

# Microplásticos y nanoplásticos: una amenaza para la salud humana y el medio ambiente<sup>◇</sup>

## Microplastics and nanoplastics: a threat to human health and the environment

V. Ruíz-Santoyo,<sup>\*</sup> J. Cruz-Mérida,<sup>\*\*</sup> S. García Carvajal<sup>\*</sup> y M. C. Arenas Arrocena<sup>\*</sup>

**ABSTRACT:** Microplastics and nanoplastics represent a threat to human health and the environment. These nano- and micrometer-scale fragments come from a variety of generation sources, all resulting from human activities and man-made products. The implications for human health and the environment are of concern and due to their chemical nature, they present significant challenges for detection and disposal because they can function as vectors for the transfer of chemical and biological contaminants. In terms of identification and removal methods, physical, chemical, and biotechnological approaches are currently being explored. However, in-depth research is still needed to improve the efficacy and feasibility of these techniques on the scale necessary to address the problem. The management of microplastics and nanoplastics represents a multifaceted challenge that requires coordinated action to mitigate their negative impacts. This review addresses the potential harm caused by microplastics and nanoplastics to human health and environmental balance, sources of generation, physicochemical methods for their identification, and disposal routes.

**KEYWORDS:** microplastics, nanoplastics, pollution, environment, health.

**RESUMEN:** Los microplásticos y nanoplásticos representan una amenaza para la salud humana y el medio ambiente. Estos fragmentos a escala nanométrica y micrométrica provienen de diversas fuentes de generación, todas ellas resultado de actividades humanas y productos fabricados por el hombre. Las repercusiones para la salud humana y el medio ambiente son preocupantes y debido a su naturaleza química, estos presentan desafíos significativos para su detección y eliminación debido a poder actuar como vectores para la transferencia de contaminantes químicos y biológicos. En cuanto a los métodos de identificación y eliminación, actualmente se exploran enfoques físicos, químicos y biotecnológicos. Sin embargo, aún se necesita investigar a profundidad, para mejorar la eficacia y la viabilidad de estas técnicas en la escala necesaria para abordar el problema. La gestión de los microplásticos y nanoplásticos representa un desafío multifacético, el cual requiere una acción coordinada para mitigar sus impactos negativos. En la presente revisión se aborda el daño potencial causado por los micro y nanoplásticos a la salud humana y al equilibrio medioambiental, las fuentes de generación, los métodos fisicoquímicos para su identificación y las posibles rutas de eliminación.

**PALABRAS CLAVE:** microplásticos, nanoplásticos, contaminación, medio ambiente, salud.

Recibido: 21 de mayo, 2024. Aceptado: 22 de agosto, 2024. Publicado: 20 de septiembre, 2024.

<sup>◇</sup> V. Ruíz-Santoyo agradece a DGAPA-UNAM por la beca postdoctoral proporcionada.

<sup>\*</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, ENES León, Laboratorio de Investigación Interdisciplinaria, Área de Nanoestructuras y Biomateriales.

<sup>\*\*</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Biológicas.

<sup>†</sup> Autor de correspondencia: ruizsvictor@gmail.com


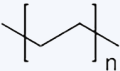
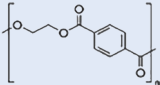
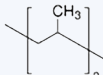



## Introducción

El uso excesivo de plásticos inició en la década de los años 50 del siglo XX, y desde entonces no ha dejado de experimentar un aumento constante. En el año 2021, la producción global de plástico superó los 380 millones de toneladas anuales, con una tasa de crecimiento anual cercana al 4% (Rosenboom, Langer y Traverso, 2022). Aunque el plástico ha aportado numerosos beneficios a la sociedad y ha transformado nuestra vida moderna, debido a la gestión deficiente y a la baja tasa de reciclaje, una considerable cantidad de residuos plásticos termina contaminando nuestro entorno ambiental (Bank *et al.*, 2021). Está claro que elementos como las bolsas y las redes de pesca pueden enredar o asfixiar a los organismos acuáticos. No obstante, el efecto de fragmentos más diminutos clasificados como microplásticos (MP) (< 5 mm) y nanoplásticos (NP) (< 1000 nm), aún no se comprende completamente (Mariano *et al.*, 2021). Los plásticos son polímeros sintéticos y semisintéticos de cadena larga y alto peso molecular pudiéndose moldear para formar objetos sólidos de distintos tamaños (Sohail *et al.*, 2023). Los MP y NP son el resultado de la degradación y fragmentación de artículos de plástico más grandes (Chabi *et al.*, 2024). En su fabricación es común utilizar monómeros (tabla 1) como el poliestireno (PES), polietileno (PE), poliamida (PA), polietileno de alta densidad (PEAD), tereftalato de polietileno (PET), poliuretano (PU), polipropileno (PPP), cloruro de polivinilo (PVC), metacrilato y propileno, los cuales son derivados de materiales petroquímicos que se mezclan con aditivos como plastificantes, antioxidantes, retardantes de llama, estabilizadores y colorantes para mejorar su rendimiento y prolongar su vida útil (Han *et al.*, 2024). Su micro y nanométrico tamaño les permite infiltrarse en los ecosistemas acuáticos, en el suelo e incluso en el aire que respiramos; lo anterior plantea serias preocupaciones para el equilibrio medioambiental y la salud humana (Rivers-Auty *et al.*, 2023). A medida que la investigación continúa revelando los impactos nocivos de estos materiales, se vuelve imperativo abordar el problema de los MP y NP con enfoques integrales, abarcando desde la reducción de su producción hasta la implementación de estrategias de limpieza y mitigación (Baxter, Lucas y Walker, 2022). En el presente trabajo se describe el daño potencial causado por los MP y NP a la salud del ser humano y al equilibrio medioambiental, las fuentes principales de su generación y los métodos fisicoquímicos y biológicos para su eliminación.

Para la elaboración del artículo, las bases de datos utilizadas para la búsqueda de artículos en inglés y español fueron Google Scholar, Scopus y Science Direct. La búsqueda se realizó en los meses de abril y mayo de 2024, y se recopilaron artículos con una antigüedad no mayor a 6 años, las palabras clave para realizar la búsqueda fueron: microplásticos, nanoplásticos, medio ambiente y salud humana. La cantidad de artículos encontrados fue de 583, y después de llevar a cabo una selección final eliminando artículos repetidos y sin cumplir con los criterios de idioma y antigüedad obtuvimos un total de 87.

**TABLA 1.** Polímeros y monómeros utilizados en la fabricación de plásticos.

Nombre	Fórmula lineal	Estructura
Poliestireno	$[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n$	
Polietileno	$\text{H}(\text{CH}_2\text{CH}_2)_n\text{H}$	
Tereftalato de polietileno	$(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$	
Polipropileno	$[\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)]_n$	
Cloruro de polivinilo	$(\text{CH}_2\text{CHCl})_n$	
Etileno	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$

Fuente: Elaboración de los autores.

## Fuentes de generación de MP y NP

Estos residuos de polímeros plásticos provienen de diversas fuentes como la descomposición de artículos plásticos más grandes, la abrasión de neumáticos, la liberación de fibras sintéticas durante el lavado de ropa y productos de cuidado personal, entre otros (Menon *et al.*, 2023). En este sentido, uno de los principales contribuyentes en la proliferación de estos contaminantes es la fragmentación de plásticos más grandes (Chen, M. *et al.*, 2023). La degradación mecánica de envases, bolsas, redes de pesca, textiles, envoltorios, empaques y otros productos de plástico resulta en la liberación de partículas más pequeñas, las cuales, eventualmente, pueden convertirse en MP y NP e invadir los ecosistemas (Nik Mut, Na y Jung, 2024). Este proceso es especialmente prevalente en entornos marinos, donde la acción de las olas, la radiación solar y la abrasión con superficies rocosas contribuyen a la fragmentación de desechos plásticos. Otra fuente significativa de MP es la abrasión de neumáticos en rotación (Bournaka *et al.*, 2023). Durante la conducción y frenado de vehículos, los neumáticos se desgastan y generan pequeñas partículas de caucho conteniendo compuestos plásticos, los cuales al ser liberados al ambiente pueden ingresar a los cuerpos de agua a través del escurrimiento superficial (Baensch-Baltruschat *et al.*, 2020). Este desgaste de neumáticos representa una preocupación creciente debido al aumento del parque automotor a nivel mundial. Recientemente, la

pandemia causada por el COVID-19 en el año 2020 no solo trajo consigo la pérdida de vidas humanas y el deterioro en la salud de las personas (Ruíz-Santoyo *et al.*, 2021), sino también el uso global de mascarillas fabricadas de poliéster y poliestireno, derivando en la generación de MP con un tamaño menor a 1mm, y variando en características como abundancia, composición, tamaño, forma y color (Zhao *et al.*, 2024). Por su parte, los procesos de fabricación involucrando plásticos como la producción de textiles sintéticos o la manufactura de productos como costales, cigarros, piezas plásticas de aparatos electrónicos, platos y vasos desechables, productos de sanidad, bolsas y botellas pueden generar residuos y subproductos convirtiéndose eventualmente en contaminantes plásticos (Wu *et al.*, 2022). Además, ciertos productos de cuidado personal como exfoliantes faciales y dentales, mascarillas y almohadillas faciales contienen partículas de plástico diseñadas para proporcionar una textura abrasiva y de limpieza que terminan siendo liberadas al lavado en aguas residuales y casualmente llegan a los cuerpos de agua (Prakash *et al.*, 2024). Por otra parte, la contaminación atmosférica aparece como una fuente emergente pero significativa de MP y NP. Estudios recientes han demostrado la presencia de partículas de plástico en el aire, especialmente en áreas urbanas y cercanas a fuentes de emisión como vertederos y plantas de reciclaje donde se tritura o corta el plástico para su posterior reciclaje (Kannankai y Devpriya, 2024). Otros estudios han comprobado la formación de NP a partir de la degradación de poliestireno proveniente de las tapas de vasos de café y los vasos para contener el café, dicho proceso se lleva a cabo cuando la temperatura y el tiempo tienen un efecto sinérgico desembocando en que cuanto más tiempo permanezca la bebida caliente en el vaso, mayor será la probabilidad para que los MP se desprendan y contaminen el contenido (Liu, L., Ma y Xing, 2024).

## Estrategias de detección

La creciente preocupación sobre la contaminación por MP y NP en el medio ambiente ha generado una demanda de técnicas de análisis precisas y sensibles para su identificación. Para abordar este desafío, se han utilizado una variedad de técnicas fisicoquímicas de análisis para detectar y cuantificar la presencia de plásticos en diferentes matrices ambientales (figura 1), (Kumar *et al.*, 2024). A continuación, se describen las técnicas de análisis que ofrecen mejor información sobre la presencia de MP y NP en el medio ambiente.

### **Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)**

La FTIR es una técnica analítica utilizada en la identificación de materiales poliméricos basada en la absorción de la radiación infrarroja por las moléculas. El análisis de FTIR se emplea para identificar las características espectrales únicas de los polímeros plásticos, para determinar la composición química de fragmentos plásticos desconocidos y, asimismo, para evaluar el grado de envejecimiento de las muestras recogidas del medio ambiente (Campanale *et*

*al.*, 2023). Además, permite la identificación de diferentes tipos de plásticos y la determinación de su abundancia en muestras ambientales.

### **Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS)**

La ICP-MS, por sus siglas en inglés, es una técnica empleada para la determinación cuantitativa de elementos presentes en una muestra a niveles de trazas. La ICP-MS puede ser acoplada con técnicas de separación para identificar y cuantificar la presencia de aditivos y contaminantes asociados con los MP y NP. Lo anterior proporciona información crucial sobre los posibles efectos tóxicos de los MP y NP en los organismos vivos y en los ecosistemas (Sakanupongkul *et al.*, 2024).

### **Microscopía electrónica de barrido (MEB)**

El método de MEB es una herramienta analítica utilizada para identificar diminutos fragmentos de plásticos y proporciona información detallada sobre la morfología, tamaño y composición química de los fragmentos. Algunos de los datos específicos que puede proporcionar la MEB incluyen conocer la morfología, el tamaño y la composición química elemental, lo cual puede facilitar características adicionales sobre su origen y proceso de degradación (Kievits *et al.*, 2024).

### **Microscopía electrónica de transmisión (MET)**

La MET es otra herramienta importante en la identificación y caracterización de MP y NP; esta permite la observación de la muestra a nivel molecular y atómico. Algunas maneras en las cuales la MET ayuda en la identificación de MP y NP es proporcionando imágenes con una resolución extremadamente alta, permitiendo la observación del tamaño y la forma de las partículas de MP y NP, lo cual es esencial para distinguir entre diferentes tipos de materiales, su tamaño y la forma nanométrica de las partículas plásticas para ser relacionadas con su origen (Fang, Luo y Naidu, 2023).

**FIGURA 1.** Técnicas fisicoquímicas analíticas para la detección e identificación de MP y NP.



Fuente: Elaboración de los autores.

## Afecciones a la salud y el medio ambiente

Los MP y NP son un problema ambiental debido al uso excesivo que el ser humano ha hecho de ellos durante décadas en su vida cotidiana. Sin embargo, los NP se consideran más dañinos por su tamaño y su facilidad de penetrabilidad de agentes y barreras biológicas, siendo un peligro su presencia en varios organismos por sus efectos toxicológicos (Rose *et al.*, 2023). La preocupación por su acumulación y efectos tóxicos en organismos y ecosistemas ha ido en aumento debido a su poder de penetrar las membranas celulares induciendo apoptosis celular, inflamación y trastorno estructural (Hua *et al.*, 2024). Desafortunadamente, debido a su desmedido uso y producción masiva, afectan considerablemente la salud humana y el medio ambiente, surgiendo como desafíos a remediar (figura 2).

FIGURA 2. Afecciones a la salud humana y al medio ambiente causadas por MP y NP.



Fuente: Elaboración de los autores.

## Impacto en la salud humana

Uno de los mayores riesgos para la salud humana es la ingestión inadvertida de los NP. Estas partículas pueden contaminar fuentes de alimentos como peces y mariscos, así como agua potable y el aire que respiramos, para eventualmente ingresar al cuerpo humano. A continuación, se describe su efecto en diferentes sistemas del cuerpo.

### Aparato gastrointestinal y urinario

Los NP pueden interactuar con los tejidos del tracto gastrointestinal, lo cual, potencialmente, lleva a la liberación de compuestos tóxicos produciendo inflamación. Su ingestión puede causar inflamación, daño celular, alteración de la microbiota intestinal y la deficiencia en la absorción de nutrientes (Forest y Pourchez, 2023). Estudios en modelos animales han mostrado poder con-

ducir la exposición prolongada a NP a lesiones intestinales, disbiosis, y toxicidad hepática (Jitrapat *et al.*, 2024). Además, los NP actúan como vectores de contaminantes químicos y bacterias pudiendo agravar los efectos adversos. En el sistema urinario, los NP que logran cruzar las barreras epiteliales podrían potencialmente filtrarse a través de los riñones y aparecer en la orina, ocasionando inflamación y disfunción renal (Liu, Y. *et al.*, 2024).

### **Aparato respiratorio**

La inhalación de NP también representa un riesgo para la salud humana porque reducen la absorción de nutrientes, provocan un cambio hormonal, estrés oxidativo, fibrosis pulmonar, disfunción inmunitaria, alteración del metabolismo bioquímico y energético, alteración de la proliferación celular y desarrollo anormal de órganos (Ali, N. *et al.*, 2024). Los estudios sugieren que los NP provenientes de la fibra de vidrio pueden penetrar más profundamente en los pulmones y la piel ocasionando un daño más profundo (Zhang, Q. *et al.*, 2024).

### **Sangre y sistema inmunitario**

Los MP pueden ingresar al torrente sanguíneo a través del tracto gastrointestinal o respiratorio. Una vez en la sangre, pueden ser transportados a varios órganos y tejidos, lo cual podría desencadenar respuestas inflamatorias, estrés oxidativo y daño celular (Arribas Arranz *et al.*, 2024). La exposición a MP puede alterar la función del sistema inmunitario, desencadenando respuestas inflamatorias crónicas y afectando la capacidad del cuerpo para combatir infecciones. En consecuencia, la absorción inadecuada de los nutrientes puede provocar una disminución de las reservas energéticas y una deficiencia en la asimilación de los alimentos, afectando el crecimiento y la reproducción (Russo *et al.*, 2023).

### **Cerebro y sistema nervioso**

Estudios preliminares sugieren que los NP pueden atravesar la barrera hematoencefálica, lo cual podría llevar a neuroinflamación, estrés oxidativo y daño neuronal. Además, puede producir especies reactivas de oxígeno altamente oxidantes pudiendo ocasionar inflamación y muerte celular (Zheng *et al.* 2024). Los NP tienen la capacidad de atravesar barreras biológicas, como la barrera hematoencefálica (BHE), la cual protege el cerebro de sustancias tóxicas. Esto provocaría efectos neurotóxicos como inflamación y alteración en los neurotransmisores (Yaping Zhang *et al.*, 2024). Aunque la investigación está en una etapa inicial, se especula que la exposición prolongada podría contribuir a trastornos neurológicos y cognitivos.

### **Embriones y barrera placentaria**

Los NP pueden atravesar la barrera placentaria, lo cual plantea preocupaciones sobre la exposición prenatal. Esta exposición podría afectar el desarrollo embrionario ocasionando alteración de la expresión génica y contribuyendo a malformaciones o alteraciones en el desarrollo neurológico y del sistema in-



munitario del feto (Winiarska, Jutel y Zemelka-Wiacek, 2024). Aunque la investigación sobre los efectos a largo plazo de la exposición a MP y NP en humanos aún está en sus etapas iniciales, se han planteado preocupaciones sobre su contribución a malestares crónicos como el cáncer, trastornos endocrinos y neurodegenerativos (Møller y Roursgaard, 2023).

## Impacto en el medio ambiente

Los MP y NP son una preocupación creciente debido a su prevalencia generalizada en los ecosistemas acuáticos y terrestres. A continuación, se describe su efecto negativo para la flora, fauna y ecosistemas marinos y terrestres (figura 3).

### Ecosistemas acuáticos

Los MP y NP están presentes en ríos, lagos y océanos, contribuyendo a la contaminación de los ecosistemas acuáticos. Estos plásticos pueden ser ingeridos por una gran variedad de organismos acuáticos, desde el zooplancton hasta peces y mamíferos marinos (Scotti *et al.*, 2023). La ingesta de MP por parte de organismos marinos puede llevar a la reducción de la biodiversidad debido a problemas de salud, mortalidad y a cambios en las cadenas alimentarias. Además, los MP actúan como vectores de contaminantes químicos los cuales se adhieren a su superficie y pueden ser transportados a través de largas distancias en los océanos (Materić, Holzinger y Niemann, 2022). Esto puede tener efectos negativos en la salud de los animales, incluidos los humanos que consumen peces y mariscos contaminados. En adición, la alteración de hábitats acuáticos, al acumularse en el fondo marino y en las playas, afectan la flora y la fauna local, modificando los procesos biogeoquímicos naturales (Arif *et al.*, 2024).

### Ecosistemas terrestres

Los MP se acumulan en el suelo a través del uso de fertilizantes y lodos de depuración, así como por la degradación de plásticos más grandes. Esto afecta la estructura del suelo, reduce su fertilidad y puede alterar la microbiota del suelo. Los animales tanto acuáticos como terrestres confunden los MP con alimentos (Khan *et al.*, 2024). Lo anterior puede llevar a bloqueos en el tracto digestivo, desnutrición y, en casos extremos, a la muerte. Los MP también pueden adsorber y transportar compuestos orgánicos persistentes aumentando su biodisponibilidad y facilitando su entrada en las cadenas alimentarias (Okoye *et al.*, 2022). Esta materia plástica también interfiere en los procesos de reproducción y desarrollo de los organismos, lo cual afecta la viabilidad de las poblaciones y la biodiversidad (Shao-long Yang *et al.*, 2023). La contaminación del suelo por plásticos también suele darse a través de *pellets* utilizados en la fabricación de molduras plásticas e indirectamente a través de la descomposición de productos plásticos más grandes en partículas más pequeñas. Finalmente, los MP y NP afectan los ecosistemas terrestres al alterar la composición y la estructura del suelo, así como las interacciones biológicas entre plantas, animales y microorganismos (Sarma *et al.*, 2024).



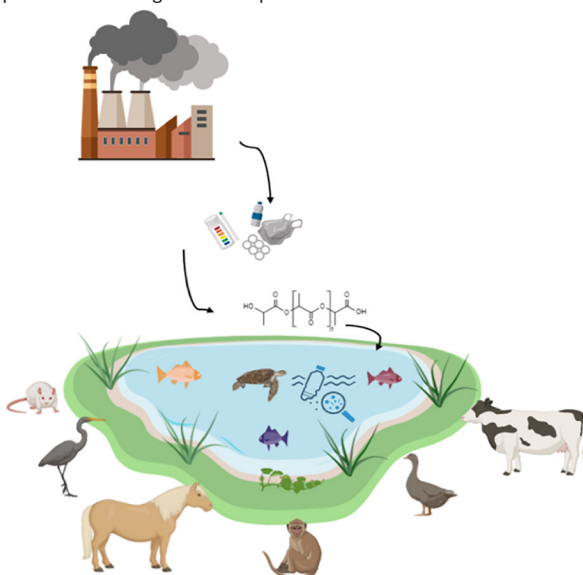
## Cadenas alimentarias

Los MP pueden alterar las relaciones depredador-presa, al poder reducir la disponibilidad de presas saludables y afectar a los depredadores que dependen de ellas. Además, la bioacumulación de MP en la cadena alimentaria puede reducir la disponibilidad de nutrientes esenciales para los organismos en niveles tróficos superiores (Cui *et al.*, 2024). Su bioacumulación en los tejidos de los organismos con afección a lo largo de la cadena alimentaria es debida a que los organismos más pequeños que ingieren MP pueden ser consumidos por organismos más grandes, lo cual lleva a una acumulación progresiva de plásticos en niveles tróficos superiores (Zeng *et al.*, 2023).

## Bioacumulación y biomagnificación

Los MP pueden acumularse en los organismos y pasar a lo largo de la cadena alimentaria, aumentando la concentración de contaminantes en depredadores superiores, incluidos los seres humanos. Las plantas pueden absorber NP a través de sus raíces, pudiendo interferir con su crecimiento, desarrollo y capacidad de absorber nutrientes, y afectar de este modo la productividad agrícola (Shuo Yang *et al.*, 2024). Además, los MP también alteran los ciclos de nutrientes y la dinámica del carbono en el suelo, afectando la función de los ecosistemas terrestres. Los NP interfieren en la fotosíntesis de las plantas al bloquear la absorción de luz o alterar las funciones celulares básicas y la presencia de MP en el suelo puede afectar la germinación de semillas y el desarrollo inicial de las plantas (Li, J. *et al.*, 2023).

FIGURA 3. Vía esquemática de la ingesta de MP por los animales.



Fuente: Elaboración de los autores.

## Métodos físicos de eliminación

Los MP y NP han proliferado en los entornos ambientales, y su persistencia y capacidad para acumular contaminantes tóxicos hacen ser una prioridad urgente, en la agenda de conservación y protección del medio ambiente, su erradicación. Por esta razón, diferentes métodos físicos de supresión son empleados para su eliminación en las plantas tratadoras de aguas residuales. A continuación, se describen los procesos físicos más ampliamente utilizados (figura 4).

- La filtración mecánica implica el uso de filtros físicos para atrapar partículas de plástico de diferentes tamaños. Los filtros pueden ser diseñados con poros de tamaño específico para capturar MP y NP mientras permiten el paso de agua. Este método es efectivo para eliminar una amplia gama de partículas de plástico, pero la eficiencia puede verse afectada por la obstrucción de los poros y la necesidad de limpieza regular (Chabi *et al.*, 2024).
- La centrifugación aprovecha la fuerza centrífuga para separar las partículas de plástico del agua. Funciona bien para partículas de mayor tamaño, pero puede ser menos eficiente para NP debido a su masa y densidad comparativamente más baja (Pfohl, Roth, y Wohlleben, 2024).
- La flotación es utilizada debido a la posibilidad de ser algunos MP y NP menos densos que el agua y por ende flotar en la superficie. La flotación asistida por aire o la adición de agentes químicos puede facilitar la separación de estos plásticos para su posterior eliminación (Chai *et al.*, 2023).
- Los métodos físicos de eliminación de MP y NP son esenciales para abordar la contaminación plástica. Sin embargo, enfrentan desafíos como la eficacia, pudiendo variar esta según el tamaño, forma y densidad de las partículas de plástico; algunos métodos pueden incluso ser costosos de implementar a gran escala, lo cual limita su viabilidad para aplicaciones prácticas.

La tabla 2 presenta algunos estudios recientes donde se han aplicado métodos físicos para la eliminación de MP del agua. Por ejemplo, Kharraz *et al.* (2024) determinaron la contaminación por MP en ecosistemas marinos y su eliminación mediante flotación con nano burbujas (FN). Los resultados indican que las muestras de agua de mar recogidas en tres lugares de la zona de estudio presentaban altos niveles de MP (82-137 partículas/m<sup>3</sup>), siendo las formas más comunes los fragmentos y las fibras. El tamaño predominante de los MP fue entre 0.1 y 0.5 mm, y el color observado dominante era el transparente. A través de la tecnología de FN, los investigadores encontraron una mejora significativa en la eficiencia de eliminación, particularmente para MP (< 50 µm) cuando se utiliza la FN en comparación con la flotación por aire disuelto convencional.

FIGURA 4. Métodos físicos, químicos y biológicos para la eliminación de MP y NP.



Fuente: Gao et al. (2022); Sacco et al. (2023); Anand et al. (2023).

TABLA 2. Estudios físicos para la eliminación de MP y NP.

Proceso	Contaminantes	Resultados	Referencia
Tecnología de FN en agua de mar.	Microplásticos (82-137 p/m <sup>3</sup> ), siendo los fragmentos y fibras lo más común.	Partículas de 50-10 µm fueron mejor removidas usando la FN comparadas con flotación por aire disuelto convencional.	Kharraz et al. (2024)
Biorreactor de membrana a escala piloto en un proceso convencional de lodos activados.	Fibras microplásticas y microplásticos como poliéster (PES), Poliamida (PA), PE, PPP en comparación con perlas PET y PES comercial.	Capacidad de retención de microplásticos en la PTAR del 98.3%, siendo un reto mayor la eliminación de microfibras (82%), que los microplásticos (18%). Con concentraciones de 0.4 MP/L.	Lares et al. (2018)
Coagulación a base de Fe y ultrafiltración en tratamiento de aguas potables.	PE	Eficiencia de eliminación baja de PE (por debajo del 15%) utilizando el proceso de coagulación tradicional. Sin embargo, al adicionar poliacrilamida (PAM), la eficiencia de eliminación aumento al 90.9% cuando se usó PAM aniónico en dosis altas.	Ma et al. (2019)
Coagulación de microplásticos de aguas residuales mediante hidróxido de magnesio magnético y PAM.	PE	Eliminación del 87.1% con hidróxido de magnesio con una relación 1:1, y 92% cuando se agregaron 4 mg/L de poliacrilamida no aniónica (PAM).	Yutao Zhang et al. (2021)
Coagulación a partir de productos químicos a base de hierro, aluminio y poliaminas.	Esferas de PES de dos tamaños diferentes: 1 y 6.3 µm.	Eficiencia de eliminación del 99.4%, con cloruro férrico y el policloruro de aluminio en comparación con la poliamina.	Rajala et al. (2020)
Coagulación con hidróxido de aluminio, floculación, filtración con arena de antracita y cloración.	Tereftalato de polietileno-poliéster, PPP, PU, PE, tereftalato de polibutileno, poliacrilonitrilo. Siendo las fibras la morfología más frecuente.	La eficiencia de eliminación por el método de coagulación-floculación-sedimentación fue del 70% en comparación del método convencional que eliminó un 52% de los microplásticos.	Cherniak et al. (2022)

Fuente: Elaboración de los autores.

## Métodos químicos de eliminación

Debido a su tamaño imperceptible al ojo humano y su ubicuidad en los sistemas acuáticos, la remoción efectiva de MP y NP se ha vuelto un desafío significativo (Yang, L. *et al.*, 2024). A continuación, se describen los métodos químicos (figura 4) utilizados para la remoción de estos contaminantes emergentes, destacando sus ventajas y limitaciones.

- La coagulación-floculación es un proceso químico utilizado comúnmente en el tratamiento de aguas residuales para remover partículas suspendidas. Consiste en la adición de coagulantes, como sales de hierro o aluminio, seguido de floculantes para promover la formación de agregados, los cuales pueden ser fácilmente removidos por sedimentación o filtración (Li, B. *et al.*, 2022). Este método ha demostrado ser efectivo en la remoción de MP y NP mediante la formación de flóculos atrapando las partículas plásticas. Sin embargo, su eficacia varía dependiendo de las características de los plásticos y de las condiciones del agua generando subproductos no deseados (Xue *et al.*, 2021).
- Por otra parte, la adsorción es un proceso mediante el cual las partículas o moléculas se adhieren a la superficie de un material sólido, conocido como adsorbente. En el contexto de la remoción de MP y NP, se han investigado diversos adsorbentes como carbón activado, zeolitas, polímeros modificados y nanomateriales (Liu, P. *et al.*, 2024). Estos materiales pueden ofrecer una alta capacidad de adsorción y selectividad hacia los plásticos, pero su eficacia puede verse afectada por factores como la concentración de plásticos en el agua y la presencia de compuestos orgánicos competidores (Xie *et al.*, 2023).
- Los procesos de oxidación avanzada (POA) implican la generación *in situ* de especies oxidantes altamente reactivas como los radicales hidroxilos y superóxido para degradar compuestos orgánicos recalcitrantes en el agua (Wang *et al.*, 2024). Este enfoque se ha explorado para la remoción de MP y NP mediante la ruptura de enlaces químicos en la estructura de los plásticos. Sin embargo, la aplicación de la oxidación avanzada para este fin aún enfrenta desafíos relacionados con la selectividad y la eficiencia de la degradación, así como la generación de subproductos tóxicos. La fotocatalisis, un POA, utiliza óxidos de elementos semiconductores activados por luz ultravioleta o visible para generar radicales libres que pueden oxidar contaminantes orgánicos en el agua. Aunque la fotocatalisis muestra potencial para la degradación de plásticos, su eficacia puede verse limitada por la disponibilidad de luz solar y la necesidad de mantener condiciones específicas de pH y temperatura (Castilla-Caballero *et al.*, 2022).

Los métodos químicos ofrecen diversas estrategias para la remoción de MP y NP en agua, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. No obstante, se requiere más investigación para mejorar la eficacia, selectividad y

sostenibilidad de estos enfoques (Du *et al.*, 2022). La tabla 3 presenta algunos estudios recientes donde se aplicaron procesos químicos para la remoción de plásticos en el agua. Por ejemplo, Y. Wan *et al.* (2024) prepararon una estrategia basada en peroximonosulfato (PMS) activado por un fotocatalizador de Co-CeO<sub>2</sub> para la eliminación de PET en agua. De acuerdo con sus resultados, encontraron que en presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1 mL) y PMS (5 mM) durante una reacción fotocatalítica de 6 h, la tasa de degradación del PET alcanzó un 91.6% de degradación de PET. Los autores concluyen que, de acuerdo con el análisis de las muestras de agua tratada, la resonancia paramagnética electrónica y los experimentos de extinción de radicales libres confirmaron que el SO<sub>4</sub><sup>-</sup> desempeñó el papel más significativo en la degradación del PET. En otro estudio, Y. Wan *et al.* (2023) reportaron una mejora de la degradación de PET mediante un fotocatalizador tipo CdS/CeO<sub>2</sub> activado con PMS. Los resultados mostraron que el CdS/CeO<sub>2</sub> al 10% demostró el mejor rendimiento en condiciones de iluminación, y la remoción de PET alcanzó el 93.92% tras añadir 3 mM de PMS, siendo los subproductos de la reacción de degradación gases como CO y CH<sub>4</sub>. En otro caso, Nabi *et al.* (2020) estudiaron la mineralización fotocatalítica completa de PS y PE sobre una película de nanopartículas de TiO<sub>2</sub>. Los resultados mostraron que el PS tuvo una degradación de 98.4 y para el PE la degradación fue completa después de 36 h. Los autores encontraron que el CO<sub>2</sub> y compuestos con grupos hidroxilo y carbonilo fueron los subproductos principales de la degradación de ambos plásticos.

**TABLA 3.** Estudios químicos para la eliminación de MP y NP.

Material aplicado	Plástico	Resultados (% remoción)	Referencia
CeO <sub>2</sub> dopado con Co y peroximonosulfato.	PET	91.61% de PET	Wan <i>et al.</i> (2024)
CdS/CeO <sub>2</sub>	PET	93.92% de PET	Wan <i>et al.</i> (2023)
Películas de nanopartículas de TiO <sub>2</sub>	PES y PE	98.4% de PES y 100% de PE	Nabi <i>et al.</i> (2020)
Diamante dopado con boro modificado con TiO <sub>2</sub>	PEAD	89.91% de polietileno	Quilumbaquin <i>et al.</i> (2024)
Nanotubos de titanía.	PE	50% bajo luz visible durante 45 días.	Ali, S. S. <i>et al.</i> (2016)
α-Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y BiFeO	PPP	2,3-butanodiona y 4-Hidroxi-4-metil-2-pentanona como productos finales.	Pino-Ramos, Bucio y Díaz (2021)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub>	PES y PE	92.08% para PES y 60.67% para PE.	Li, W. <i>et al.</i> (2023)
Tween 80 como tensioactivo en el sistema de microemulsión.	PVC, PET, PEAD y PPP	80% de los microplásticos.	Oliveira <i>et al.</i> (2023)
rGO@SiO <sub>2</sub> .Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	PET	31% de PET	El-Wakeil <i>et al.</i> (2024)
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> polimérico con laminarina.	PE	93.8%	Chen, J. <i>et al.</i> (2024)

Fuente: Elaboración de los autores.

## Métodos biológicos de eliminación

Los métodos biológicos y biotecnológicos emergen como prometedores enfoques para la eliminación de MP y NP del medio ambiente. Dentro de los principales métodos de eliminación biológica se encuentra la biodegradación por microorganismos como el uso de microalgas, hongos, bacterias e incluso algunos insectos (Veluru y Seeram, 2024).

- En la bioacumulación y biodegradación los organismos como bacterias, hongos y microalgas tienen la capacidad de degradar o acumular fragmentos de plásticos, transformándolos en productos menos dañinos o eliminándolos completamente. Además, las microalgas pueden absorber partículas de plástico debido a la generación de enzimas antioxidantes, las cuales excretan sustancias poliméricas capaces de interactuar con los MP y NP. Sin embargo, algunas microalgas sufren efectos tóxicos derivados de los MP inhibiendo la actividad de la misma alga (Jung *et al.*, 2023).
- La ingeniería genética también desempeña un papel crucial en el desarrollo de soluciones biotecnológicas para la eliminación de MP y NP. Mediante la modificación genética de microorganismos, es posible potenciar sus capacidades para degradar plásticos de manera más eficiente. Recientemente, investigadores han desarrollado cepas bacterianas modificadas genéticamente, las cuales producen enzimas especializadas en la degradación de polímeros plásticos en componentes más simples, facilitando su eliminación del medio ambiente (Urbanek, Kosiorowska y Mironczuk, 2021).
- En la biotecnología se han explorado métodos basados en nanomateriales para la captura y remoción de partículas plásticas. Nanopartículas funcionalizadas con grupos químicos específicos pueden atraer y atrapar MP en el agua, permitiendo su posterior recolección (Ali, H., Al-Afify y Goher 2018). El objetivo del uso de material biológico para la degradación de MP y NP en la biotecnología es aprovechar la generación de enzimas extracelulares cuando los microorganismos forman colonias sobre la superficie de los MP o NP, pudiendo permitir despolimerizarse las cadenas largas y así generar compuestos aprovechables para el medioambiente. Además, los procesos biotecnológicos son tecnologías con ventajas amigables para el medioambiente. No obstante, es de suma importancia generar las condiciones adecuadas de pH, temperatura, intensidad de luz y humedad, para favorecer el crecimiento de estos microorganismos (Nguyen *et al.*, 2023).

En la tabla 4 se presentan algunos estudios relacionados con estos procesos biológicos. Por ejemplo, C. Song *et al.* (2020) estudiaron la interacción entre PET, PE, PVC y PPP con microalgas *Chlorella sp.* L38 y *Phaeodactylum tri-cornutum* MASCC-0025, para conocer el grado de remoción de estos polímeros a través del uso de las microalgas. Los resultados mostraron que la adición de

MP tiene un efecto inhibitorio significativo sobre el crecimiento (21.2%) de las microalgas, especialmente para el alga marina *Phaeodactylum tricornutum* MASCC-0025. En contraste, *Chlorella* sp. L38 presentó una fuerte capacidad de adaptación a los MP. Estos resultados sugieren que las microalgas tienen potencial para ser utilizadas como una bio solución alternativa para el tratamiento de MP. En otro estudio, S. Straub *et al.* (2017) probaron la degradación de partículas de MP (polimetilmetacrilato (PMMA)) y un bio microplástico (Polihidroxibutirato (PHB)) a través del anfípodo de agua dulce *Gammarus fossarum*. Los resultados mostraron que las partículas plásticas provocan limitaciones digestivas en los anfípodos, yendo más allá de las de las partículas naturales no palatables. Esto sugiere la necesidad de realizar investigaciones más detalladas para comparar los efectos medioambientales de biodegradables y derivados del petróleo y ser contrastados con las cargas de partículas produciéndose de forma natural.

**TABLA 4.** Estudios biológicos para la degradación y/o descomposición de MP y NP.

Biológico aplicado	Contaminante	Resultados	Referencia
Microalgas <i>Chlorella</i> sp. L38 y <i>Phaeodactylum tricornutum</i> MASCC-0025.	PET, PE, PVC y PPP	25.8% de inhibición.	Song <i>et al.</i> (2020)
Invertebrado de agua dulce <i>Gammarus fossarum</i> .	Microplásticos biodegradables y derivados del petróleo.	Baja biodegradación.	Straub, Hirsch y Burkhardt-Holm (2017)
Microalgas <i>Caulerpa lentillifera</i> y <i>Gracilaria tenuistipitata</i> .	PA y PES	91.45% y 87.23%, respectivamente.	Li, Z. <i>et al.</i> (2023)
<i>Aspergillus flavus</i> de las de la polilla de la cera <i>Galleria mellonella</i> .	PE	Habilidad de degradación de PE a partir de dos enzimas de multicobre lacasa.	Zhang, J. <i>et al.</i> (2020)
Eliminación biológica de nitrógeno a partir de N <sub>2</sub> O con comunidades microbianas (por ejemplo, <i>Thauera</i> , <i>Rhodobacte</i> y <i>Nitrospira</i> ).	PET (0-500 µg/L)	Reducción del 60% en la acumulación de N <sub>2</sub> O y una reducción del 70% en la producción de N <sub>2</sub> O en las pruebas por lotes de desnitrificación y nitrificación, respectivamente.	He <i>et al.</i> (2022)

Fuente: Elaboración de los autores.

## Impactos socioeconómicos por contaminación de MP y NP

Los aspectos socioeconómicos de la contaminación por MP y NP son variados y complejos, y afectan a diferentes sectores de la sociedad y la economía. Por ejemplo, en el impacto en la salud pública, la exposición a MP y NP se asocia con problemas de salud potenciales, lo cual podría aumentar los costos médicos debido a enfermedades respiratorias, cardiovasculares, y problemas hor-



monales. Debido a lo anterior, las poblaciones vulnerables económicamente, especialmente en áreas subdesarrolladas, pueden tener menos acceso a atención médica adecuada, agravando los efectos de la contaminación. En cuanto al turismo, la acumulación de plásticos en playas y mares afecta la belleza natural de los destinos turísticos, disminuyendo su atractivo y reduciendo el flujo de turistas, derivando en una disminución significativa en los ingresos de las economías locales dependientes de esta actividad. La presencia de MP en pescados, mariscos y otros alimentos marinos puede afectar la seguridad alimentaria y reducir la demanda de estos productos. La contaminación de los recursos marinos puede reducir las capturas y afectar los ingresos de comunidades costeras que dependen de la pesca; aunado a lo costoso de los esfuerzos para mitigar la contaminación por MP y NP, a partir de lo cual muchos gobiernos y organizaciones deben gastar grandes sumas en limpieza y prevención. Una desigualdad socioeconómica marcada está en el impacto desproporcionado en países en desarrollo debido a que las regiones con menos recursos y capacidad para manejar desechos plásticos sufren desproporcionadamente los efectos de la contaminación, exacerbando la desigualdad. Las comunidades más pobres a menudo viven en áreas más contaminadas y tienen menos poder para influir en políticas ambientales que podrían mejorar su situación. Finalmente, las áreas de futuras investigaciones en cuanto a la contaminación por NP y MP se centran en comprender mejor su destino y transporte en el medio ambiente, incluyendo su persistencia en diferentes ecosistemas como aire, suelo, agua dulce y océanos. Además, es crucial investigar los impactos en la salud humana y animal, profundizando en los efectos a largo plazo, la toxicidad y la bioacumulación. La degradación y persistencia de estos materiales en el medio ambiente requiere mayor atención, analizando cómo y en qué condiciones se degradan, así como los productos de degradación generados. Otra área clave es el impacto de los NP y MP en la biodiversidad y los ecosistemas, especialmente en hábitats sensibles. El desarrollo de tecnologías de remoción y tratamientos más eficientes es fundamental para abordar la contaminación, al igual que la investigación en regulación y políticas públicas para guiar la creación de normativas y estrategias de mitigación. Además, es esencial investigar cómo se generan los NP a partir de la degradación de MP, identificando las principales fuentes y rutas de liberación. Por último, la percepción pública y el cambio de comportamiento son áreas importantes para diseñar estrategias de comunicación y educación efectivas que contribuyan a la mitigación de la contaminación.

## Conclusiones

Abordar el problema de la contaminación por MP y NP requiere un enfoque multidisciplinario integrador de medidas de prevención, mitigación y remediación en todos los niveles, desde la regulación gubernamental hasta cambios en el comportamiento individual y grupal. Desde la fragmentación de

plásticos más grandes como redes de pesca hasta el desgaste de neumáticos y las actividades industriales, pues múltiples sectores contribuyen a esta forma insidiosa de contaminación. Las técnicas fisicoquímicas para la detección y análisis de MP y NP han revolucionado la comprensión de la contaminación ambiental, permitiendo una caracterización precisa y detallada de estas partículas. Esta capacidad analítica avanzada no solo facilita el seguimiento de la contaminación y la evaluación de sus impactos ecológicos y en la salud, sino que también impulsa el desarrollo de estrategias más eficaces para mitigar la presencia de MP en el medio ambiente. El impacto en la salud humana es preocupante, pues estudios recientes sugieren que estas partículas plásticas pueden actuar como vectores de disruptores endocrinos pudiendo interferir tanto el sistema nervioso, como respiratorio, circulatorio, gastrointestinal, hormonal y reproductor, afectando fuertemente la calidad de vida de las personas. Por su parte, en el impacto hacia el medio ambiente, los MP y NP son responsables de bioacumulación y biomagnificación por ingesta de la fauna marina y terrestre. Además, la ingesta en cantidades considerables de MP puede llevar a la muerte de organismos debido a la inanición o la ruptura de órganos internos. Los aspectos socioeconómicos subrayan la necesidad de abordar la contaminación por MP y NP no solo como un problema ambiental, sino también como un desafío socioeconómico, el cual requiere soluciones integrales y coordinadas a nivel global. Es imperativo mejorar la gestión de residuos y reducir la producción y el consumo de plásticos de un solo uso. Además, se necesitan más investigaciones para comprender completamente los efectos de estos contaminantes en la salud humana y el medio ambiente, así como desarrollar estrategias efectivas de mitigación y remediación. En última instancia, abordar el problema requiere un enfoque integral que involucre a gobiernos, industrias y consumidores.

## Contribución de autorías

*Metodología:* V. Ruíz-Santoyo y J. Cruz-Mérida.

*Investigación:* V. Ruíz-Santoyo, J. Cruz-Mérida y S. García Carvajal.

*Redacción y preparación:* V. Ruíz-Santoyo, J. Cruz-Mérida y S. García Carvajal.

*Revisión y edición:* V. Ruíz-Santoyo y M. C. Arenas Arrocena.

*Supervisión:* M. C. Arenas Arrocena.

*Administración del proyecto:* V. Ruíz-Santoyo y M. C. Arenas Arrocena.

Todos los autores han leído y aprobado la versión del manuscrito.

## Referencias

Ali, Mohamed H. H., Afify D. Al-Afify y Mohamed E. Goher. (2018). Preparation and characterization of graphene - TiO<sub>2</sub> nanocomposite for enhanced photodegradation of rhodamine-B dye. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 44 (4): 263-70. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2018.11.009>.

- Ali, Nurshad, Jenny Katsouli, Emma L. Marczylo, Timothy W. Gant, Stephanie Wright y Jorge Bernardino de la Serna. (2024). The potential impacts of micro-and-nano plastics on various organ systems in humans. *EBioMedicine*, 99: 104901. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2023.104901>.
- Ali, Saba Sadaqat, Ishtiaq A. Qazi, Muhammad Arshad, Zahiruddin Khan, Thomas C. Voice y Ch. Tahir Mehmood. (2016). Photocatalytic degradation of low density polyethylene (LDPE) films using titania nanotubes. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 5: 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.001>.
- Anand, Uttpal, Satarupa Dey, Elza Bontempi, Serena Ducoli, A. Dick Vethaak, Abhijit Dey y Stefania Federici. (2023). Biotechnological methods to remove microplastics: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3): 1787-1810. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01552-4>.
- Arif, Yamshi, Anayat Rasool Mir, Piotr Zieliński, Shamsul Hayat y Andrzej Bajguz. (2024). Microplastics and nanoplastics: source, behavior, remediation, and multi-level environmental impact. *Journal of Environmental Management*, 356 (marzo). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120618>.
- Arribas Arranz, J., A. Villacorta, L. Rubio, A. García-Rodríguez, G. Sánchez, M. Llorca, M. Farre, J. F. Ferrer, R. Marcos y A. Hernández. (2024). Kinetics and toxicity of nanoplastics in *ex vivo* exposed human whole blood as a model to understand their impact on human health. *Science of the Total Environment*, 948 (mayo). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174725>.
- Baensch-Baltruschat, Beate, Birgit Kocher, Friederike Stock y Georg Reifferscheid. (2020). Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. *Science of the Total Environment*, 733: 137823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823>.
- Bank, Michael S., Yong Sik Ok, Peter W. Swarzenski, Carlos M. Duarte, Matthias C. Rillig, Albert A. Koelmans, Marc Metian, *et al.* (2021). Global plastic pollution observation system to aid policy. *Environmental Science and Technology*, 55(12): 7770-75. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00818>.
- Baxter, Lisa, Zoe Lucas y Tony R. Walker. (2022). Evaluating Canada's single-use plastic mitigation policies via brand audit and beach cleanup data to reduce plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 176: 113460. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113460>.
- Bournaka, Evanthia, Rodrigo Almeda, Marja Koski, Thomas Suurlan Page, Rebecca Elisa Andreani Mejlholm y Torkel Gissel Nielsen. (2023). Lethal effect of leachates from tyre wear particles on marine copepods. *Marine Environmental Research*, 191(abril):106163. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106163>.
- Campanale, Claudia, Ilaria Savino, Carmine Massarelli y Vito Felice Uricchio. (2023). Fourier transform infrared spectroscopy to assess the degree of alteration of artificially aged and environmentally weathered microplastics. *Polymers*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/polym15040911>.
- Castilla-Caballero, Deyler, Omer Sadak, Jolaine Martínez-Díaz, Valentina Martínez-

- Castro, José Colina-Márquez, Fiderman Machuca-Martínez, Aracely Hernández-Ramírez, Sofia Vázquez-Rodríguez y Sundaram Gunasekaran. (2022). Solid-state photocatalysis for plastics abatement: a review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 149 (junio). <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.106890>.
- Chabi, Kassim, Jianguo Li, Chengsong Ye, Claude Kiki, Xinyan Xiao, Xi Li, Lizheng Guo, Mahmoud Gad, Mingbao Feng y Xin Yu. (2024). Rapid sand filtration for < 10 Mm-sized microplastic removal in tap water treatment: efficiency and adsorption mechanisms. *Science of the Total Environment*, 912(noviembre 2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169074>.
- Chai, Jiaqi, Yafei Shi, Yan Wang, Xiong Yang, Kewu Pi y Andrea R. Gerson. (2023). Surfactant-assisted air flotation: a novel approach for the removal of microplastics from municipal solid waste incineration bottom ash. *Science of the Total Environment*, 884(marzo): 163841. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163841>.
- Chen, Jinlei, Shiyu Cai, Yanyun Wang y Huabin Huang. (2024). Enhanced removal of polyethylene microplastics from water through polymeric ferric sulfate with laminarin. *Process Safety and Environmental Protection*, 183(enero): 307-14. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.036>.
- Chen, Mingyu, Fang Chen, Zhen Li, Muhammad Rizwan Haider, Jiaying Wei, Guanglong Chen, Wenjing Wang y Jun Wang. (2023). Environmental risk assessment of microplastics and nanoplastics generated from biodegradable plastics in marine ecosystem. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 169(agosto): 117381. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117381>.
- Cherniak, Samuel L., Husein Almuhtaram, Michael J. McKie, Ludovic Hermabessiere, Chuqiao Yuan, Chelsea M. Rochman y Robert C. Andrews. (2022). Conventional and biological treatment for the removal of microplastics from drinking water. *Chemosphere*, 288(P2): 132587. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132587>.
- Cui, Shuang, Wei Yu, Xing Zhi Han, Tianhua Hu, Mengqi Yu, Yongliang Liang, Songtao Guo, Jinlian Ma, Liwei Teng y Zhensheng Liu. (2024). Factors influencing the distribution, risk, and transport of microplastics and heavy metals for wildlife and habitats in 'island' landscapes: from source to sink. *Journal of Hazardous Materials*, 476(junio). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134938>.
- Du, Hao, Qi Wang, Guanglong Chen y Jun wang. (2022). Photo/electro-catalytic degradation of micro- and nano-plastics by nanomaterials and corresponding degradation mechanism. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 157: 116815. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116815>.
- El-Wakeil, Ashgan S., Mohamed F. Ageba, Wesam M. Salama, Ahmed A. Tayel, Ibrahim M. El-Mehasseb y Nagi M. El-Shafai. (2024). Removal of microplastic contaminants by a porous hybrid nanocomposite and using the earthworms as a biomarker for the removal of contaminants. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 130: 533-46. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.10.008>.
- Fang, Cheng, Yunlong Luo y Ravi Naidu. (2023). Microplastics and nanoplastics analysis: options, imaging, advancements and challenges. *TrAC - Trends in Analytical*

- Chemistry*, 166: 117158. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117158>.
- Forest, Valérie y Jérémie Pourchez. (2023). Can the impact of micro- and nanoplastics on human health really be assessed using *in vitro* models? A review of methodological issues. *Environment International*, 178(mayo). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108115>.
- Gao, Wei, Yalin Zhang, Aoyun Mo, Jie Jiang, Yuqing Liang, Xiaomu Cao y Defu He. (2022). Removal of microplastics in water: technology progress and green strategies. *Green Analytical Chemistry*, 3(septiembre): 100042. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100042>.
- Han, Yang, Rongyu Wang, Dengzhi Wang y Yaning Luan. (2024). Enzymatic degradation of synthetic plastics by hydrolases/oxidoreductases. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 189(julio 2023): 105746. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105746>.
- He, Yanying, Yingrui Liu, Min Yan, Tianhang Zhao, Yiwen Liu, Tingting Zhu y Bing Jie Ni. (2022). Insights into N2O turnovers under polyethylene terephthalate microplastics stress in mainstream biological nitrogen removal process. *Water Research*, 224(agosto): 119037. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119037>.
- Hua, Jing, Martin Lundqvist, Shanti Naidu, Mikael T. Ekvall y Tommy Cedervall. (2024). Environmental risks of breakdown nanoplastics from synthetic football fields. *Environmental Pollution*, 347(febrero): 123652. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123652>.
- Jitrapat, Hattaya, Itchika Sivaipram, Ajcharaporn Piumsomboon, Supakij Suttiruengwong, Jiayi Xu, Tuan Linh Tran Vo y Daoji Li. (2024). Ingestion and adherence of microplastics by estuarine mysid shrimp. *Marine Environmental Research*, 197(diciembre 2023): 106455. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106455>.
- Jung, Jae Woo, Qikun Xing, Ji Sook Park, Youn Jung Kim, Charles Yarish y Jang Kyun Kim. (2023). Physiological effects of micro-plastics on the red algae, *Grateloupia turuturu* and *Chondrus Sp.* *Aquatic Toxicology*, 261(mayo): 106609. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106609>.
- Kannankai, Madhuraj Palat y Suja Purushothaman Devipriya. (2024). Atmospheric microplastic deposition in a coastal city of India: the influence of a landfill source on monsoon winds. *Science of the Total Environment*, 908(junio 2023): 168235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168235>.
- Khan, Aamir, Abdul Qadeer, Abdul Wajid, Qudrat Ullah, Sajid Ur Rahman, Kaleem Ullah, Sher Zaman Safi, *et al.* (2024). Microplastics in animal nutrition: occurrence, spread y hazard in animals. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17(enero): 101258. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101258>.
- Kharraz, Jehad A., Mingyi Jia, Muhammad Usman Farid, Noman Khalid Khanzada, Nidal Hilal, Shadi W. Hasan y Alicia Kyoungjin An. (2024). Determination of microplastic pollution in marine ecosystems and its effective removal using an advanced nanobubble flotation technique. *Journal of Water Process Engineering*, 57(agosto 2023): 104637. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104637>.
- Kievits, Arent J., B. H. Peter Duinkerken, Job Fermie, Ryan Lane, Ben N. G. Giepmans y Jacob P. Hoogenboom. (2024). Optical STEM detection for scanning

- electron microscopy. *Ultramicroscopy*, 256(julio 2023): 113877. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113877>.
- Kumar, Vinay, Mridul Umesh, Pritha Chakraborty, Preeti Sharma, Suma Sarojini, Thazeem Basheer, Komalpreet Kaur, Ritu Pasrija y Damia Barcelo. (2024). Origin, ecotoxicity, and analytical methods for microplastic detection in aquatic systems. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 170(octubre 2023): 117392. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117392>.
- Lares, Mirka, Mohamed Chaker Ncibi, Markus Sillanpää y Mika Sillanpää. (2018). Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology. *Water Research*, 133: 236-46. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.049>.
- Li, Bo, Jianhai Zhao, Wenqi Ge, Wenpu Li y Hongying Yuan. (2022). Coagulation-flocculation performance and floc properties for microplastics removal by magnesium hydroxide and PAM. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2): 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107263>.
- Li, Jue, Xiaowei Zheng, Xianglin Liu, Liangliang Zhang, Shun Zhang, Yanyao Li, Weizhen Zhang *et al.* (2023). Effect and mechanism of microplastics exposure against microalgae: photosynthesis and oxidative stress. *Science of the Total Environment*, 905(abril): 167017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167017>.
- Li, Wanhe, Shihong Liu, Kai Huang, Shibin Qin, Bin Liang y Jun Wang. (2023). Preparation of magnetic janus microparticles for the rapid removal of microplastics from water. *Science of the Total Environment*, 903(julio): 166627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166627>.
- Li, Zihao, Dejiang Fu, Shuguo Lü y Zhiyuan Liu. (2023). Interaction between macroalgae and microplastics: *Caulerpa lentillifera* and *Gracilaria tenuistipitata* as microplastic bio-elimination vectors. *Journal of Oceanology and Limnology*, 41(6): 2249-61. <https://doi.org/10.1007/s00343-023-2298-z>.
- Liu, Lili, Hongzhu Ma y Baoshan Xing. (2024). Aging and characterization of disposable polypropylene plastic cups based microplastics and its adsorption for methylene blue. *Chemosphere*, 349(julio 2023): 140976. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140976>.
- Liu, Peng, Linshan Wu, Yuyan Guo, Xiulin Huang y Zhiguang Guo. (2024). High crystalline LDHs with strong adsorption properties effectively remove oil and micro-nano plastics. *Journal of Cleaner Production*, 437(octubre 2023): 140628. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140628>.
- Liu, Yuan, Nian Nian Wu, Ru Xu, Zhi Hua Li, Xiang Rong Xu y Shan Liu. (2024). Phthalates released from microplastics can't be ignored: sources, fate, ecological risks, and human exposure risks. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 179(diciembre 2023). <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117870>.
- Ma, Baiwen, Wenjing Xue, Yanyan Ding, Chengzhi Hu, Huijuan Liu y Jiuhui Qu. (2019). Removal characteristics of microplastics by fe-based coagulants during drinking water treatment. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 78: 267-75. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.10.006>.
- Mariano, Stefania, Stefano Tacconi, Marco Fidaleo, Marco Rossi y Luciana Dini. (2021).



- Micro and nanoplastics identification: classic methods and innovative detection techniques. *Frontiers in Toxicology*, 3(febrero): 1-17. <https://doi.org/10.3389/ftox.2021.636640>.
- Materić, Dušan, Rupert Holzinger y Helge Niemann. (2022). Nanoplastics and ultrafine microplastic in the Dutch Wadden Sea - The hidden plastics debris? *Science of the Total Environment*, 846(marzo). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157371>.
- Menon, Vikas, Swati Sharma, Shreya Gupta, Anujit Ghosal, Ashok Kumar Nadda, Rajan Jose, Pooja Sharma, Sunil Kumar, Pardeep Singh y Pankaj Raizada. (2023). Prevalence and implications of microplastics in potable water system: an update. *Chemosphere*, 317(enero): 137848. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137848>.
- Møller, Peter y Martin Roursgaard. (2023). Exposure to nanoplastic particles and DNA damage in mammalian cells. *Mutation Research - Reviews in Mutation Research*, 792(mayo). <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2023.108468>.
- Nabi, Iqra, Aziz Ur Rahim Bacha, Kejian Li, Hanyun Cheng, Tao Wang, Yangyang Liu, Saira Ajmal, Yang Yang, Yiqing Feng y Liwu Zhang. (2020). Complete photocatalytic mineralization of microplastic on TiO<sub>2</sub> nanoparticle film. *IScience*, 23(7): 101326. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101326>.
- Nguyen, Lan Huong, Ba Son Nguyen, Duy Tien Le, Taghrid S. Alomara, Najla Al-Masoud, Suresh Ghotekar, Rajeshwari Oza, Pankaj Raizada, Pardeep Singh y Van Huy Nguyen. (2023). A concept for the biotechnological minimizing of emerging plastics, micro- and nano-plastics pollutants from the environment: a review. *Environmental Research*; 216(P1): 114342. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114342>.
- Nik Mut, Nik Nurhidayu, Joorim Na y Jinho Jung. (2024). A review on fate and ecotoxicity of biodegradable microplastics in aquatic system: are biodegradable plastics truly safe for the environment? *Environmental Pollution*, 344(noviembre 2023): 123399. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123399>.
- Okoye, Charles Obinwanne, Charles Izuma Addey, Olayinka Oderinde, Joseph Onyekwere Okoro, Jean Yves Uwamungu, Chukwudozie Kingsley Ikechukwu, Emmanuel Sunday Okeke, Onome Ejeromedoghene y Elijah Chibueze Odii. (2022). Toxic chemicals and persistent organic pollutants associated with micro-and nanoplastics pollution. *Chemical Engineering Journal Advances*, 11(marzo): 100310. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100310>.
- Oliveira, A. C., A. A. Dantas Neto, M. C. P. A. Moura y T. N. Castro Dantas. (2023). Use of surfactant-modified adsorbents in the removal of microplastics from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5): 110827. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110827>.
- Pfohl, Patrizia, Christian Roth y Wendel Wohlleben. (2024). The power of centrifugation: how to extract microplastics from soil with high recovery and matrix removal efficiency. *MethodsX*, 12(enero): 102598. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102598>.
- Pino-Ramos, Víctor H., Emilio Bucio y David Díaz. (2021). Fast photocatalytic polypropylene degradation by nanostructured bismuth catalysts. *Polymer Degradation and*



- Stability*, 190: 109648. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109648>.
- Prakash, Ved, Anuja Joseph, Suyash Srivastava, Hari Bhakta, Bishwatma Biswas, Sudha Goel y Sunil Kumar. (2024). From cosmetics to contamination : microplastics in personal care products as vectors for chromium in aquatic environments. *Waste Management Bulletin*, 2(3): 229-40. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.010>.
- Quilumbaquin, Wendy, G. Xavier Castillo-Cabrera, Luis J. Borrero-González, José R. Mora, Vladimir Valle, Alexis Debut, Luis D. Loo-Urgilés y Patricio J. Espinoza-Montero. (2024). Photoelectrocatalytic degradation of high-density polyethylene microplastics on TiO<sub>2</sub>-modified boron-doped diamond photoanode. *IScience*, 27(3). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109192>.
- Rajala, Katriina, Outi Grönfors, Mehrdad Hesampour y Anna Mikola. (2020). Removal of microplastics from secondary wastewater treatment plant effluent by coagulation/flocculation with iron, aluminum and polyamine-based chemicals. *Water Research*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116045>.
- Rivers-Auty, Jack, Alexander L. Bond, Megan L. Grant y Jennifer L. Lavers. (2023). The one-two punch of plastic exposure: macro- and micro-plastics induce multi-organ damage in seabirds. *Journal of Hazardous Materials*, 442(agosto 2022): 130117. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130117>.
- Rose, Pawan Kumar, Sangita Yadav, Navish Kataria y Kuan Shiong Khoo. (2023). Microplastics and nanoplastics in the terrestrial food chain: uptake, translocation, trophic transfer, ecotoxicology, and human health risk. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 167(agosto): 117249. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117249>.
- Rosenboom, Jan Georg, Robert Langer y Giovanni Traverso. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2): 117-37. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>.
- Ruiz-Santoyo, Víctor, Rafael Romero-Toledo, Beatriz A. Andrade-Espinoza y Virginia F. Marañón-Ruiz. (2021). Viewpoint: how the graphene could help to decrease SARS-CoV-2 spread? *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 65(3): 283-91. <https://doi.org/10.3311/PPch.17568>.
- Russo, Mariateresa, Mariateresa Oliva, M. Iftikhar Hussain y Adele Muscolo. (2023). The hidden impacts of micro/nanoplastics on soil, crop and human health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14(noviembre): 100870. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100870>.
- Sacco, Nicolás Alejandro, Fernanda Miranda Zoppas, Alejandra Devard, María del Pilar González Muñoz, Gonzalo García y Fernanda Albana Marchesini. (2023). Recent advances in microplastics removal from water with special attention given to photocatalytic degradation: review of scientific research. *Microplastics*, 2(3): 278-303. <https://doi.org/10.3390/microplastics2030023>.
- Sakanupongkul, Apinya, Kalyanee Sirisinha, Rattaporn Saenmuangchin y Atitaya Siripinyanond. (2024). Analysis of microplastic particles by using single particle inductively coupled plasma mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 199(octubre 2023): 110016. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110016>.
- Sarma, Hemen, Tanushree Basumatary, Balal Yousaf y Mahesh Narayan. (2024).

- Nanoplastics and lithium accumulation in soil-plant systems: assessing uptake, toxicological effects, and potential synergistic interactions. *Current Research in Biotechnology*, 7(agosto 2023): 100170. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2023.100170>.
- Scotti, Gianfranco, Michela D'Alessandro, Valentina Esposito, Pietro Vivona y Cristina Panti. (2023). Anthropogenic fibers and microplastics in the pelagic gooseneck barnacle *Lepas (Lepas) anatifera* in Capo Milazzo Marine Protected Area (Tyrrhenian Sea): A first characterization. *Ecological Indicators*, 152(abril): 110368. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110368>.
- Sohail, Muhammad, Zunaira Urooj, Sobia Noreen, Mirza Muhammad Faran Ashraf Baig, Xing Zhang y Bingzhi Li. (2023). Micro- and nanoplastics: contamination routes of food products and critical interpretation of detection strategies. *Science of the Total Environment*, 891(junio): 164596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164596>.
- Song, Chunfeng, Zhengzheng Liu, Chenlin Wang, Shuhong Li y Yutaka Kitamura. (2020). Different interaction performance between microplastics and microalgae: the bio-elimination potential of *Chlorella* Sp. L38 and *Phaeodactylum tricornutum* MASCC-0025. *Science of the Total Environment*, 723: 138146. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138146>.
- Straub, Sandrine, Philipp E. Hirsch y Patricia Burkhardt-Holm. (2017). Biodegradable and petroleum-based microplastics do not differ in their ingestion and excretion but in their biological effects in a freshwater invertebrate *Gammarus fossarum*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph14070774>.
- Urbanek, Aneta K., Katarzyna E. Kosiorowska y Aleksandra M. Mirończuk. (2021). Current knowledge on polyethylene terephthalate degradation by genetically modified microorganisms. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9(noviembre): 1-15. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.771133>.
- Veluru, Sridevi y Ramakrishna Seeram. (2024). Biotechnological approaches: degradation and valorization of waste plastic to promote the circular economy. *Circular Economy*, 3(1): 100077. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2024.100077>.
- Wan, Yang, Huijie Wang, Jiejing Liu, Jinze Li, Weiqiang Zhou, Jisheng Zhang, Xin Liu, Xianghai Song, Huiqin Wang y Pengwei Huo. (2024). Removal of polyethylene terephthalate plastics waste via Co-CeO<sub>2</sub> photocatalyst-activated peroxymonosulfate strategy. *Chemical Engineering Journal*, 479(septiembre 2023): 147781. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147781>.
- Wan, Yang, Huijie Wang, Jiejing Liu, Xin Liu, Xianghai Song, Weiqiang Zhou, Jisheng Zhang y Pengwei Huo. (2023). Enhanced degradation of polyethylene terephthalate plastics by CdS/CeO<sub>2</sub> heterojunction photocatalyst activated peroxymonosulfate. *Journal of Hazardous Materials*, 452(marzo): 131375. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131375>.
- Wang, Xiaojie, Yunrong Dai, Yang Li y Lifeng Yin. (2024). Application of advanced oxidation processes for the removal of micro/nanoplastics from water: a review. *Chemosphere*, 346(septiembre 2023): 140636. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140636>.

- chemosphere.2023.140636.
- Winiarska, Ewa, Marek Jutel y Magdalena Zemelka-Wiacek. (2024). The potential impact of nano- and microplastics on human health: understanding human health risks. *Environmental Research*, 251(P2): 118535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>.
- Wu, Haishang, Hamid Mehrabi, Panagiotis Karagiannidis y Nida Naveed. (2022). Additive manufacturing of recycled plastics: strategies towards a more sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 335(diciembre 2021): 130236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130236>.
- Xie, Huimin, Weiliang Pan, Yi Zhou, Peng Li, Guoyuan Zou, Lianfeng Du y Xuan Guo. (2023). Micro- and nano-plastics play different roles in oxytetracycline adsorption on natural zeolite: additional adsorbent and competitive adsorbate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2): 109648. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109648>.
- Xue, Jinkai, Sigrid Peldszus, Michele I. Van Dyke y Peter M. Huck. (2021). Removal of polystyrene microplastic spheres by alum-based coagulation-flocculation-sedimentation (CFS) treatment of surface waters. *Chemical Engineering Journal*, 422(abril): 130023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130023>.
- Yang, Ling, Yulan Zhang, Shichang Kang, Zhaoqing Wang y Chenxi Wu. (2024). Microplastics in soil: a review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of the Total Environment*, 780(marzo):123857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146546>.
- Yang, Shaolong, Mengzhen Li, Richard Yuen Chong Kong, Lei Li, Rong Li, Jian Chen y Keng Po Lai. (2023). Reproductive toxicity of micro- and nanoplastics. *Environment International*, 177(1): 108002. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108002>.
- Yang, Shuo, Ying Zhang, Yi Chen, Yuping Zeng, Xinyao Yan, Xiao Tang y Shengyan Pu. (2024). Studies on the transfer effect of aged polyethylene microplastics in soil-plant system. *Chemosphere*, 349(diciembre 2023): 141001. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141001>.
- Zeng, Fanshuang, Luo Wang, Hao Zhen, Chao Guo, Anzheng Liu, Xinglong Xia, Honglin Pei, Changkun Dong y Jun Ding. (2023). Nanoplastics affect the growth of sea urchins (*Strongylocentrotus intermedius*) and damage gut health. *Science of the Total Environment*, 869(enero): 161576. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161576>.
- Zhang, Junqing, Danling Gao, Quanhao Li, Yixuan Zhao, Li Li, Hanfeng Lin, Qirui Bi y Yucheng Zhao. (2020). Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth galleria mellonella. *Science of the Total Environment*, 704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135931>.
- Zhang, Qirong, Xin Zhou, Yu Sun, Qingfang Deng, Qing Wu, Zhirui Wen y Huaguo Chen. (2024). Harmful effects of microplastics on respiratory system of aquatic animals: a systematic review and meta-analysis. *Aquatic Toxicology*, 273(marzo): 107003. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.107003>.

- Zhang, Yaping, Lei Tian, Jiang Chen, Xuan Liu, Kang Li, Huanliang Liu, Wenqing Lai, Yue Shi, Bencheng Lin y Zhuge Xi. (2024). Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278(abril): 116393. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>.
- Zhang, Yutao, Jianhai Zhao, Zhaoyang Liu, Sufeng Tian, Jingfang Lu, Rong Mu y Hongying Yuan. (2021). Coagulation removal of microplastics from wastewater by magnetic magnesium hydroxide and PAM. *Journal of Water Process Engineering*, 43(julio): 102250. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102250>.
- Zhao, Xu, Panpan Gao, Ziqing Zhao, Yinghong Wu, Hongwen Sun y Chunguang Liu. (2024). Science of the total environment microplastics release from face masks : characteristics , influential factors, and potential risks. *Science of the Total Environment*, 921(diciembre 2023): 171090. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171090>.
- Zheng, Yanxu, Shengchao Xu, Jingyu Liu y Zhixiong Liu. (2024). The effects of micro- and nanoplastics on the central nervous system: a new threat to humanity? *Toxicology*, 504(abril):153799. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2024.153799>.