitosan/graphene oxide ecofriendly nanocomposites. *Chemosphere*, 289: 133219. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133219.

Roy, M. y Saha, R. (2021). Dyes and their removal technologies from wastewater: a critical review. En *Intelligent environmental data monitoring for pollution management*, 127-160. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819671-7.00006-3.

Samuel, M. S., John. J, A., Ravikumar, M., Raizada, P., Wan Azelee, N. I., Selvarajan, E. y Selvasembian, R. (2023). Recent progress on the remediation of dyes in wastewater using cellulose-based adsorbents. *Industrial Crops and Products*, 206: 117590. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117590.

Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P. R. y Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595.

Sarojini, G., Babu, S. V. y Rajasimman, M. (2022). Adsorptive potential of iron oxide based nanocomposite for the sequestration of Congo red from aqueous solution. *Chemosphere*, 287: 132371. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132371

Sarojini, G., Venkatesh Babu, S., Rajamohan, N. y Rajasimman, M. (2022). Performance evaluation of polymer-marine biomass based bionanocomposite for the

adsorptive removal of malachite green from synthetic wastewater. *Environmental Research*, 204: 112132. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112132.

Schaider, L. A., Rodgers, K. M. y Rudel, R. A. (2017). Review of organic wastewater compound concentrations and removal in onsite wastewater treatment systems. *Environmental Science and Technology*, 51(13): 7304-7317. American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04778.

Senguttuvan, S., Janaki, V., Senthilkumar, P. y Kamala-Kannan, S. (2022). Polypyrrole/zeolite composite – A nanoadsorbent for reactive dyes removal from synthetic solution. *Chemosphere*, 287: 132164. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132164.

Shamsudin, M. S., Azha, S. F. y Ismail, S. (2022). A review of diclofenac occurrences, toxicology, and potential adsorption of clay-based materials with surfactant modifier. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3): 107541. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107541.

Shao, G., Zang, Y. y Hinds, B. J. (2019). TiO2 nanowires based system for urea photodecomposition and dialysate regeneration. *ACS Applied Nano Materials*, 2(10): 6116-6123. https://doi.org/10.1021/acsanm.9b00709.

Singh, A., Mittal, A. y Jangid, N. K. (2020). *Toxicology of dyes*, 50-69. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0311-9.ch003.

Singh, J., Yadav, P., Pal, A. K. y Mishra, V. (2020). *Water pollutants: origin and status*, 5-20. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0_2.

Soni, R., Chandra, D., Lourdes, S., Jaspal, M.-O. y Chauhan, S. (2023). *Current status of fresh water microbiology*. 1a ed. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5018-8.

Sripriya, L., Vijayalakshmi, M., Sumathy, R. y Sharmila, J. (2014). The impact of textile dyes on the biochemistry and histology of liver, a freshwater fish, tilapia, *Oreochromis mossambicus* (PETERS.). *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, 5: 271-298.

Sun, S., Jiang, T., Lin, Y., Song, J., Zheng, Y. y An, D. (2020). Characteristics of organic pollutants in source water and purification evaluations in drinking water treatment plants. *Science of the Total Environment*, 733: 139277. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139277.

Suyal, D. C. y Soni, R. (2021). Bioremediation of environmental pollutants: emerging trends and strategies. In *Bioremediation of Environmental Pollutants: Emerging Trends and Strategies*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86169-8.

Thakur, A., Kumar, A. y Singh, A. (2024). Adsorptive removal of heavy metals, dyes, and pharmaceuticals: carbon-based nanomaterials in focus. *Carbon*, 217. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118621.

Tian, J., Xu, J., Zhu, F., Lu, T., Su, C. y Ouyang, G. (2013). Application of nanomaterials in sample preparation. *Journal of Chromatography A*, 1300: 2-16. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2013.04.010.

Tyumina, E., Subbotina, M., Polygalov, M., Tyan, S. y Ivshina, I. (2023). Ketoprofen as an emerging contaminant: occurrence, ecotoxicity and (bio)removal. *Frontiers in Microbiology*, 14. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1200108.

Wang, Y., He, L., Dang, G., Li, H. y Li, X. (2021). Polypyrrole-functionalized magnetic Bi2MoO6 nanocomposites as a fast, efficient and reusable adsorbent for removal of ketoprofen and indomethacin from aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 592: 51-65. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.02.033.

Warner, A. J., Hathaway-Schrader, J. D., Lubker, R., Davies, C. y Novince, C. M. (2022). Tetracyclines and bone: unclear actions with potentially lasting effects. *Bone*, 159: 116377. https://doi.org/10.1016/j.bone.2022.116377.

Weerakoon, D., Bansal, B., Padhye, L. P., Rachmani, A., James Wright, L., Silyn Roberts, G. y Baroutian, S. (2023). A critical review on current urea removal technologies from water: an approach for pollution prevention and resource recovery. En *Separation and purification technology*, vol. 314. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123652.

Yadav, V. B., Gadi, R. y Kalra, S. (2019). Clay based nanocomposites for removal of heavy metals from water: a review. *Journal of Environmental Management*, 232: 803-817. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.120.

Yaqoob, A. A., Parveen, T., Umar, K. y Mohamad Ibrahim, M. N. (2020). Role of nanomaterials in the treatment of wastewater: a review. *Water*, 12(2): 495. https://doi.org/10.3390/w12020495.

Zaied, B. K., Rashid, M., Nasrullah, M., Zularisam, A. W., Pant, D. y Singh, L. (2020). A comprehensive review on contaminants removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process. *Science of the Total Environment*, 726. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138095.

Zailani, M. Z., Ismail, A. F., Goh, P. S., Abdul Kadir, S. H. S., Othman, M. H. D., Hasbullah, H., Abdullah, M. S., Ng, B. C., Kamal, F. y Mustafar, R. (2021). Immobilizing chitosan nanoparticles in polysulfone ultrafiltration hollow fibre membranes for improving uremic toxins removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6): 106878. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106878.

Zhu, Y., Fan, W., Zhou, T. y Li, X. (2019). Removal of chelated heavy metals from aqueous solution: a review of current methods and mechanisms. *Science of the Total Environment*, 678: 253-266. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.416.