



Microplásticos, amenaza invisible en el océano: una revisión desde la química y la biología*

María Camila Castrillón^a ■ Luis David Gómez Méndez^b ■ Sol M. Mejía^c

Resumen: Se hizo una revisión bibliográfica con el objetivo de describir las características y efectos que causan los microplásticos (MP) en la biota marina y el ser humano. Se tuvieron en cuenta artículos científicos publicados sobre el tema entre los años 2010 a 2023. Una vez recopilados, se procedió a eliminar duplicados y a filtrar los artículos restantes con base en criterios de inclusión y exclusión. La revisión de los artículos permitió concluir que, en la caracterización de estos materiales, se evidencia la falta de métodos estandarizados, sin embargo, predominan las técnicas ópticas, espectroscópicas y de pirólisis. Entre las consecuencias para la salud de los ecosistemas y la humana se encuentran, la reducción en la energía metabólica, los cambios morfológicos, el estrés oxidativo, la reducción de la población, los problemas intestinales, etc. Se destacan las diversas opciones que ofrece la industria para aliviar el problema, como las siguientes: filtración, biodegradación, productos sustitutos, etc., pero se hace énfasis en que la principal medida debe ser la reducción en la producción.

Palabras clave: microplásticos; océano; química; biología; revisión

Recibido: 07/12/2023

Aceptado: 24/01/2024

Disponible en línea: 30/05/2024

Cómo citar: Castrillón Gutiérrez, M. C., Gómez Méndez, L. D., & Mejía Chica, S. M. (2024). Microplásticos, amenaza invisible en el océano: una revisión desde la química y la biología. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 18(2), 41-61. <https://doi.org/10.18359/rfcb.7046>

* Artículo de revisión

a Bióloga, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: mc.castrillon@javeriana.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4856-2099>

b Doctor en Ciencias Biológicas, magíster en Microbiología. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: luis.gomez@javeriana.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9452-4686>

c Doctora en Ciencias Química, Universidad de Antioquia, Profesora Asociada, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: sol.mejia@javeriana.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5664-0558>

Microplastics: An Invisible Threat in the Ocean - A Chemical and Biological Review

Abstract: A bibliographic review was conducted to delineate the characteristics and effects of microplastics (MP) on marine biota and humans. Articles published between 2010 and 2023 were considered. Upon compilation, duplicate articles were eliminated, and the remaining ones were filtered based on inclusion and exclusion criteria. The review of these articles led to the conclusion that the lack of standardized methods is evident. However, optical, spectroscopic, and pyrolysis techniques are predominantly utilized. Consequences on the ecosystems and human health include reduced metabolic energy, morphological changes, oxidative stress, population decline, intestinal problems, among others. The industry offers various options to mitigate the problem, such as filters, biodegradation, substitute products, etc. Nevertheless, it is emphasized that the primary measure should be the reduction of production.

Keywords: Microplastics; Ocean; Chemistry; Biology; Review

Microplásticos, ameaça invisível no oceano: uma revisão da química e biologia

Resumo: Foi realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de descrever as características e os efeitos causados pelos microplásticos (MP) na biota marinha e no ser humano. Foram considerados artigos científicos publicados sobre o tema entre os anos de 2010 a 2023. Uma vez compilados, procedeu-se à eliminação de duplicatas e à filtragem dos artigos remanescentes com base em critérios de inclusão e exclusão. A revisão dos artigos permitiu concluir que, na caracterização desses materiais, evidencia-se a falta de métodos padronizados, no entanto, predominam as técnicas ópticas, espectroscópicas e de pirólise. Entre as consequências para a saúde dos ecossistemas e humanos encontram-se a redução na energia metabólica, as alterações morfológicas, o estresse oxidativo, a redução da população, os problemas intestinais, etc. Destacam-se as diversas opções que a indústria oferece para aliviar o problema, como filtragem, biodegradação, produtos substitutos, etc., mas enfatiza-se que a principal medida deve ser a redução na produção.

Palavras-chave: microplásticos; oceano; química; biologia; revisão

Introducción

El término plástico hace referencia a sustancias naturales, sintéticas o semisintéticas que bajo calor y/o presión son maleables, por lo que pueden transformarse sin destruir su composición [1]. Todos los plásticos se tratan de polímeros, es decir, largas cadenas compuestas de unidades pequeñas repetitivas conocidas como monómeros [2]. En la tabla 1 se observan cuatro de los polímeros plásticos más usados. Debido a los bajos costos que representa su producción y a la facilidad de obtención de recursos para la misma, estos materiales han reemplazado rápidamente a los tradicionales (cuero, metal, vidrio, cerámica y madera) [3].

Tabla 1. Ejemplos de polímeros plásticos comunes

Nombre	Abreviatura	Monómero
Polietileno	PE	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \right]_n$
Polipropileno	PP	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH} - \text{CH}_2 \end{array} - \right]_n$
Poliestireno	PS	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} - \right]_n$
Poli (cloruro de vinilo)	PVC	$\left[\begin{array}{c} \text{Cl} \\ \\ \text{CH}_2 - \text{CH} \end{array} - \right]_n$

Fuente: tomado de Crawford y Quinn, 2016.

Desde sus inicios, la producción de plástico no ha parado de crecer. Según el informe realizado por Heinrich Böll Stiftung *et al.* (2021), la producción mundial de este material aumentó de dos millones de toneladas en 1950 a casi 370 millones de toneladas en 2019 [4]. Según este mismo informe, se espera que, en los siguientes 20 años, la producción de plástico se duplique y se cuadruple para inicios de la década de 2050. Aunque se estima que anualmente ingresan por lo menos 4,8 millones de toneladas de desechos plásticos al ecosistema marino, en la superficie de alta mar solo se encuentran alrededor de 7000 toneladas, por lo que se sugiere que la mayor parte del plástico está en el fondo marino [5]. En el contexto nacional colombiano, el

país genera unas 12 millones de toneladas de residuos sólidos cada año y solo recicla el 17 % [6].

Mucho se ha escuchado acerca de los riesgos que traen consigo los plásticos en el ecosistema marino, entre los que podemos encontrar enredos, estrangulamientos y malnutrición [7]. Sin embargo, un tipo de plástico que no se puede ver a simple vista, conocido como microplástico (MP), representa un riesgo mayor. Son partículas sólidas sintéticas de matriz polimérica, de forma regular o irregular, con tamaño variado de 1 μm a 5 mm, de origen primario o secundario, insolubles en agua [8]. Nótese que esta definición se queda corta, porque no incluye al MP de base biológica, como el ácido poliláctico, sustancia que, a pesar de fabricarse a partir de recursos biológicos, no necesariamente es compostable o biodegradable [9]. Es así que los MP se pueden clasificar según su origen o tamaño (tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de los microplásticos

Por tamaño	Por origen
Microplásticos (< 5mm - 1mm)	Primarios
Minimicroplásticos (< 1mm - 1 μm)	Secundarios
Nanoplástico (< 1 μm)	

Fuente: tomado de Crawford y Quinn, 2016.

Aunque los MP son un tipo de contaminante poco estudiado, debido a dificultades relacionadas con su medición y caracterización, se conoce que son ubicuos, encontrándose partículas en zonas tan remotas como las islas Midway y Moloka [10]. Incluso se ha observado su presencia en diferentes matrices de las zonas polares del planeta, incluyendo el agua, los sedimentos, los organismos marinos e inclusive el hielo polar [11]; en el caso del hielo, se ha encontrado que su concentración es mucho más alta comparada con la del agua circundante [12]. Con respecto al ecosistema marino, este es el más expuesto, debido a que gran parte de los desechos continentales tienen como destino final el océano, vía cuerpos fluviales, e incluso los MP que se encuentran en la atmósfera pueden terminar depositándose en el mar, viajando largas distancias [13].

Entre los riesgos de estos plásticos en la biota marina se encuentra la absorción y la ingestión. Por ejemplo, en algas marinas, la absorción de nano-poliéstereno (NPS) inhibe la fotosíntesis y causa estrés oxidativo [14]. En el zooplancton se ha observado una disminución de la alimentación después de la ingestión de perlas de poliestireno (PS) [14]; incluso, en el caso del copépodo *Tigrius japonicus* se ha visto un aumento en las tasas de mortalidad [14].

Un segundo riesgo es la adsorción de cocontaminantes por parte de las partículas de MP, observándose su coexistencia con metales pesados a lo largo del mundo, por ejemplo, en el estuario del río Chao Praya, en Tailandia, [15] y en la Provincia de Hormozgan, en Irán [16], convirtiendo a estas micropartículas en un posible vector de estas sustancias. Además, pueden actuar como superficie para la colonización de biota invasora; esto se ha comprobado en insectos pelágicos como *Halobates* en el Giro del Pacífico Norte (NPG) y en especies bacterianas y diatomeas [17].

Los efectos negativos que tienen los MP no se limitan a la biota marina, sino que pueden escalar a los humanos. Se estima que la comida de mar provee el 20 % de la proteína animal a casi tres mil millones de personas [18]. Se ha especulado que el europeo promedio ingiere 11 000 partículas de MP por año, debido al consumo de mariscos [7]. Recientemente, y por primera vez, se ha informado la presencia de estas partículas conformadas por tereftalato de polietileno (PET), polietileno (PE), polímeros de estireno y polimetacrilato de metilo (PMMA) en la sangre humana [19], y en tejido placentario, tanto en compartimentos intra y extracelulares, que podrían ser la causa de cambios morfológicos encontrados en el retículo endoplasmático y la mitocondria, cambios que hasta el momento no se habían reportado en embarazos sanos a término [20].

Latinoamérica no está aislada de este problema. En el Cabo de Hornos, en Chile, se estudiaron especímenes de *Lithodes santolla*, encontrándose que el 27 % de los individuos muestreados habían ingerido entre una y tres piezas de MP, a pesar de que el lugar donde se llevó a cabo el estudio es un área remota [21]. En estudios realizados en Lima,

Perú, se muestrearon mariscos y peces de interés comercial como *Semimytilus algosus* y *Scomber japonicus*, hallando que todas las especies estaban contaminadas con este material [22], [23].

En el caso de Colombia se ha reportado la presencia de MP en peces de interés comercial como *Cetengraulis mysticetus*, en Buenaventura y Tuma-co [24]. En la Bahía de Buenaventura, la contaminación por estos plásticos se incrementó un 84,4 % en el año 2019 respecto al 2015, según Vásquez *et al.* [25], mientras que para Vidal *et al.* [25], el aumento fue del 114,7 %. Por su parte, en la costa Caribe se hizo el primer registro en el año 2015, colectando un total de 45 520 pellets, la mayoría vírgenes, provenientes de fábricas cercanas de la Bahía de Cartagena [26].

Por todo lo mencionado anteriormente, se hace evidente que la contaminación por MP es un tema de importancia global y que abarca todas las áreas, desde la ambiental, económica y política, hasta de salud pública. Por lo tanto, con el propósito de aportar al conocimiento de esta problemática, el objetivo del presente trabajo es realizar una descripción, con base en una revisión bibliográfica, de sus características y efectos encontrados en el mar, a nivel químico y biológico, así como de posibles soluciones frente a este problema.

Materiales y métodos

Para la recolección de artículos de interés se realizó una búsqueda inicial en cinco bases de datos (EbscoHost, Wiley, Scielo, ProQuest y Scopus), teniendo en cuenta las siguientes palabras clave: “microplast”, “ocean”, “impact”, “biota”, “chemical pollution”, “combined effects”, “chemical análisis”, “physicochemical análisis”, “alternative” y “solution”. Las palabras usadas en Scielo se buscaron en español. En cada base de datos se realizaron cuatro búsquedas diferentes para resolver las siguientes preguntas: ¿cuál es el impacto de los MP en la biota marina?, ¿cómo interactúan con otros contaminantes químicos encontrados en el mar?, ¿cuál es la información existente acerca de la contaminación por este material en Colombia y/o Suramérica?, ¿qué posibles soluciones se han planteado para mitigar y/o eliminar el problema que causan? Por último, se hizo uso de la base de datos SciFinder

para resolver la pregunta, ¿cómo es el análisis químico y fisicoquímico de los MP?, para lo cual se utilizaron estas palabras clave: “microplast”, “chemical analysis” y “physicochemical analysis”. Con el fin de ampliar la información recolectada con respecto a las posibles soluciones, se hizo una búsqueda adicional en la revista Green Chemistry, utilizando la palabra clave “microplastic”. Para todas las búsquedas, la ventana de tiempo utilizada fue entre los años 2010 a 2023.

Hechas las búsquedas iniciales para recopilar los artículos, se procedió a eliminar duplicados y a filtrar los restantes, tomando en cuenta criterios de inclusión (revisiones, artículos originales, capítulos de libros y que se refirieran exclusivamente al ambiente marino) y exclusión (artículos de prensa, blogs o sitios *web*, o artículos referentes a ambientes fuera del mar como el agua dulce, o ambientes terrestres y artículos con idioma diferente al inglés o al español). Una vez recopilados los artículos pertinentes, en total resultaron 86, la mayoría pertenecientes a revistas Q1, se clasificaron en grupos orientados en cinco temas a tratar: introducción, análisis químico de los MP encontrados en el océano, su efecto en la biota marina y en los humanos, interacción de ellos con otros contaminantes químicos y su impacto en los seres vivos, y, al final, soluciones y formas de mitigación.

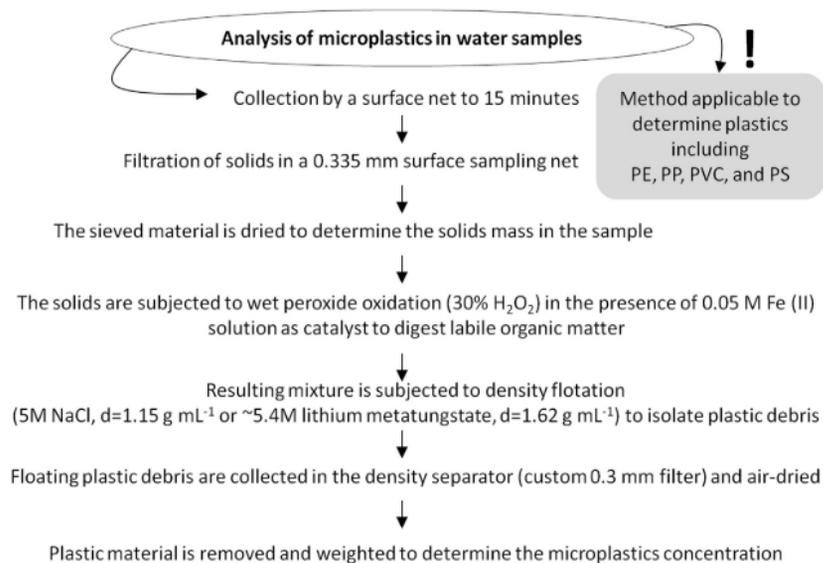
Resultados y discusión

Análisis químico de los MP encontrados en el mar

Aunque el estudio sobre la presencia de estos plásticos en el océano empezó hace más de 50 años, la falta de métodos estandarizados de análisis dificulta su determinación y caracterización. El primer paso es medir de forma apropiada su abundancia, pero todavía falta un protocolo estándar para extraer MP. No hay siquiera una unidad estándar [27]. En la presente sección se hace un resumen de las técnicas de análisis químico de ellos, que, según nuestro conocimiento, existen hasta el momento, desde su muestreo hasta su caracterización.

Son pocos los estudios que han documentado el proceso de muestreo, sin embargo, destaca el trabajo de Silva *et al.* [28], quienes hicieron un esfuerzo por revisar los desafíos del análisis químico de estos contaminantes. En dicho trabajo se hizo referencia a las recomendaciones hechas por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), organización que propone una serie de pasos para el análisis de los MP en muestras de agua oceánica (figura 1). En el mismo documento resaltan la importancia de evitar cualquier tipo de contaminación durante el proceso, por lo que

Figura 1. Recomendaciones hechas por la NOAA para el muestreo de MP encontrados en el agua oceánica



Fuente: reproducido de Silva *et al.* (2018), con permiso de “Elsevier”.

sugieren tener cuidado con las fibras procedentes de la ropa, los engranajes de las máquinas y la atmósfera, limpiando todo el equipo antes y después de cada uso, y usando ropa libre de polímeros [28].

Una vez realizado el muestreo, es necesario separar los MP de la matriz en la que se encuentran. Para esto, la técnica más usada es la separación por densidad. El fundamento de dicha técnica es que la densidad de los sedimentos es $2,65 \text{ g / cm}^3$, en promedio, mientras que la del plástico no supera los $1,58 \text{ g / cm}^3$ (tabla 3), por lo que se mezcla el agua con una cantidad variable de una sal seleccionada, aumentando su densidad y permitiendo que los MP floten [27]. Puede que durante el proceso haya dificultades, como que algo de sedimento flote junto con las partículas, requiriendo de tratamientos posteriores, como la digestión química. La sal más usada es el cloruro de sodio (NaCl), sin embargo, polímeros como el cloruro de polivinilo (PVC) tienen densidades más altas que la de esta solución. Teniendo en cuenta que la densidad de los MP varía de $0,9 \text{ g / cm}^3$ a $1,58 \text{ g / cm}^3$, se considera que las sales más eficaces son ZnCl_2 , NaI, KI, ZnBr_2 y KF, aunque tienen un riesgo mayor para la biota acuática y presentan serios riesgos para la salud [27]. Adicional a esto, sales como NaI, Na_2WO_4 , KI y KF son muy costosas [27].

Tabla 3. Valores de densidad de diferentes plásticos

Polímero	Densidad (g / cm^3)
Poliétileno (PE)	0,917 - 0,965
Polipropileno (PP)	0,9 - 0,91
Poliestireno (PS)	1,04 - 1,1
Nylon	1,02 - 1,05
Poliéster	1,24 - 2,3
Cloruro de polivinilo (PVC)	1,16 - 1,58
Tereftalato de polietileno (PET)	1,37 - 1,45
Poliuretano	1.2

Fuente: tomado de Bellasi *et al.*, 2021.

Se han propuesto sales alternativas como el NaH_2PO_4 , el cual parece ser una buena opción en términos de costos, riesgos ambientales y tasa de recuperación. Sin embargo, podría complejizarse debido a la necesidad de calentar la solución [27].

Por su parte, Gohla *et al.* proponen la solución acuosa de K_2CO_3 como un nuevo medio de flotación de alta densidad barato y no tóxico, que puede alcanzar una densidad de $1,8 \text{ g / cm}^3$ a 20 °C [29]. Mientras que Bellasi *et al.* proponen un método de densidad usando NaCl y sacarosa, ya que se ha demostrado que la sacarosa incrementa la densidad; los autores obtuvieron una solución con una densidad de aproximadamente $1,30 \text{ g / cm}^3$ y una tasa de recuperación de MP de aproximadamente el 82,5 % [27].

Otras técnicas diferentes a la separación por densidad son la extracción por aceite, la separación electrostática y la despolimerización del PET, y la cuantificación del ácido tereftálico (TPA). El protocolo de extracción por aceite está basado en las propiedades oleofílicas de los MP [27]. Este método es barato y de fácil aplicación. El proceso consiste en agregar unos pocos mililitros de aceite dentro de la muestra de agua y agitar para que el aceite entre en contacto con la muestra. Después se realiza una extracción con embudo de decantación; la capa de aceite es filtrada y después los filtros son tratados con reactivos como alcohol y detergente para remover los residuos de aceite [27]. Una de las dificultades que ocasiona este método es que el aceite interfiere con técnicas analíticas de identificación, como el espectro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), pero un proceso posterior con etanol puede remover hasta el 90 % de aceite, eliminando así la interferencia espectral [30].

En la separación electrostática, las partículas se cargan electrostáticamente y, debido al movimiento del tambor, se disponen en diferentes recipientes, de acuerdo con su velocidad de descarga. Dado que los MP son materiales no conductores, su velocidad de descarga es más lenta que la de los granos de arena, por lo que son recolectados en zonas separadas. Se ha mostrado una efectividad cercana al 100 %, lo que puede deberse a que, en comparación con otros métodos, tiene un menor número de pasos; sin embargo, el equipo para efectuarlo es muy costoso, por lo que no es viable para analizar pequeñas cantidades [27].

La técnica de despolimerización del PET y cuantificación del TPA se deriva del hecho de que este es el único comonomero de ácido dicarboxílico en

aquel. La despolimerización resulta en la formación de una mezcla 1:1 de sal de TPA y etilenglicol. Con una posterior cuantificación del TPA es posible calcular la cantidad de PET en la muestra. La tasa de recuperación se encuentra por encima del 94 %; su limitación más importante es que solo el PET puede ser analizado; además, las muestras son destruidas, ocasionando que análisis posteriores sean inviábiles [27].

Para Bellasi *et al.*, considerando todos los aspectos de precisión, reproducibilidad, sostenibilidad y costos, el método más favorable es el protocolo de extracción por aceite. Sin embargo, la separación por densidad sigue siendo el método más usado. No obstante, un método por separación de densidad que resulte seguro al medio ambiente, y con mayores eficiencias que los otros métodos, aún no se ha reportado en la literatura, por lo que es urgente proponer una salida verde a este problema [27].

Una vez son separados los MP de la matriz, se pueden hacer diversos análisis químicos para su identificación y caracterización. Para tal fin se utilizan diversas técnicas, desde ópticas hasta espectroscópicas. El primero, por lo general, se practica mediante una observación al ojo o asistida con microscopía óptica. Esta técnica es rápida, simple y barata, aunque tiene limitaciones, como el hecho de no poder distinguir los MP de otros materiales. En consecuencia, es necesaria la confirmación de las partículas identificadas por medio de otras técnicas, como las espectroscópicas. Un ejemplo de esto lo reportaron Silva *et al.*, al comparar dos fibras visualmente idénticas, pero después se confirmó que una se trataba de algodón, mientras que la otra era de poliacrílico [28].

Otra técnica óptica es la microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés). Esta provee imágenes de gran aumento. Además, cuando está acoplada con espectroscopía de radiación secundaria (EDS por sus siglas en inglés) (SEM-EDS) brinda información cualitativa y cuantitativa de la composición de una superficie, lo que facilita la diferenciación de MP de partículas sedimentarias (figura 2a). Así mismo, gracias al EDS puede detectar cantidades de trazas de elementos como Al,

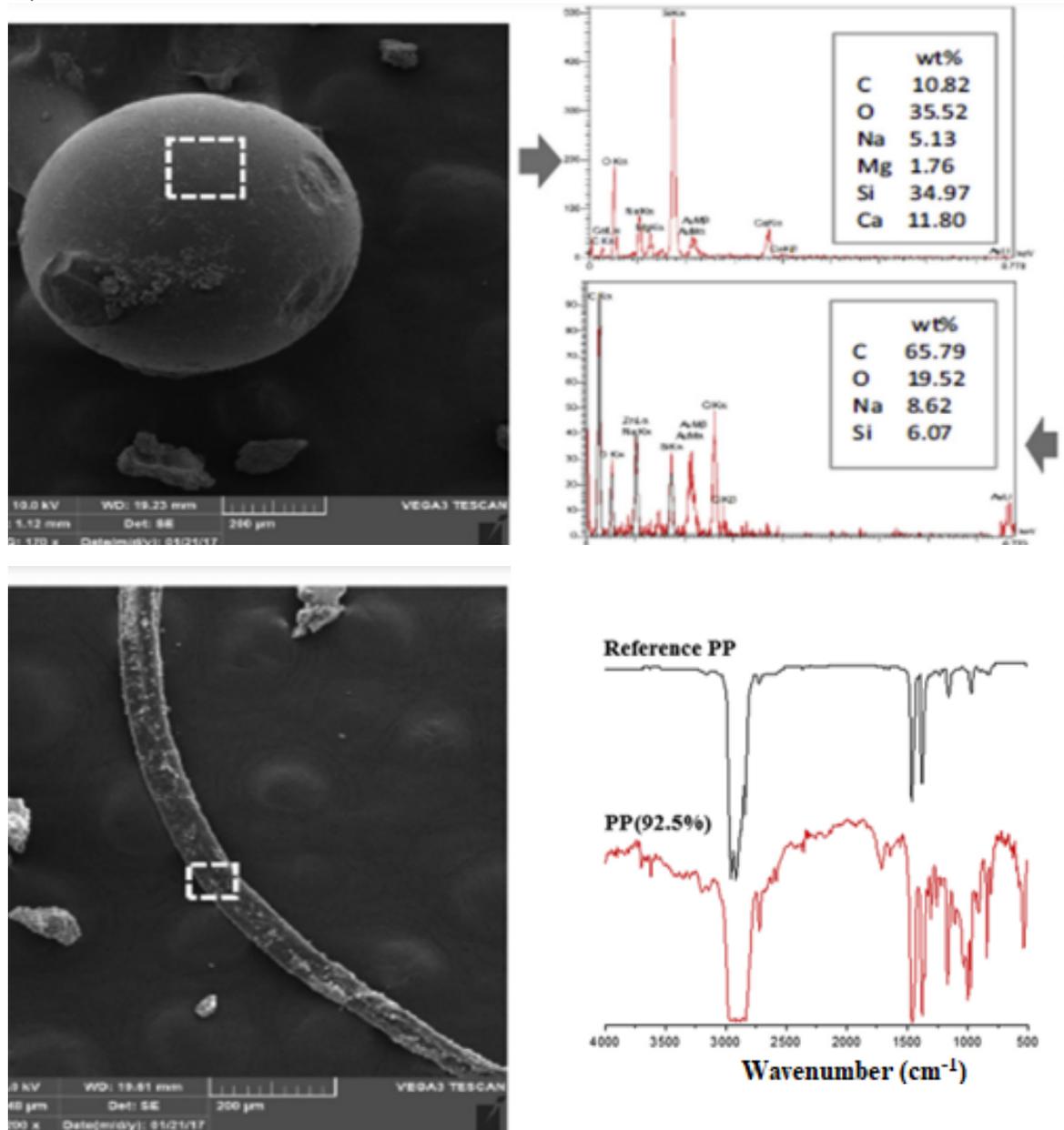
Na, Ca, Mg y Si [28]. Esta técnica es costosa y exige pasos de preparación laboriosos.

Las técnicas espectroscópicas más usadas son la espectroscopía Raman e infrarroja. Requieren de poca cantidad de muestra, y el tipo de polímero puede ser identificado con rapidez, al comparar su espectro con el de plásticos conocidos [28] (figura 2b).

Por último, se encuentra la pirólisis combinada con cromatografía de gases y espectrometría de masas. Este es un método destructivo, en el que se puede identificar el tipo de polímero, al analizar los productos de degradación térmica del mismo [31]. Entre sus ventajas se encuentra que elimina la necesidad de pretratamiento y requiere una pequeña cantidad de la muestra (menos de 200 µg). Puede ser usado simultáneamente para identificar el tipo de polímero y los aditivos asociados. Mediante esta técnica se ha encontrado que muestras marinas de PE, polipropileno (PP), PS y poliamida (PA) contenían sustancias como diferentes tipos de ftalatos y benzaldehído [28]. Se ha podido confirmar que el PE, PP, PS y la polifitalamida (PPA) son los tipos de polímeros más abundantes en el ambiente marino [32]. Además, se ha concluido que los polímeros de baja densidad, como el PE y el PP, tienen mayor concentración en el mar abierto. Por su parte, en el océano profundo, se demostró que la PPA es el tipo de polímero que predomina, debido a su alta densidad similar a la del PVC [32]. Como desventaja, esta técnica no provee información acerca del número, tipo o morfología de los plásticos, por lo que se requieren técnicas ópticas de preselección [28].

Para la identificación de contaminantes absorbidos por los MP se usa con frecuencia la espectroscopía de descomposición inducida por láser (LIBS), ya que puede ser usada directamente, solo necesita una pequeña cantidad de muestra y el tiempo de detección es de milisegundos [33]. Sumado a esto, se ha demostrado que con la técnica LIBS se pueden distinguir elementos en partículas solitarias, lo cual es muy útil, ya que hay evidencia de diferentes tipos de contaminación en partículas que incluso fueron recogidas en el mismo lugar [34]. Según Chen *et al.*, los metales que se encuentran

Figura 2. (a) Imágenes SEM y análisis EDS de esfera de vidrio de silicato liso con pequeños hoyos en la superficie, en la izquierda, y fibra de MP con 2 mm de largo a la derecha. (b) Espectro FTIR del PP y el grado de coincidencia con el espectro estándar

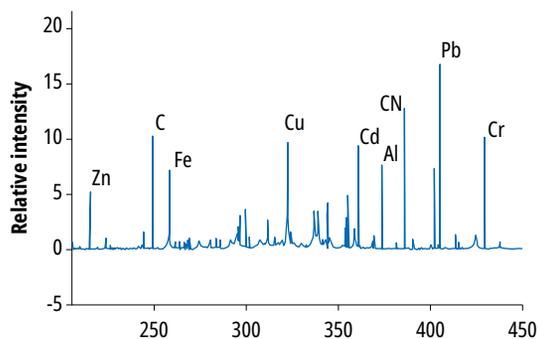


Fuente: reproducido de Liqi Cai et al. (2017), con permiso de “Springer Nature”.

en mayor cantidad en estas partículas incluyen Cu, Pb, Fe, Cd, Zn, Al, Mn y Cr [33] (figura 3).

El proceso de identificación y cuantificación no está libre de desafíos; por ejemplo, el equipo de Kutralam *et al.* informa que hay muchas diferencias entre los estudios [35]. Por ejemplo, respecto al número total de muestras, estas varían de 2 a

19. Hay estudios que no reportan tal información y existe mucha variedad en las unidades de muestra, por lo que advierten acerca de la necesidad urgente de la estandarización. Además de tener en cuenta medidas de precaución, como no mezclar las partículas coloreadas con las blancas y transparentes, debido a que los pigmentos inorgánicos añadidos

Figura 3. Espectro LIBS de una muestra de MP

Fuente: reproducido de X. Chen *et al.*, (2022), con permiso de "Elsevier".

a las partículas de color durante el proceso de manufacturación podrían alterar los resultados [35].

Un último desafío en el análisis químico de los MP, y a menudo olvidado, es la garantía de calidad. La estandarización de las técnicas es escasa y crucial. Evidencias de la escasa información al respecto de la garantía de calidad son reportadas por Silva *et al.* [28]. De 43 estudios evaluados, solo siete incluían muestras de control de laboratorio y ensayos de validación [28]. A su vez, en la revisión de Kutralam *et al.* se informa que solo 17 de 28 estudios efectuaron procedimientos de control de calidad [35].

Aunque aún hay desafíos, se debe valorar el esfuerzo que han hecho ciertos autores para desarrollar un protocolo estándar de cuantificación y caracterización de MP en ecosistemas específicos, como el propuesto por Álvarez *et al.* para playas de arena [36].

Efecto de los MP en la biota marina

Aunque estos plásticos son pequeñas partículas, no visibles al ojo humano, se encuentran en todos los ambientes del océano, desde la zona intermareal, pasando por el agua superficial, llegando a los sedimentos profundos e islas en medio del océano. Debido a que son resistentes a la biodegradación, pueden permanecer en el ambiente por cientos de años, representando una grave amenaza para los organismos biológicos, incluidos los humanos [37]. Es por esto por lo que en la presente sección se brinda un resumen de los efectos que tienen los MP,

por sí mismos, en la biota marina y los humanos.

En el caso del fitoplancton se ha podido constatar que la absorción de perlas de MP inhibe la fotosíntesis y causa estrés oxidativo en géneros de microalgas como *Chlorella* y *Scenedesmus*, lo que podría deberse al bloqueo físico de luz y aire [38], [10], [39]. Además, por un lado, se ha demostrado que causan alteraciones en la concentración de clorofila, en la tasa de crecimiento celular, expresión de genes, tamaño de colonia y cambios morfológicos [40], tales como tilacoides deformados y paredes celulares engrosadas [5]. Por otro lado, también pueden afectar el crecimiento de las plantas mediante la reducción en el crecimiento de las raíces, la disminución en la fotosíntesis y una mayor producción de especies reactivas de oxígeno (ROS por sus siglas en inglés) [41].

Los efectos negativos de los MP en el zooplancton van desde el daño y el bloqueo de apéndices alimenticios y el sistema digestivo, hasta limitar la ingesta de alimentos y transferir contaminantes. En copépodos se ha relacionado la presencia de estos plásticos con la reducción de la tasa de ingestión y la reducción de la fertilidad, probablemente debido a la insuficiente nutrición [42], [10]. En la especie de copépodo *Paracyclopsina nana*, la presencia de MP de 0,05 μm se ha traducido en retrasos en el desarrollo y reducción de la fecundidad [43]. Además, los individuos muestran indicios de estrés oxidativo [43].

Cole *et al.* observaron en *Calanus helgolandicus* un descenso en la fecundidad, con una reducción significativa en la cantidad y el tamaño de los huevos eclosionados; también se observó la muerte de dos copépodos después de cuatro días de exposición a MP, mientras que en el grupo control no se registró ninguna muerte. A la pulga de agua, *Daphnia* spp, la exposición a estos plásticos le redujo la tasa de crecimiento y el tamaño del cuerpo [43], [44]. En cuanto a las larvas de muchos organismos marinos, que tienen una etapa pelágica comúnmente planctotrófica, se ha observado que los MP podrían tener efectos en la supervivencia, como es el caso del erizo de mar *Tripneustes gratilla* [45].

Por su parte, Messinetti *et al.* evaluaron el efecto de los MP en una concentración ambiental, en el

desarrollo de dos especies diferentes de invertebrados, *Ciona robusta* y *Paracentrotus lividus*. En *C. robusta* no se vio ningún efecto en la tasa de supervivencia, las larvas mostraron un fenotipo normal, aunque el porcentaje de individuos que después del día cuatro había alcanzado la cuarta etapa fue significativamente menor en el grupo expuesto a los MP. Por su parte, en *P. lividus*, pasadas 72 horas, no se encontraron diferencias en la tasa de supervivencia, aunque sí en el largo del cuerpo [42].

En la especie *Arenicola marina*, conocida como gusano de arena, se ha observado un descenso de su actividad alimenticia y de sus reservas de energía después de la exposición a los MP, reduciendo su supervivencia. Mientras que en el mejillón *Perna viridis* se ha visto una disminución en la producción de bisco y en las tasas de respiración [37], [46].

En los moluscos se ha observado un descenso en la estabilidad de la membrana lisosomal y un incremento en la formación de granulocitos, los cuales son capaces de inducir atrofia y autólisis de la glándula digestiva, siendo esta una condición terminal [40]. En bivalvos se han podido encontrar MP en branquias, glándulas digestivas, estómago y sistema circulatorio; incluso, pueden permanecer en la hemolinfa por 48 días, lo que puede incrementar la mortalidad de los hemocitos, generar la producción de ROS y afectar funciones que realizan los hemocitos, como la fagocitosis y la eliminación de patógenos [40]. En la especie *Mytilus galloprovincialis*, la presencia de partículas de poliestireno ha causado desestabilidad de la membrana lisosomal, disminución de la fagocitosis y producción de ROS extracelulares, lo cual daña la membrana y el citoesqueleto de los hemocitos [47]. En la ostra plana europea, *Ostrea edulis*, después de 60 días de exposición a MP se ha observado un aumento en la tasa de respiración, lo que sugiere que esta presencia induce al estrés [39]. En los mejillones pueden provocar reducciones en el rendimiento alimentario, en la asimilación de energía y en la función inmunológica [48]. Sumado a lo anterior, también se ha visto que los MP pueden agravar los efectos de otras amenazas como la acidificación de los océanos.

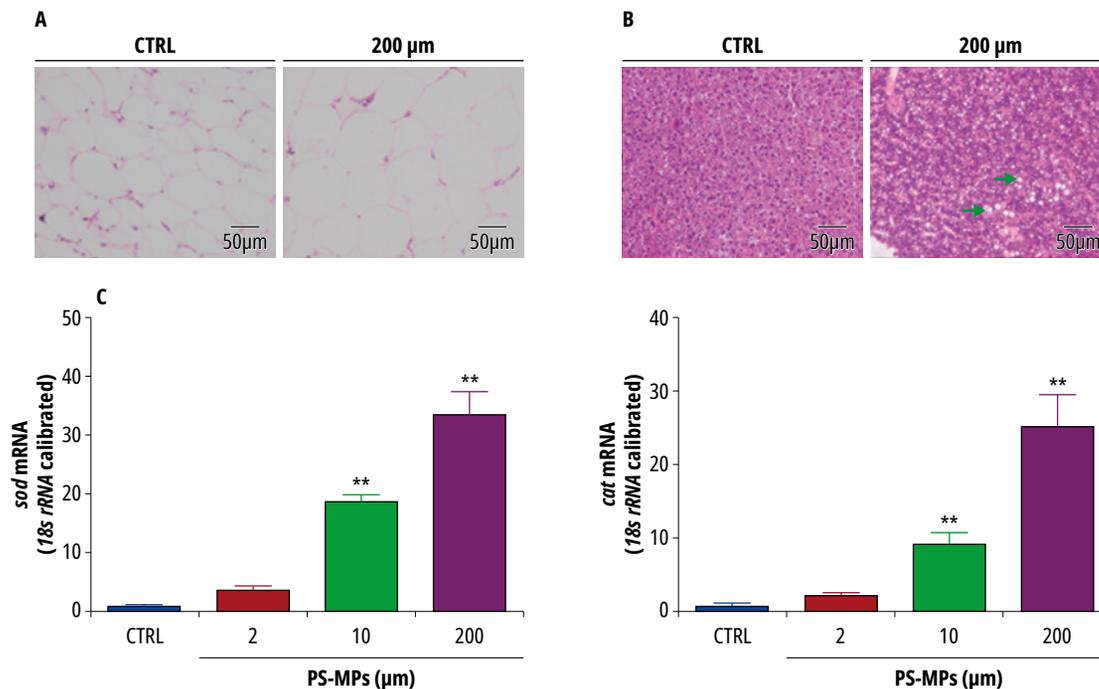
En crustáceos se han evidenciado retrasos en el desarrollo, caídas en la fecundidad, retraso en la muda, inmovilidad y cambios en la velocidad de nado, que son efectos que podrían incrementar la mortalidad de larvas como nauplios y copepoditos. En cangrejos se ha detectado una baja significativa en el consumo de oxígeno, disminución en la concentración de sodio, incremento en la concentración de calcio y en la hemocianina, lo que puede afectar importantes funciones de las células inmunes [40], [49].

En peces se ha podido confirmar que la presencia de MP produce un aumento de la mortalidad, bloqueo intestinal, menor eficiencia predatoria y estrés oxidativo (figura 4) [40]. Esto es importante, teniendo en cuenta que la presencia de estos plásticos se ha corroborado en muchas especies de peces a lo largo del mundo, inclusive en especies migratorias como la conocida barracuda, *Acanthocybium solandri*, o el atún blanco, *Thunnus albacares* [50]. Recientemente se detectó por primera vez la presencia de MP en el pez teleosteo más grande conocido, el pez luna, *Mola mola* [51].

En los corales se ha confirmado que pólipos de *Lophelia pertusa* sometidos a MP presentaron un crecimiento considerablemente menor. Seis especies de corales pertenecientes a los géneros *Acropora*, *Pocillopora* y *Porites*, expuestas a partículas de PE durante cuatro semanas, mostraron diferentes respuestas, como la unión de estos plásticos a los tentáculos, aumento en la producción de mucus, crecimiento en exceso o muerte del tejido. Esto demuestra que unas especies pueden ser más afectadas que otras y, por tanto, un efecto de la exposición a MP podría ser la pérdida de la biodiversidad [8]. En el octocoral, *Corallium rubrum*, se ha encontrado que después de 10 días de exposición a concentraciones media y alta, las tasas de alimentación disminuyeron significativamente, mientras que ante concentraciones bajas no se presentaron cambios. Después de 14 días, los corales expuestos a concentraciones media y alta de MP no mostraron signos de vitalidad [53].

Aunque son muchas las investigaciones que han confirmado los riesgos de los MP en los organismos, investigadores como Batel *et al.* critican

Figura 4. Efectos de la presencia de la ingestión de MP por parte de *D. rerio*. (a) Aumento en el tamaño de los adipocitos. (b) Aumento en las gotas de lípidos en el tejido hepático. (c) Aumento en la expresión génica de enzimas antioxidantes



Fuente: reproducido de Zhang *et al.* (2021), con permiso de "Elsevier".

muchos de estos resultados e indican que se han llevado a cabo tomando en cuenta métodos cuestionables, como no usar concentraciones de MP ambientalmente reales [54]. Por lo que para estudiar el efecto de la ingestión de estos plásticos en peces escogieron como modelo a ejemplares de *Danio rerio*, a los que alimentaron durante 21 días con larvas de *Artemia*, alimentadas a su vez con partículas de PE de 4-6 µm. Un experimento paralelo les ofreció directamente a los peces MP en forma de partículas de 125-500 µm, mezcladas con alimento seco. Al no lograr identificar estos plásticos en ninguna de las muestras, aun confirmándose la ingestión, concluyeron que la absorción y acumulación no eran significativas [54].

Por su parte, Kang *et al.* realizaron ensayos en *Oryzias melastigma* y, aunque confirmaron la acumulación de MP en el intestino, no pudieron evidenciar efectos significativos de medidas morfométricas como el largo del cuerpo, el peso y el diámetro del ojo [55]. Es de aclarar que, aunque no se presenten efectos in vivo, la presencia de

MP puede afectar otros aspectos. Por ejemplo, se ha confirmado la alteración en la transcripción de genes relacionados con el sistema inmune y el metabolismo de lípidos, además de trastornos en el tejido intestinal, sumado a un cambio en la microbiota intestinal de *O. melastigma* [55].

Otro riesgo causado por estos plásticos al ecosistema marino es actuar como vector para la invasión de especies exóticas. Se ha descubierto la presencia de *Aeromonas salmonicida*, un patógeno bacteriano, en MP encontrados en el Adriático norte [56]. También se han detectado especies patógenas del género *Vibrio* en MP flotantes [56]. El mecanismo por el cual estos residuos plásticos se unen a especies exóticas todavía sigue desconocido e inexplorado [57], lo que incrementa los riesgos a la salud humana y animal [58].

Impactos a la salud humana

Debido a que los MP se transfieren a lo largo de la cadena trófica, existe un riesgo real de que gran parte de los encontrados en el mar acaben en la

dieta de gran parte de la población humana. Más allá de esto, se sabe que varias especies marinas comerciales, como mejillones, ostras, cangrejos y peces, consumen MP de manera directa, con lo que actúan como vía de entrada de este contaminante al ser humano [37], [10]. Por ejemplo, en el Océano Índico se ha confirmado que los camarones muestran una acumulación de estos plásticos mucho mayor en comparación con otras especies marinas [59]. Lo anterior es apoyado por lo hallado en estudios como el de Mahu *et al.*, en los que se examinaron tractos gastrointestinales de peces de aguas costeras nigerianas, evidenciando la presencia de MP en todas las muestras; además, se confirmó que debido al pequeño tamaño de estos polímeros, tienen la capacidad de traslocar las barreras intestinales y, por lo tanto, más adelante pueden ser ingeridos por los humanos y trasladarse a diferentes tejidos y órganos [60].

Estudios efectuados en ratas, como modelos biológicos cercanos al humano, han reportado su translocación a tejidos y órganos como el hígado, el bazo y los riñones [61]. Los MP en circulación pueden ocasionar inflamación, oclusiones vasculares, hipertensión pulmonar, citotoxicidad de las células sanguíneas y aumento de la coagulabilidad [61]. En humanos se ha confirmado su entrada al torrente sanguíneo, así como a las células del tracto gastrointestinal, incluso se han observado en las heces [61]. Partículas de PS presentes en células humanas podrían inducir a inflamación, generación de ROS, daño y muerte celular [61]. Sumado a esto, el consumo prolongado de residuos plásticos en los humanos podría derivar en alteraciones de los cromosomas, lo que causaría infertilidad, obesidad y cáncer [37].

Además, la presencia de MP en el organismo puede acarrear problemas gastrointestinales. En la década de los ochenta se alimentaron a varios humanos sanos con 15 g de este material, de menos de 2 mm de diámetro, y se notó que la materia fecal se les incrementó tres veces, aumentando la frecuencia de defecación. Resultados similares se obtuvieron en los noventa, con la utilización de 15 g de PE de 1-2 mm de diámetro, concluyendo que su presencia aceleró el tiempo de tránsito, aumentando las secreciones, lo que en últimas redujo

la absorción de nutrientes esenciales y, por consiguiente, pudo ocasionar deficiencia de nutrientes [62]. A lo anterior se suma que los MP pueden causar cambios en la microbiota intestinal, lo que podría provocar y/o agravar síntomas gastrointestinales [63].

A los plásticos, con frecuencia, se les añaden en su fabricación aditivos que se han clasificado como riesgosos, ya que pueden inducir a cáncer, alteraciones del ADN y defectos a nivel reproductivo. Algunas de estas sustancias incluyen bisfenol A (BPA), ftalatos, retardantes de llama, etc., compuestos que pueden interferir en la señalización hormonal, oponiéndose a su actividad, alterando su síntesis y modulando la expresión de receptores específicos [62].

Otros riesgos de los MP en la salud humana pueden ser facilitar la transmisión de patógenos, como las bacterias [64]. Una afectación muy importante se da a nivel reproductivo, ya que en la actualidad se sabe que la exposición, sobre todo de PS, puede afectar el aparato reproductor femenino, al promover la toxicidad uterina y la infertilidad. En el modelo biológico del ratón se ha visto que su presencia aumenta la probabilidad de desarrollar ovarios más grandes y con menor cantidad de folículos, lo que disminuye el número de embriones posibles; además, pueden afectar la maduración y calidad de los ovocitos. Aunque se han evidenciado mayores efectos negativos en el aparato reproductor femenino, también hay posibles afecciones en los machos, por ejemplo, los MP pueden acumularse en los testículos y provocar una producción anormal de espermatozoides [65].

Por último, estos residuos plásticos pueden afectar el sistema endocrino, desde la producción hasta la eliminación de hormonas. Por otra parte, la exposición continua a ellos también se ha asociado con problemas cognitivos y cambios en la función locomotora. Este último aspecto se ha demostrado en experimentos efectuados con animales, en los que se ha visto cambios en la actividad de la anticolinesterasa [63], una enzima que cataliza la hidrólisis de la acetilcolina y desempeña un importante papel en la unión neuromuscular periférica. Además, puede que haya afectaciones aún desconocidas, por ejemplo, no se

sabe cuál puede ser el impacto de su bioacumulación en el desarrollo neurológico [66], por lo que, como recomienda Nugawela *et al.*, es necesario ampliar el número de investigaciones para comprender en su totalidad los riesgos de los MP para la salud humana [59].

Interacción de los MP con demás contaminantes químicos y su efecto en los seres vivos

Las posibles consecuencias de estos residuos plásticos en la salud de los ecosistemas y de los seres humanos no se limita a lo descrito anteriormente. Esto se debe a que estas partículas interactúan con facilidad con otros contaminantes mediante procesos de sorción [2].

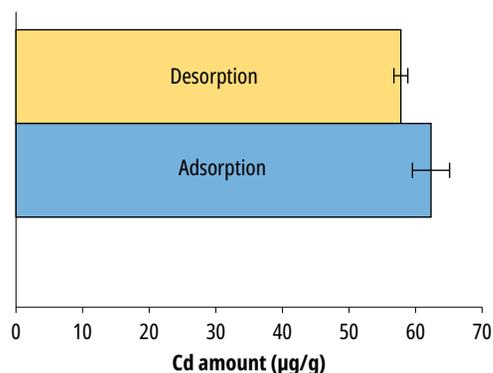
Entre los contaminantes tóxicos que interactúan con los MP se encuentran los contaminantes orgánicos persistentes, que son sustancias químicas con una gran resistencia a la degradación fotolítica, química y biológica, altamente tóxicos, con la capacidad de acumularse en tejidos animales, por lo que contaminan toda la red trófica y pueden afectar la salud humana [67]. Entre estos están los pesticidas, que pueden derivar en enfermedades crónicas o agudas, incluso en los seres humanos. Al respecto, se ha probado la adsorción de imidacloprid, buprofezina y difenoconazol en partículas de PE [67]. Asimismo, se ha demostrado la sorción del fenantreno (PHE) y el dicloro difenil tricloroetano (DDT) en partículas de PVC [68], y de sustancias químicas como el metilparabeno, usado con frecuencia en las industrias cosmética y alimentaria [69].

Otro contaminante importante son los antibióticos, liberados en grandes cantidades por la industria de la acuicultura. Por ejemplo, ante la tetraciclina absorbida por MP de PE, PVC y PS, su isoterma muestra una adsorción lineal en los tres tipos de polímero [70]. Inclusive, el hecho de que diferentes contaminantes se encuentren en el mismo lugar también favorece su sorción en los MP; por ejemplo, se ha visto que iones metálicos de Pb, Cr, Cd y Zn favorecen la adsorción de la tetraciclina en estas partículas plásticas [69].

Los metales pesados son otros contaminantes a tener en cuenta. Se ha confirmado la posibilidad de que metales como el Cu y el Zn, provenientes de pinturas antiincrustantes, pudieran ingresar a las partículas de MP. Está demostrado que la concentración de metales en los MP podía ascender hasta 800 veces más que en el agua cercana [71].

También se ha observado que partículas de PVC y de PP son las que tienen las más altas concentraciones de metales, en comparación con el nylon, el PE y el poliformaldehído [72]. Además, se ha evidenciado que hay una alta tasa de desorción en MP contaminados con Cd ($92,9 \pm 3,5 \%$), lo que indica que los metales pesados pueden ser liberados con facilidad desde estos residuos plásticos hacia los tejidos animales, después de su ingestión [73] (figura 5).

Figura 5. (c) Adsorción y desorción de Cd en partículas de MP



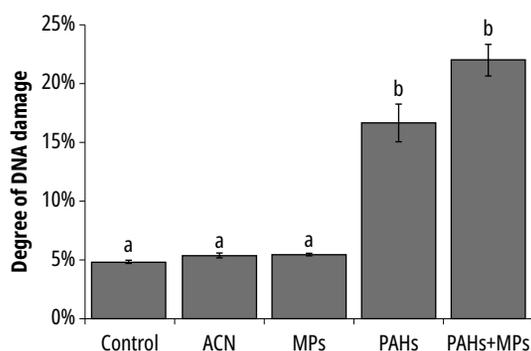
Fuente: reproducido de F. Wang *et al.*, (2019), con permiso de "Elsevier".

En el estudio de la sorción de contaminantes químicos en los MP, es importante tener en cuenta factores como el tamaño y el grado de envejecimiento de la partícula. En un estudio realizado con partículas de PE de alta densidad y Cd, se probó que partículas de menor tamaño presentan un área superficial específica más alta y más sitios de adsorción [73]. Además, se ha demostrado que las partículas envejecidas tienen una mayor capacidad de adsorción; esto se ha evidenciado con los metales Cu y Cd en partículas de PVC y PS envejecidas y no envejecidas [74].

Como las partículas de MP almacenan otros contaminantes, afectan la salud de los seres vivos. El primer riesgo es la transferencia de estos contaminantes a los tejidos animales; al respecto, por un lado, se ha demostrado la presencia de DDT en muestras de músculo e hígado del ave *Fulmarus glacialis*: la cantidad fue similar al plástico ingerido [75].

Por otro lado, se ha corroborado que a la almeja *Scrobicularia plana*, el consumo de MP de PEBD contaminados con benzo(a)pireno (BaP) y ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS) le ha causado daño del DNA [76], [77] (figura 6).

Figura 6. Impactos de la mezcla de PAH y MP en el ADN de almejas



Fuente: reproducido de Sun *et al.*, (2021), con permiso de "Elsevier".

En cuanto a los riesgos de los metales pesados encontrados en los MP, se ha observado que la ingesta de estos, contaminados con Cd, en el pez disco, *Symphysodon aequifasciatus*, producen un aumento de las metalotioneínas, proteínas importantes en el control del estrés oxidativo y en la captura de metales pesados. Además, la actividad de enzimas antioxidantes como SOD y catalasa se ha visto influenciada por la presencia de Cd, MP y su mezcla, lo que evidencia que hay estrés oxidativo confirmado por la presencia de malondialdehído (MDA) [78].

En la microalga *Tetraselmis chuii*, la presencia de MP contaminados con Cu redujo de forma significativa el crecimiento de la población en concentraciones de Cu £ 0,04 mg/l [79], mientras que en el caballo de mar amarillo, *Hippocampus kuda*,

también se ha observado estrés oxidativo, con un aumento del MDA, el superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT) [80].

Soluciones y formas de mitigación

Tal como se ha ilustrado a lo largo del presente texto, la polución por MP en el océano es un problema mayúsculo que afecta la estabilidad del planeta. Además, la producción de plástico se mantiene en crecimiento, por lo que es urgente tomar medidas que ayuden a reducir este problema.

Un primer paso podría ser limpiar la basura ya existente. Muchos trabajos hechos hasta el momento han expuesto diversas formas de remover los MP encontrados en el ambiente, que van desde la filtración hasta la degradación biológica [41]. Como primera opción se encuentra la filtración, un método comúnmente usado para remover estos residuos plásticos del agua, pero la eficiencia de este método se reduce por el gran tamaño de los plásticos que se acumulan encima de la membrana. La eficiencia de los filtros varía del 40 % al 98,5 % [81], [82].

Sin embargo, se han encontrado opciones prometedoras como los filtros de biocarbón. Al comparar esta clase de filtros, hechos a base de cáscara de maíz y madera dura, con filtros de arena de sílice, se encontró que el filtro de biocarbón mostraba una eficiencia de remoción superior al 95 %, mientras que el de arena se encontraba entre 60-80 % [81]. Pese a esto, en estudios anteriores se probó que la eficiencia de la remoción disminuyó hasta < 80 % después de cinco ciclos de uso. Destacan trabajos como el de Wang *et al.*, quienes encontraron una solución a este problema al modificar estructuras de biocarbón con Mg²⁺ y Zn²⁺, encontrándose con una mejoría notable [82].

Otros absorbentes potenciales son las esponjas y las espumas hechas de diferentes constituyentes químicos. Una esponja formada por quitina y grafeno absorbe eficazmente varios tipos de MP del agua. Su eficiencia varía entre 70-90 %. Otro método diferente a la absorción es un mecanismo conocido como electrocoagulación, en el cual se usan cargas eléctricas para desestabilizar y agregar partículas suspendidas, tales como MP y metales

presentes en el agua. Este método ha mostrado eficiencias de remoción superiores al 90 %. La flotación por aire disuelto es otro método, en el que se inyecta aire a alta presión en el agua, generando burbujas, las cuales se unen a las partículas sólidas, tras lo cual son removidas por desnatadoras. Este método tiene una eficiencia del 95 % y es el mejor para remover partículas de baja densidad [81].

También existen métodos químicos que involucran el uso de sustancias que, al reaccionar con los MP, los transforman en formas más simples o promueven la formación de floculos, lo que hace que se sedimenten o se puedan filtrar. Algunas de las sustancias empleadas son FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$, mezcla de alumbre y sales catiónicas a base de aluminio recubiertas de poliaminas. Este método tiene una eficiencia máxima del 99,4 % [81].

La biodegradación es una técnica alternativa, en la que los microbios ayudan a la descomposición de los plásticos, al utilizarlos como fuente de carbono y energía [37]. La degradación aeróbica resulta en dióxido de carbono y agua como productos, mientras que la anaeróbica forma dióxido de carbono, agua, metano y ácido sulfhídrico (figura 7) [81]. Este proceso se ha evidenciado con especies como el hongo *Zalerion maritimum* y con bacterias como *Staphylococcus sp.*, *Pseudomonas sp.* y *Bacillus sp.*, que son microorganismos que tienen el potencial de degradar el PE [81]. Mientras que especies como *Rhodococcus rubber*, *Aspergillus*

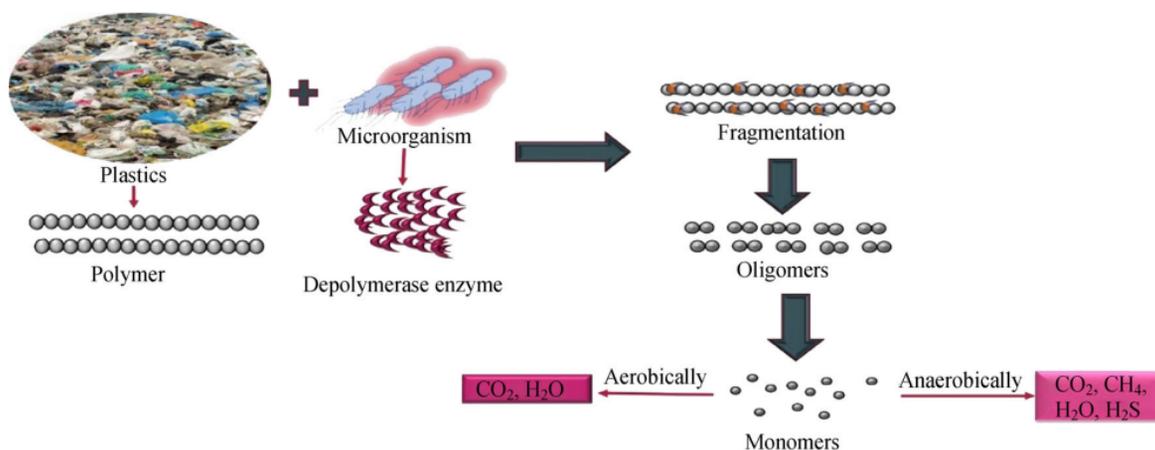
niger, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus* y *Streptococcus pyogenes* han sido descritas como buenas degradadoras de partículas de PET y PS [37].

Otros organismos han probado actuar como depósitos. Un estudio efectuado en el coral hongo *Lobactis scutaria*, colectado en las Islas Maldivas, mostró una eficiencia del 97 % de remoción, lo que sugiere que los corales podrían ser uno de los depósitos más importantes de MP en los océanos. Los principales mecanismos por los que estos organismos acumulan estos residuos plásticos son retención, adhesión e ingestión [81].

Otra manera de enfrentar el problema de esta polución es la búsqueda de productos alternativos que puedan reemplazarlos, como, por ejemplo, las microesferas utilizadas para la limpieza de la piel sustituir las por materiales naturales duros, como cáscaras de nuez y semillas de aguacate; sin embargo, el uso de este tipo de productos resulta en partículas con bordes afilados y tamaños y formas irregulares que rayan la superficie, pudiendo herir la piel [83].

Una opción pueden ser los polímeros biodegradables, los cuales son completamente degradados de forma natural en dióxido de carbono y agua. Un ejemplo de estos es el ácido poliláctico. Sin embargo, los polímeros biodegradables son considerablemente más caros, de tres a diez veces más, además de que su tiempo de degradación es incontrolable

Figura 7. Proceso de biodegradación



Fuente: reproducido de Badola *et al.*, (2022), con permiso de "Springer Nature".

en diferentes ambientes [84], específicamente en el agua de mar es de $< 5\%$ por año [83].

Por lo anterior, recién se ha considerado el uso de materiales poliméricos naturales biodegradables como quitosano, gelatina, celulosa y lignina [84]. La lignina es el biopolímero aromático más abundante en el planeta y está presente en la mayoría de las plantas vasculares. Se ha demostrado que con este material se pueden obtener productos con características antioxidantes, antimicrobianas, fotoestables y resistentes al agua, pudiendo ser aplicado en sensores, materiales para empacar y elementos biomédicos [84].

La celulosa existe como uno de los principales componentes de las plantas. Este polímero natural es un material relativamente hidrofílico, por lo que es prometedor para la fabricación de polímeros superabsorbentes. Además, puede ser degradada por un amplio rango de microorganismos presentes en el aire, el agua y el suelo [85].

Recién se ha comprobado la eficacia de la quitina al usarla en la fabricación de microesferas de quitosano (su forma desacetilada), utilizadas para la limpieza de la piel, sustituyendo así a las comunes microesferas de PE, PP o PS [83]. Estas microperlas han mostrado cualidades superiores que las de PE comerciales, en especial en términos de limpieza y biodegradabilidad. Se ha probado que propician una remoción más rápida, en comparación con la del jabón líquido [83].

A pesar de que la tecnología brinda una esperanza para encontrar solución a la polución causada por las partículas de plásticos en los océanos, la realidad es que estos son muy extensos y la cantidad de basura crece en ellos todo el tiempo, por lo que no se debe olvidar la causa del fenómeno. En últimas, se trata de reducir la cantidad de plástico producido y persuadir a las personas de no generar basura [86], al fomentar actividades como el reciclaje, que aunque es una de las estrategias más importantes, solo el 14 % de los paquetes de plástico son colectados, e incluso menos son usados para un uso posterior, debido a pérdidas en clasificación y reprocesamiento [87]. Una solución más eficaz en el mediano y largo plazo es por medio de planes de educación [37].

Es necesario empezar desde el proceso de producción. Al respecto, la Comisión Europea ha empezado a implementar regulaciones para la reducción de la producción de plásticos, en especial de un solo uso. Los Estados miembros deberán reducir el uso de recipientes plásticos para alimentos y bebidas, y para el 2025 se deberá organizar la recolección del 90 % de las botellas plásticas desechables [7]. Esto se puede lograr con el uso de materiales alternativos. Por ejemplo, para los empaques se pueden usar elementos tradicionales como hojas de palma, vidrio, metal y papel [61]. En 2020, Cosmetics Europe aprobó discontinuar el uso de microperlas de plástico; en la actualidad se estudia la posibilidad de usar alternativas naturales como arena y otras sustancias minerales como madera, harina, cáscaras de nuez, ceras y celulosa, las cuales tienen los beneficios de ser naturales y compostables [3].

Por último, es necesario que los gobiernos intervengan con medidas como prohibiciones e impuestos. Por ejemplo, Alemania y Dinamarca adoptaron prohibiciones a la venta de bolsas de plástico desde hace más de dos décadas. En Canadá ya no se fabrican ni venden productos que contengan MP, excepto para productos de cuidado personal, y el 1 de julio de 2019 se prohibieron productos naturales y drogas sin prescripción que contengan microperlas [87].

Conclusiones

Los MP son unos contaminantes distribuidos ampliamente. Para su análisis químico falta la estandarización a todo nivel de los procesos de recolección, caracterización, métodos, modelos, etc.; pero, en general, se recolectan muestras tras las que se llevan a cabo procesos de separación, empleando, sobre todo, la propiedad de densidad, mientras que su identificación y caracterización se realizan mediante técnicas ópticas, espectroscópicas y de pirólisis. Entre las consecuencias para la salud de los ecosistemas y de los seres humanos se encuentran las siguientes: disminución de la energía metabólica, cambios morfológicos, estrés oxidativo, reducción de la población, problemas intestinales, etc., a lo que se suma su gran afinidad con otros

tipos de contaminantes, lo que los convierte en un vector de entrada hacia los organismos, que incrementa los riesgos a la salud.

Sin embargo, hoy la industria cuenta con diversas invenciones que pueden aliviar este problema, desde filtros hasta alternativas al plástico. No se debe olvidar que el gran problema es la producción masiva; la principal solución planteada es disminuir o prohibir su producción y uso. Además de combatir la desinformación generalizada.

Declaración de conflicto de interés: los autores manifiestan no tener conflicto de intereses.

Referencias

- [1] WWF, “Glosario ambiental: ¿Qué es el plástico?”, Consultado: Feb. 04, 2022. [En línea]. Disponible en <https://www.wwf.org.co/?328912/Glosario-ambiental-Que-es-el-plastico>
- [2] C. B. Crawford y B. Quinn, *Microplastic Pollutants*, 2016, DOI: 10.1016/c2015-0-04315-5.
- [3] J. P. Sweetey, “Microplastics: Sources and Solutions”, *Int. J. Mech. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 500-503, 2021.
- [4] H. Böll, Break Free From Plasticity Institute for Global Environmental Strategies, *Plastic Atlas (Asia Edition)*, 2021.
- [5] H. Yang, G. Chen y J. Wang, “Microplastics in the marine environment: Sources, fates, impacts and microbial degradation”, *Toxics*, vol. 9, no. 2, pp. 1-19, 2021, DOI: 10.3390/toxics9020041.
- [6] Greenpeace, “Colombia, mejor sin plásticos”, *Campaña Plásticos*, p. 10, 2018, [En línea]. Disponible en: http://greenpeace.co/pdf/reporte_plasticos.pdf
- [7] A. Kurtela y N. Antolović, “The problem of plastic waste and microplastics in the seas and oceans: Impact on marine organisms”, *Ribar. Croat. J. Fish.*, vol. 77, no. 1, pp. 51-56, 2019, DOI: 10.2478/cjf-2019-0005.
- [8] L. D. Giraldez, F. Braz de Jesús, A. P. Lacerda, L. E. Ferraz, D. A. Moura y D. Gonçalves, “Efectos de los microplásticos en el medio ambiente: Un macroproblema emergente”, *Rev. Cienc. y Tecnol.*, no. 33, pp. 100-107, 2020, DOI: 10.36995/j.recyt.2020.33.013.
- [9] European Commission, “Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment”, Consultado: Apr. 05, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018P-C0340&rid=9#:~:text=Plastic makes up 80-85,on European beaches by counts.>
- [10] M. Bergmann, L. Gutow y M. Klages, “Marine anthropogenic litter”, in *Marine Anthropogenic Litter*, 2015, pp. 245-307, DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3.
- [11] L. Huang *et al.*, “Research progress on microplastics pollution in polar oceans”, *Polar Sci.*, vol. 36, no. April, p. 100946, 2023, DOI: 10.1016/j.polar.2023.100946.
- [12] I. Chubarenko *et al.*, “Microplastics in sea ice: A fingerprint of bubble flotation”, *Sci. Total Environ.*, vol. 892, no. April, 2023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164611.
- [13] J. Ding, C. Sun, C. He, L. Zheng, D. Dai y F. Li, “Atmospheric microplastics in the Northwestern Pacific Ocean: Distribution, source deposition”, *Sci. Total Environ.*, vol. 829, p. 154337, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154337.
- [14] K. W. Lee, W. J. Shim, O. Y. Kwon y J. H. Kang, “Size-dependent effects of micro polystyrene particles in the marine copepod *tigriopus japonicus*”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 19, pp. 11278-11283, 2013, DOI: 10.1021/es401932b.
- [15] A. T. Ta y S. Babel, “Microplastics pollution with heavy metals in the aquaculture zone of the Chao Phraya River Estuary, Thailand”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 161, no. October, p. 111747, 2020, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111747.
- [16] F. A. Jahromi *et al.*, “Source and risk assessment of heavy metals and microplastics in bivalves and coastal sediments of the Northern Persian Gulf, Hormozgan Province”, *Environ. Res.*, vol. 196, no. November 2020, p. 110963, 2021, DOI: 10.1016/j.envres.2021.110963.
- [17] M. Bergmann, L. Gutow y M. Klages, “Marine anthropogenic litter”, in *Marine Anthropogenic Litter*, 2015, pp. 185-200. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3.
- [18] C. J. de M. A. Y. salud pública (MASP), Greenpeace, “Situación actual de Colombia y su impacto en el medio ambiente”, *Greenpeace*, p. 14, 2019, [En línea]. Disponible en: http://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf
- [19] H. A. Leslie, M. J. M. van Velzen, S. H. Brandsma, A. D. Vethaak, J. J. García-Vallejo y M. H. Lamoree, “Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood”, *Environ. Int.*, p. 107199, Mar. 2022, DOI: 10.1016/J.ENVINT.2022.107199.
- [20] A. Ragusa *et al.*, “Deeply in Plasticenta: Presence of Microplastics in the Intracellular Compartment of Human Placentas”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 18, 2022, DOI: 10.3390/ijerph191811593.

- [21] C. Andrade y F. Ovando, “Contenido de microplásticos en centollas Cabo de Hornos”, *An. Inst. Patagon.*, vol. 45, no. 3, pp. 59-65, 2017.
- [22] G. E. De La Torre, D. M. Apaza-Vargas y L. Santillán, “Microplastic ingestion and feeding ecology in three intertidal mollusk species from lima, peru”, *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, vol. 55, no. 2, pp. 167-171, 2020, DOI: 10.22370/rbmo.2020.55.2.2502.
- [23] J. Iannacone, F. Principe, D. Minaya, G. Panduro, M. Carhuapoma y L. Alvarino, “Microplastics in marine fishes of economic importance in Lima, Peru”, *Rev. Investig. Vet. del Peru*, vol. 32, no. 2, 2021, DOI: 10.15381/rivep.v32i2.20038.
- [24] J. A. Quirós-Rodríguez, C. Nisperuza-Pérez y J. Yepes-Escobar, “Los microplásticos, una amenaza para los ecosistemas marinos de Colombia: perspectivas y desafíos a enfrentar”, *Gestión y Ambient.*, vol. 24, no. 1, pp. 1-28, 2021, DOI: 10.15446/ga.v24n1.91615.
- [25] D. Vásquez, A. Molina y G. Duque, “Distribución espacial y aumento a través del tiempo de microplásticos en sedimentos de la Bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano”, *Bol. Invest. Mar. Cost.*, vol. 50, no. 1, pp. 27-42, 2021. DOI: 10.25268/bimc.inve-mar.2021.50.2.1032
- [26] I. Acosta-Coley y J. Olivero-Verbel, “Microplastic resin pellets on an urban tropical beach in Colombia”, *Environ. Monit. Assess.*, vol. 187, no. 7, 2015, DOI: 10.1007/s10661-015-4602-7.
- [27] A. Bellasi, G. Binda, A. Pozzi, G. Boldrocchi y R. Bettinetti, “The extraction of microplastics from sediments: An overview of existing methods and the proposal of a new and green alternative”, *Chemosphere*, vol. 278, p. 130357, 2021, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130357.
- [28] A. B. Silva, A. S. Bastos, C. I. L. Justino, J. P. da Costa, A. C. Duarte y T. A. P. Rocha-Santos, “Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry - A review”, *Anal. Chim. Acta*, vol. 1017, pp. 1-19, 2018, DOI: 10.1016/j.aca.2018.02.043.
- [29] J. Gohla, S. Bračun, G. Gretschel, S. Koblmüller, M. Wagner y C. Pacher, “Potassium carbonate (K₂CO₃) - A cheap, non-toxic and high-density floating solution for microplastic isolation from beach sediments”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 170, no. November 2020, 2021, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112618.
- [30] E. M. Crichton, M. Noël, E. A. Gies y P. S. Ross, “A novel, density-independent and FTIR-compatible approach for the rapid extraction of microplastics from aquatic sediments”, *Anal. Methods*, vol. 9, no. 9, pp. 1419-1428, 2017, DOI: 10.1039/c6ay02733d.
- [31] N. P. Ivleva, “Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods Perspectives”, *Chem. Rev.*, vol. 121, no. 19, pp. 11886-11936, 2021, DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00178.
- [32] G. Erni-Cassola, V. Zadjelovic, M. I. Gibson y J. A. Christie-Oleza, “Distribution of plastic polymer types in the marine environment; A meta-analysis”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 369, no. November 2018, pp. 691-698, 2019, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.067.
- [33] X. Chen *et al.*, “Characterization and source analysis of heavy metals contamination in microplastics by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy”, *Chemosphere*, vol. 287, no. P2, p. 132172, 2022, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132172.
- [34] D. Chen *et al.*, “Rapid characterization of heavy metals in single microplastics by laser induced breakdown spectroscopy”, *Sci. Total Environ.*, vol. 743, p. 140850, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140850.
- [35] G. Kutralam-Muniasamy, F. Pérez-Guevara, I. E. Martínez y V. C. Shruti, “Overview of microplastics pollution with heavy metals: Analytical methods, occurrence, transfer risks and call for standardization”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 415, no. January, 2021, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125755.
- [36] J. C. Álvarez-Zeferino, A. A. Cruz-Salas, A. Vasquez-Morillas y S. Ojeda-Benítez, “Method for quantifying and characterization of microplastics in sand beaches”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 36, no. 1, pp. 151-164, 2020, DOI: 10.20937/RICA.2020.36.53540.
- [37] A. K. Chaudhry y P. Sachdeva, “Microplastics’ origin, distributiony rising hazard to aquatic organisms and human health: Socio-economic insinuations and management solutions”, *Reg. Stud. Mar. Sci.*, vol. 48, p. 102018, 2021, DOI: 10.1016/j.rsma.2021.102018.
- [38] S. L. Wright, R. C. Thompson y T. S. Galloway, “The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review.”, *Environ. Pollut.*, vol. 178, pp. 483-492, 2013, DOI: 10.1016/j.envpol.2013.02.031.
- [39] E. Guzzetti, A. Sureda, S. Tejaday C. Faggio, “Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects”, *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 64, no. November, pp. 164-171, 2018, DOI: 10.1016/j.etap.2018.10.009.
- [40] C. O. Egbeocha, S. Malek, C. U. Emenike y P. Milow, “Feasting on microplastics: Ingestion by and effects on marine organisms”, *Aquat. Biol.*, vol. 27, pp. 93-106, 2018, DOI: 10.3354/ab00701.
- [41] F. P. Dad, W. ud D. Khan, M. B. Kirkham, N. Bolan y M. Tanveer, “Microplastics: a review of their impacts on different life forms and their removal methods”,

- Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 37, pp. 86632-86655, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-28513-w.
- [42] S. Messinetti, S. Mercurio, M. Parolini, M. Sugni y R. Pennati, “Effects of polystyrene microplastics on early stages of two marine invertebrates with different feeding strategies”, *Environ. Pollut.*, vol. 237, pp. 1080-1087, 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2017.11.030.
- [43] C. B. Jeong *et al.*, “Adverse effects of microplastics and oxidative stress-induced MAPK/Nrf2 pathway-mediated defense mechanisms in the marine copepod *Paracyclops nana*”, *Sci. Rep.*, vol. 7, no. December 2016, pp. 1-12, 2017, doi: 10.1038/srep41323.
- [44] H. S. Auta, C. U. Emenike y S. H. Fauziah, “Distribution and importance of microplastics in the marine environment A review of the sources, fate, effects y potential solutions”, *Environ. Int.*, vol. 102, pp. 165-176, 2017, doi: 10.1016/j.envint.2017.02.013.
- [45] K. L. Kaposi, B. Mos, B. P. Kelaher y S. A. Dworjanyn, “Ingestion of microplastic has limited impact on a marine larva”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 3, pp. 1638-1645, 2014, doi: 10.1021/es404295e.
- [46] D. S. Green, B. Boots, J. Sigwart, S. Jiang y C. Rocha, “Effects of conventional and biodegradable microplastics on a marine ecosystem engineer (*Arenicola marina*) and sediment nutrient cycling”, *Environ. Pollut.*, vol. 208, pp. 426-434, 2016, doi: 10.1016/j.envpol.2015.10.010.
- [47] C. Y. Chen, T. H. Lu, Y. F. Yang y C. M. Liao, “Marine mussel-based biomarkers as risk indicators to assess oceanic region-specific microplastics impact potential”, *Ecol. Indic.*, vol. 120, p. 106915, 2021, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106915.
- [48] X. Huang, J. Y. S. Leung, M. Hu, E. G. Xu y Y. Wang, “Microplastics can aggravate the impact of ocean acidification on the health of mussels: Insights from physiological performance, immunity and byssus properties”, *Environ. Pollut.*, vol. 308, no. January, p. 119701, 2022, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119701.
- [49] S. Morgana, C. Gambardella, E. Costa, V. Piazza, F. Garaventa y M. Faimali, *Ecotoxicological Effects of Microplastics in Marine Zooplankton*, no. i. Springer International Publishing, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-45909-3_36.
- [50] R. Pereira, S. M. Rodrigues, D. Silva, V. Freitas, C. M. R. Almeida y S. Ramos, “Microplastic contamination in large migratory fishes collected in the open Atlantic Ocean”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 186, no. October 2022, 2023, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.114454.
- [51] C. Lopes, C. Figueiredo, M. Baptista, M. Caetano, M. M. Santos y J. Raimundo, “First evidence of microplastic ingestion in the ocean giant sunfish (*Mola mola*)”, *Mar. Environ. Res.*, vol. 190, no. June, 2023, doi: 10.1016/j.marenvres.2023.106064.
- [52] X. Zhang *et al.*, “Size-dependent adverse effects of microplastics on intestinal microbiota and metabolic homeostasis in the marine medaka (*Oryzias melastigma*)”, *Environ. Int.*, vol. 151, p. 106452, 2021, doi: 10.1016/j.envint.2021.106452.
- [53] C. Corinaldesi *et al.*, “Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species”, *Commun. Biol.*, vol. 4, no. 1, pp. 1-13, 2021, doi: 10.1038/s42003-021-01961-1.
- [54] A. Batel, L. Baumann, C. C. Carteny, B. Cormier, S. H. Keiter y T. Braunbeck, “Histological, enzymatic and chemical analyses of the potential effects of differently sized microplastic particles upon long-term ingestion in zebrafish (*Danio rerio*)”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 153, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111022.
- [55] H. M. Kang, E. Byeon, H. Jeong, M. S. Kim, Q. Chen y J. S. Lee, “Different effects of nano- and microplastics on oxidative status and gut microbiota in the marine medaka *Oryzias melastigma*”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 405, no. October 2020, p. 124207, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124207.
- [56] N. Khalid *et al.*, “Linking effects of microplastics to ecological impacts in marine environments”, *Chemosphere*, vol. 264, p. 128541, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128541.
- [57] N. Khalid, M. Aqeel, A. Noman, S. M. Khan y N. Akhter, “Interactions and effects of microplastics with heavy metals in aquatic and terrestrial environments”, *Environ. Pollut.*, vol. 290, no. August, p. 118104, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118104.
- [58] C. Díaz-Mendoza, J. Mouthon-Bello, N. L. Pérez-Herrera y S. M. Escobar-Díaz, “Plastics and microplastics, effects on marine coastal areas: a review”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, no. 32, pp. 39913-39922, 2020, doi: 10.1007/s11356-020-10394-y.
- [59] N. P. P. S. Nugawela, A. S. Mahaliyana, G. Abhiram y A. P. Abeygunawardena, “A meta-analytic review of microplastic pollution in the Indian Ocean: Ecological health and seafood safety risk implications”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 193, no. June, p. 115213, 2023, doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115213.
- [60] E. Mahu *et al.*, “Human health risk and food safety implications of microplastic consumption by fish from coastal waters of the eastern equatorial Atlantic Ocean”, *Food Control*, vol. 145, no. October 2022, p. 109503, 2023, doi: 10.1016/j.foodcont.2022.109503.

- [61] E. B. Jadhav, M. S. Sankhla, R. A. Bhat y D. S. Bhagat, “Microplastics from food packaging: An overview of human consumption, health threatsy alternative solutions”, *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 16, no. May, p. 100608, 2021, DOI: 10.1016/j.enmm.2021.100608.
- [62] P. Ebrahimi, S. Abbasi, R. Pashaei, A. Bogusz y P. Oleszczuk, “Investigating impact of physicochemical properties of microplastics on human health: A short bibliometric analysis and review”, *Chemosphere*, vol. 289, no. November 2021, p. 133146, 2022, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133146.
- [63] Y. Lee, J. Cho, J. Sohn y C. Kim, “Health Effects of Microplastic Exposures: Current Issues and Perspectives in South Korea”, *Yonsei Med. J.*, vol. 64, no. 5, pp. 301-308, 2023, DOI: 10.3349/ymj.2023.0048.
- [64] E. C. Emenike *et al.*, “From oceans to dinner plates: The impact of microplastics on human health”, *Helixyon*, vol. 9, no. 10, p. e20440, 2023, DOI: 10.1016/j.helixyon.2023.e20440.
- [65] V. Afreen, K. Hashmi, R. Nasir, A. Saleem, M. I. Khan y M. F. Akhtar, “Adverse health effects and mechanisms of microplastics on female reproductive system: a descriptive review”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 31, pp. 76283-76296, 2023, DOI: 10.1007/s11356-023-27930-1.
- [66] K. Blackburn y D. Green, “The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown”, *Ambio*, vol. 51, no. 3, pp. 518-530, 2022, DOI: 10.1007/s13280-021-01589-9.
- [67] H. Li, F. Wang, J. Li, S. Deng y S. Zhang, “Adsorption of three pesticides on polyethylene microplastics in aqueous solutions: Kinetics, isotherms, thermodynamicsy molecular dynamics simulation”, *Chemosphere*, vol. 264, p. 128556, 2021, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128556.
- [68] A. Bakir, S. J. Rowlandy R. C. Thompson, “Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions”, *Environ. Pollut.*, vol. 185, pp. 16-23, 2014, DOI: 10.1016/j.envpol.2013.10.007.
- [69] B. Chen *et al.*, “Investigation of interfacial adsorption between microplastics and methylparaben in aqueous solution”, *Environ. Geochem. Health*, vol. 45, no. 5, pp. 1695-1709, 2023, DOI: 10.1007/s10653-022-01284-y.
- [70] F. Yu, C. Yang, G. Huang, T. Zhou, Y. Zhao y J. Ma, “Interfacial interaction between diverse microplastics and tetracycline by adsorption in an aqueous solution”, *Sci. Total Environ.*, vol. 721, p. 137729, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137729.
- [71] D. Brennecke, B. Duarte, F. Paiva, I. Caçador y J. Canning-Clode, “Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment”, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 178, pp. 189-195, 2016, DOI: 10.1016/j.ecss.2015.12.003.
- [72] F. Gao *et al.*, “Study on the capability and characteristics of heavy metals enriched on microplastics in marine environment”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 144, no. May, pp. 61-67, 2019, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.04.039.
- [73] F. Wang *et al.*, “Adsorption characteristics of cadmium onto microplastics from aqueous solutions”, *Chemosphere*, vol. 235, pp. 1073-1080, 2019, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.196.
- [74] L. Gao *et al.*, “Microplastics aged in various environmental media exhibited strong sorption to heavy metals in seawater”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 169, no. May, p. 112480, 2021, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112480.
- [75] D. Herzke *et al.*, “Negligible Impact of Ingested Microplastics on Tissue Concentrations of Persistent Organic Pollutants in Northern Fulmars off Coastal Norway”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 4, pp. 1924-1933, 2016, DOI: 10.1021/acs.est.5b04663.
- [76] S. O'Donovan *et al.*, “Ecotoxicological effects of chemical contaminants adsorbed to microplastics in the Clam *Scrobicularia plana*”, *Front. Mar. Sci.*, vol. 5, no. APR, pp. 1-16, 2018, DOI: 10.3389/fmars.2018.00143.
- [77] S. Sun *et al.*, “The toxic impacts of microplastics (MPs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on haematic parameters in a marine bivalve species and their potential mechanisms of action”, *Sci. Total Environ.*, vol. 783, p. 147003, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147003.
- [78] B. Wen *et al.*, “Single and combined effects of microplastics and cadmium on the cadmium accumulation, antioxidant defence and innate immunity of the discus fish (*Symphysodon aequifasciatus*)”, *Environ. Pollut.*, vol. 243, pp. 462-471, 2018, DOI: 10.1016/j.envpol.2018.09.029.
- [79] E. Davarpanah y L. Guilhermino, “Single and combined effects of microplastics and copper on the population growth of the marine microalgae *Tetraselmis chuii*”, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 167, pp. 269-275, 2015, DOI: 10.1016/j.ecss.2015.07.023.
- [80] S. Jinhui, X. Sudong, N. Yan, P. Xia, Q. Jiahao y X. Yongjian, “Effects of microplastics and attached heavy metals on growth, immunity heavy metal accumulation in the yellow seahorse, *Hippocampus kuda bleeker*”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 149, no. June, p. 110510, 2019, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110510.

- [81] N. Badola, A. Bahuguna, Y. Sasson y J. S. Chauhan, “Microplastics removal strategies: A step toward finding the solution”, *Front. Environ. Sci. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 1-18, 2022, doi: 10.1007/s11783-021-1441-3.
- [82] J. Wang, C. Sun, Q. X. Huang, Y. Chi y J. H. Yan, “Adsorption and thermal degradation of microplastics from aqueous solutions by Mg/Zn modified magnetic biochars”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 419, no. April, p. 126486, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126486.
- [83] S. Ju *et al.*, “Biodegradable chito-beads replacing non-biodegradable microplastics for cosmetics”, *Green Chem.*, vol. 23, no. 18, pp. 6953-6965, 2021, doi: 10.1039/d1gc01588e.
- [84] H. M. Wang, T. Q. Yuan, G. Y. Song y R. C. Sun, “Advanced and versatile lignin-derived biodegradable composite film materials toward a sustainable world”, *Green Chem.*, vol. 23, no. 11, pp. 3790-3817, 2021, doi: 10.1039/d1gc00790d.
- [85] J. Chen, J. Wu, P. Raffa, F. Picchioni y C. E. Koning, “Superabsorbent Polymers: From long-established, microplastics generating systems, to sustainable, biodegradable and future proof alternatives”, *Prog. Polym. Sci.*, vol. 125, p. 101475, 2022, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101475.
- [86] J. R. Jambeck *et al.*, “Plastic waste inputs from land into the ocean”, *Science (80)*, vol. 347, no. 6223, pp. 768-771, 2015, doi: 10.1126/science.1260352.
- [87] O. S. Ogunola, O. A. Onada y A. E. Falaye, “Mitigation measures to avert the impacts of plastics and microplastics in the marine environment (a review)”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, no. 10, pp. 9293-9310, 2018, doi: 10.1007/s11356-018-1499-z.

