

Bioindicators: Promising tools for assessing microplastic pollution and its environmental impacts, A Updated review

Marco Huaman Quisocala¹ 

¹Universidad Tecnológica del Perú, UTP, Perú,
U21232055@utp.edu.pe

Abstract—Microplastic (MP) pollution represents a global threat due to its persistence and ability to adsorb pollutants. This work presents a systematic literature review to evaluate the use of bioindicators in marine, terrestrial, and aerial ecosystems. The PICO methodology was used for the search string, and the PRISMA methodology for article selection in the academic databases Scopus and Web of Science (WoS), resulting in a total of 29 scientific articles. Bibliometric analysis was also performed using the Bibliometrix tool in the R statistical software. The results reveal a clear predominance of research in marine ecosystems, which represent the majority of the analyzed sample, followed by terrestrial and aerial environments.

Regarding representative bioindicators by ecosystem, in the marine environment, bivalves such as *Meretrix casta* (55.04 ± 32.15 MPs/g) and cnidarians such as *Actinia equina* and *Cassiopea xamachana* stand out. In terrestrial environments, annelids such as *Eisenia andrei* and freshwater fish such as *Squalius vardarensis* stand out in lotic systems, while in the air, birds such as *Apus apus* (1.92 ± 0.72 MPs/Ind) are prominent. Regarding flora, the species *Acanthus ilicifolius* exhibits the highest bioaccumulation recorded in mangrove areas. Morphological analysis confirms that fibers are the predominant form in all the biotic matrices evaluated. However, despite the suitability of these organisms for environmental monitoring, the review reveals that the lack of standardized protocols hinders the comparison of results between regions. Therefore, the urgent need to implement uniform methodologies in future research is highlighted.

Keywords— MPs; bioindicators; environmental pollution; fibers; ecosystems.

Bioindicadores: Herramientas Prometedoras Para Evaluar La Contaminación Por Microplásticos y Sus Efectos Ambientales, Una Revisión Actualizada

Marco Huaman Quisocala¹ 

¹Universidad Tecnológica del Perú, UTP, Perú,
U21232055@utp.edu.pe

Resumen - La contaminación por microplásticos (MPs) representa una amenaza global debido a su persistencia y capacidad de adsorber contaminantes. Este trabajo realiza una revisión sistemática de literatura para evaluar el uso de bioindicadores en los ecosistemas marinos, terrestres y aéreos. Se empleó la metodología PICO para la cadena de búsqueda y la metodología PRISMA para la selección de artículos en las bases académicas Scopus y Web of Science (WoS), seleccionando un total de 29 artículos científicos. Asimismo, se realizó el análisis bibliométrico mediante la herramienta Bibliometrix en el software estadístico R. Los resultados revelan una clara predominancia de investigaciones en ecosistemas marinos, los cuales representan la mayor parte de la muestra analizada, seguidos por los entornos terrestres y aéreos.

En cuanto a los bioindicadores representativos por ecosistema, en el ámbito marino sobresalen bivalvos como *Meretrix casta* (55.04 ± 32.15 MPs/g) y cnidarios como *Actinia equina* o *Cassiopea xamachana*. En el entorno terrestre, destacan anélidos como *Eisenia andrei* y peces de agua dulce como *Squalius vardarensis* en sistemas lóticos, mientras que en el aéreo se distinguen aves como *Apus apus* (1.92 ± 0.72 MPs/Ind). Respecto a la flora, la especie *Acanthus ilicifolius* presenta la mayor bioacumulación registrada en zonas de manglares. El análisis morfológico confirma que las fibras constituyen la forma predominante en todas las matrices bióticas evaluadas. No obstante, a pesar de la idoneidad de estos organismos para el monitoreo ambiental, la revisión evidencia que la carencia de protocolos estandarizados dificulta la comparación de resultados entre regiones. Por ello, se concluye la urgencia de implementar metodologías uniformes en las futuras investigaciones.

Palabras clave: Mps; bioindicadores; contaminación ambiental; fibras; ecosistemas

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la contaminación por MPs ha aumentado de forma significativa, alcanzando niveles críticos que comprometen la integridad de los ecosistemas y la salud de diversos organismos a escala global. Este fenómeno está estrechamente vinculado al incremento exponencial en la producción de plásticos, que constituye una amenaza ambiental y ecológica de gran magnitud. En 2022, la producción global de plásticos ascendió a 400 millones de toneladas métricas (Mt), de las cuales únicamente 18.5 Mt fueron recicladas [1].

Según las proyecciones, la producción mundial de plásticos, que ha mantenido una tasa de crecimiento anual promedio del 8.4% desde 1950, alcanzó los 360 Mt en 2018. Se estima que esta cifra se elevará a 500 Mt en 2025 y podría superar los 1.200 Mt hacia 2050 [2].

Los microplásticos (MPs) son micropartículas derivadas de polímeros sintéticos, definidas por presentar dimensiones inferiores a los 5 milímetros en todos sus ejes [3–4]. Se distinguen dos tipos principales: los MPs primarios, diseñados intencionalmente con ese tamaño para usos industriales o cosméticos, y los secundarios, resultantes de la fragmentación progresiva de objetos plásticos de mayor tamaño debido a procesos de desgaste físico, fotodegradación o acción biológica [5–6].

Los MPs exhiben una notable persistencia en el medio ambiente, atribuible a su alta durabilidad, estabilidad química, naturaleza hidrofóbica, estructura tridimensional compleja, elevado peso molecular y resistencia a los mecanismos naturales de biodegradación [7].

El impacto de los MPs varía entre los organismos y puede resultar en una variedad de efectos dañinos, que incluyen bloqueo de los aparatos de filtración o los intestinos, estrés oxidativo, reducción de la asignación de energía, inflamación, inestabilidad de la membrana lisosomal, alteraciones de las vías metabólicas, expresión génica, comportamiento de alimentación y nado, respuestas inmunológicas, y más [8].

Frente al incremento sostenido de la contaminación por plásticos, resulta urgente implementar medidas preventivas orientadas a mitigar la liberación de estos materiales en el ambiente, particularmente en lo que respecta a las vías de escape de los macroplásticos, MPs y nanoplasticos (NPs) [9]. Además, es evidente que existen deficiencias sustanciales en la investigación relacionada con la contaminación por MPs, lo que subraya la necesidad urgente de investigaciones profundas y exhaustivas en estas áreas [10].

En este contexto, el uso de bioindicadores representa una herramienta eficaz para identificar los impactos biológicos, monitorear la presencia de contaminantes y detectar efectos tóxicos en etapas tempranas, tanto en organismos vegetales

como en humanos. Gracias a su sensibilidad ante los cambios ambientales, estos organismos permiten predecir el estado ecológico de un entorno e inferir el grado y la extensión de la contaminación [11]. Asimismo, tienen un gran potencial para reflejar distribuciones, historia de vida y comportamiento en relación con las características ambientales o respuestas fisiológicas [12].

Por ejemplo, en el mar Mediterráneo es el molusco *Mytilus galloprovincialis*, considerado como un bioindicador apropiado para la detección de contaminantes [13]. También, en Madrid, España, se considera el ave *Delichom urbicum* como un potencial bioindicador de la contaminación atmosférica por MPs, por su presencia en sus sistemas respiratorios [14].

Se identificaron 10 revisiones sistemáticas de literatura que abordan la aplicación de bioindicadores para la detección de MPs en ambientes naturales [15-24]. Estas revisiones exploran diversos enfoques metodológicos y contextos ecológicos, reflejando el creciente interés científico en evaluar la presencia e impacto ambiental de los MPs.

La fragmentación de la información actual impide realizar comparaciones globales y evaluar la eficacia de los bioindicadores según las condiciones climáticas y geográficas de cada región. Esta carencia de análisis comparativos limita la selección de especies idóneas para cada contexto ambiental, dificultando a su vez la estimación precisa de riesgos para la salud humana y la transferencia de contaminantes en la cadena alimentaria.

Ante estas limitaciones, esta revisión sistemática tiene como objetivo identificar y analizar los bioindicadores más eficaces, clasificándolos estrictamente por clima y región geográfica. Se busca proporcionar un marco de referencia integral que optimice la selección del organismo adecuado para cada entorno, fortaleciendo así la evaluación del impacto de los microplásticos en la salud pública.

II. METODOLOGÍA

A. Metodología PICO

En el presente estudio, se utilizó la metodología PICO (Población/Problema, Intervención, Comparación, Resultados y Contexto) con el fin de implementar estrategias de búsqueda efectivas en las bases de datos SCOPUS y Web of Science. Además, se formuló una pregunta de revisión general, que luego se desagregó en preguntas específicas para cada componente de PICO.

RQ1: ¿Qué especies bioindicadoras presentan mayor concentración de MPs/gr?

RQ2: ¿Qué especies bioindicadoras presentan mayores concentraciones de MPs por individuo?

RQ3: ¿Cuál es la morfología de MPs más prevalente en especies bioindicadoras marinas?

Tras la formulación de las preguntas de investigación, se identificaron las palabras clave asociadas a cada componente. La Tabla 1 presenta el "Problema", que se define como "Microplásticos". La "Intervención" describe el uso de "bioindicadores" en la evaluación y detección de MPs. El "Resultado" describe el impacto de los bioindicadores en la reducción de la "contaminación" por MPs. Por último, el "Contexto" describe los entornos de trabajo relevantes, en este caso, el medio ambiente. La Tabla I presenta los componentes de la metodología "PICO" y las palabras claves identificadas.

TABLA I
COMPONENTES PICO

	COMPONENTES PICO	Palabras Clave	Keywords
P	Problema	Microplastics	Microplastics OR Nanoplastics OR "Microscopic plastic contaminants"
I	Intervención	Bioindicators	Bioindicators OR Biomarkers
C	Comparación	-	-
O	Resultados	Pollution	Pollution Control
C	Contexto	Enviroment	enviroments OR ecosystem

B. Metodología PRISMA

Las directrices de reporte PRISMA (Elementos de Reporte Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis) están diseñadas para mejorar la presentación de informes de revisiones sistemáticas y ayudar a los autores a informar detalladamente sobre el motivo de su revisión sistemática, los métodos utilizados y los hallazgos encontrado [31]. Se definieron los criterios de inclusión y exclusión para realizar la selección de los estudios encontrados, los cuales serán aplicados en las etapas de análisis. Estos criterios se detallan en la Tabla II.

TABLA II
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ARTÍCULOS

CRITERIOS DE INCLUSIÓN		CRITERIOS DE EXCLUSIÓN	
CI1	El título o resumen contiene una o más de las palabras claves del estudio.	CE1	Estudios que aborden el tema de los MPs pero, que no involucren el uso de bioindicadores
CI2	Los estudios muestran resultados cuantitativos y datos empíricos o experimentales <i>in situ</i> .	CE2	Estudios realizados <i>in vitro</i>
CI3	Estudios que analicen la relación entre la presencia de los MPs y los bioindicadores en el medio ambiente.	CE3	Estudios que no consideren los impactos negativos de los MPs en el medio ambiente y en la salud humana
CI4	Estudios que evalúen la influencia de factores ambientales en la funcionalidad de los bioindicadores.	CE4	Estudios que no están habilitados en su versión completa.
CI5	Estudios que incluyan comparaciones entre especies bioindicadoras y tipos de biomarcadores.	CE5	Estudios cuyo enfoque está centrado en el tratamiento de agua o residuos.

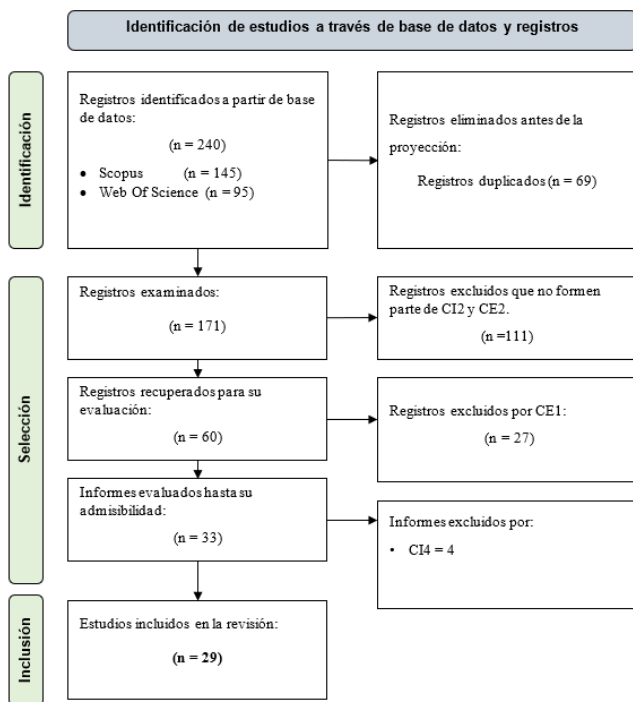


Figura 1. Diagrama PRISMA

C. Análisis Bibliométrico

Para el análisis bibliométrico, se empleó el lenguaje de programación R a través del entorno RStudio, utilizando el paquete especializado bibliometrix y su aplicación web interactiva Biblioshiny. Esta herramienta permitió realizar el análisis cuantitativo para identificar tendencias, evaluar la influencia de autores y fuentes relevantes, así como detectar vacíos de investigación.

Como base de datos, se utilizó la ecuación de cadena de búsqueda, obteniéndose 145 artículos de la base de datos Scopus y 95 artículos de Web of Science (WoS). Para el estudio, se consideraron parámetros bibliométricos clave como el año de publicación, país, autoría, cantidad de citas y análisis de palabras clave.

III. RESULTADOS

RQ1: ¿Qué especies bioindicadoras presentan mayor concentración de MPs/gr?

El análisis revela una marcada heterogeneidad en la bioacumulación (Tabla 3). El ave *Otus sunia* presenta la mayor carga (416.22 MPs/g en tejido pulmonar [25]), seguida por la larva bentónica *Chironomus sp.* (291.76 MPs/g [30]) y *Gallus domesticus* (129.8 MPs/g [20]). Estos valores superan ampliamente a los bioindicadores marinos tradicionales, evidenciando una mayor acumulación en organismos de interfaces complejas (aire-tierra o sedimento-agua) frente a especies pelágicas. Aunque la variabilidad metodológica (peso seco vs. húmedo) exige cautela, la magnitud de estas concentraciones confirma su alta sensibilidad, consolidándolas como herramientas prioritarias para el monitoreo en zonas de alta presión antropogénica.

TABLA III
CONCENTRACIÓN DE MICROPLÁSTICOS (MPs/GR) EN ESPECIES BIOINDICADORAS

Autores	Especie	Concentración (MPs/gr)	Base de Peso
[25]	<i>Otus sunia</i>	416.22	No especifica
[30]	<i>Chironomus sp.</i>	291.76 ± 26.55	Peso húmedo
[20]	<i>Gallus domesticus</i>	129.8 ± 82.3	No especifica
[45]	<i>Meretrix casta</i>	77.39 ± 17.47	No especifica
[23]	<i>Ostrea edulis</i>	42.3	No especifica
[26]	<i>Bivalvia spp.</i>	37	Peso seco
[17]	<i>Amiantis purpuratus</i>	20	No especifica
[31]	<i>Dreissena sp.</i>	8.4 ± 23.0	Peso húmedo
[36]	<i>Odontesthes spp.</i>	1.6	Peso húmedo
[28]	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	1.11 ± 0.92	Peso húmedo
[41]	<i>Trisopterus luscus</i>	0.60 ± 1.57	No especifica
[36]	<i>Aulacomya atra</i>	0.3	Peso húmedo

RQ2: ¿Qué especies bioindicadoras presentan mayores concentraciones de MPs por individuo?

La carga de MPs por individuo resalta la retención acumulada en organismos de mayor biomasa y nivel trófico (Tabla 4). Los vertebrados marinos lideran esta métrica: el cetáceo *Mesoplodon mirus* presenta la mayor abundancia (88 MPs/Ind [22]), seguido por los peces costeros *Liza aurata* y *Sarpa salpa* (65 MPs/Ind [16]). Esto revela una estratificación ecológica ligada al tamaño corporal. Mientras la megafauna marina actúa como un gran reservorio absoluto, organismos menores como *Callinectes sapidus* [19] o *Chironomus sp.* [33] muestran valores muy bajos (1.1 - 2.5 MPs/Ind). En consecuencia, aunque las especies pequeñas sufren alta saturación por gramo (RQ1), la carga neta total depende fundamentalmente de la capacidad de ingestión y longevidad de los depredadores superiores.

TABLA IV
CONCENTRACIÓN DE MICROPLÁSTICOS (MPs/IND) EN ESPECIES BIOINDICADORAS

Autores	Especie (Nombre Científico)	Concentración Media (MPs/Ind)
[22]	<i>Mesoplodon mirus</i> (Zifio)	88
[16]	<i>Liza aurata</i> y <i>Sarpa salpa</i>	65
[46]	<i>Phocidae</i> (Focas)	34 ± 23
[34]	<i>Anemonia viridis</i>	17.5 ± 4.0
[15]	<i>Nephrops norvegicus</i>	13.08 ± 13.49
[28]	<i>Ompok pabda</i>	11.5 ± 1.87
[31]	<i>Larus michahellis</i> (Gaviota)	4.61 ± 2.71
[32]	<i>Nephrops norvegicus</i>	3.66 ± 3.47
[19]	<i>Callinectes sapidus</i>	2.5 ± 1.6
[37]	No específica (Fauna marina)	1.1 – 2.4
[14]	<i>Apus apus</i> (Vencejo)	1.92 ± 0.72
[38]	No específica (Fauna marina)	1.7 ± 0.2
[36]	No específica (Fauna marina)	1.54 ± 2.68
[33]	<i>Chironomus sp.</i>	1.1 ± 0.3

RQ3: ¿Cuál es la morfología de MPs más prevalente en especies bioindicadoras marinas?

Las características físicas de los MPs revelan una clara hegemonía de las fibras en la mayoría de los bioindicadores (Tabla 5). Diversos estudios [14, 15, 19] reportan consistentemente esta forma como la más abundante, alcanzando hasta un 100% de prevalencia en tamaños que varían desde <5 µm [17] hasta >2 mm [14]. Como excepción, el estudio [24] reporta una predominancia de films y pellets (20-500 µm), desplazando a las fibras. Esta discrepancia sugiere que la interacción biológica y el medio de exposición (aéreo vs. acuático) actúan como filtros selectivos que determinan qué tipo de partícula bioacumula el organismo.

TABLA V
FORMAS PREDOMINANTES Y TAMAÑO DE MICROPLÁSTICOS EN ESPECIES BIOINDICADORAS MARINAS

Autores	Tamaño de los MPs	Forma de los MPs
[40]	No especificado	Fibra (predominante)
[14]	50.1 µm a 2157.3 µm	Fibra (100%)
[15]	0.045 mm a 53.88 mm	Fibra (predominante)
[16]	0.0002 mm a 5.0 mm	Fibra y fragmento (predominantes)
[17]	< 5 µm	Fibra (predominante)
[19]	0.01 mm a 5.0 mm	Fibra (predominante)
[21]	1 µm a 5 mm	Fibra (predominante)
[25]	0.01 mm a 5.0 mm	Fibra (predominante)
[28]	0.01 mm a 5.0 mm	Fibra (predominante)
[24]	20 µm – 500 µm	Films y Pellets

A. Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico incluyó 726 publicaciones distribuidas en: artículos (442), revisiones (220), capítulos de libro (36), libros (23), artículos retraídos (2), encuestas cortas (1), notas (1), editoriales (1) y artículos de conferencia, abarcando el período 2020-2025.

B. Mapa de red bibliométrica

El presente mapa de red bibliométrica muestra la conformación de dos grandes agrupaciones temáticas. El clúster rojo concentra la investigación sobre la naturaleza del contaminante (chemical, microplastic) y su toxicidad en organismos no humanos (nonhuman). Por su parte, el grupo azul desplaza el foco hacia la gestión, articulándose en torno a la vigilancia ambiental y la evaluación de riesgos con énfasis en la salud humana.

La fuerte interconexión entre ambos grupos nos revela que la ciencia ha dejado de estudiar los microplásticos como objetos aislados para entenderlos dentro de un contexto vivo. Esto sugiere una investigación mucho más madura, ha pasado de simplemente detectar partículas en el agua a preocuparse genuinamente por cómo su presencia en el medio ambiente termina conectando con nuestro propio bienestar y salud cotidiana.

superiores, los cuales enfrentan riesgos de biomagnificación mucho más agudos.

El análisis morfológico confirma la hegemonía de las fibras en el medio acuático, reportada consistentemente a través de distintos niveles tróficos en los estudios [15, 16, 17, 19, 21, 25, 28, 40], alcanzando incluso una prevalencia del 100% en [14]. Esta tendencia persiste en depredadores tope; [46] detectaron fibras de nylon y poliéster en la totalidad de las heces de foca gris (*Halichoerus grypus*), validando la bioacumulación por ingestión. Asimismo, en el bento, [47] demostraron que la anémona (*Actinia equina*) actúa como una trampa selectiva para fracciones finas (<0.5 mm) y una alta diversidad de polímeros que escapan al monitoreo estándar. Este patrón acuático contrasta drásticamente con la vía aérea descrita en [24], donde los pulmones de aves filtran las fibras y acumulan preferentemente films y pellets, evidenciando que la morfología del contaminante retenido depende estrictamente de la vía de exposición (digestiva vs. respiratoria).

A. Implicancias para Políticas Públicas y Monitoreo Ambiental

Con base en los resultados de esta revisión, se plantean tres implicancias concretas para optimizar el monitoreo ambiental. Primero, es urgente implementar metodologías uniformes, ya que la actual carencia de protocolos estandarizados dificulta la comparación de resultados entre regiones y limita las evaluaciones globales.

Segundo, los programas de vigilancia deben diversificar sus bioindicadores para no subestimar la contaminación. Al demostrarse que los bivalvos marinos presentan concentraciones comparativamente bajas, las políticas de monitoreo deben incorporar especies de interfaces (como *Otus sunia* y *Chironomus* sp.) y anfibios, los cuales han demostrado ser vectores críticos para medir la biomagnificación en ecosistemas de transición.

Finalmente, las políticas públicas deben superar la fragmentación actual del campo de estudio. Tal como evidencia el análisis factorial, es necesario conectar los hallazgos biológicos a nivel microscópico (como el estrés oxidativo) directamente con la gestión macroscópica y la evaluación de riesgos ambientales.

V. CONCLUSIONES

-El análisis por gramo demuestra que especies de interfase, como el ave *Otus sunia* y larvas bentónicas, superan drásticamente la bioacumulación de los bivalvos tradicionales. Esta saturación, confirmada en aves limícolas como *Calidris alpina*, valida su rol prioritario para detectar focos críticos en sedimentos y aire, revelando niveles de exposición muy superiores a los de la columna de agua.

-Aunque la megafauna marina lidera la carga absoluta, los anfibios emergen como vectores críticos en ecosistemas de transición, superando la retención individual de crustáceos y bivalvos comerciales. Esto evidencia que la presión en agua dulce es tan aguda como la marina, advirtiendo sobre riesgos de biomagnificación usualmente subestimados por los indicadores clásicos.

-Existe una dicotomía morfológica según la vía de exposición: el medio acuático presenta una hegemonía de fibras desde invertebrados hasta focas, mientras que el sistema respiratorio aviar filtra y retiene films y pellets. Además, organismos sésiles como las anémonas capturan fracciones finas y diversidad química únicas, demostrando que la morfología retenida depende estrictamente del hábitat y la fisiología.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi gratitud a la Universidad Tecnológica del Perú (UTP) por el respaldo institucional brindado para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradezco al Profesor Lorgio Valdiviezo Gonzales por su valiosa guía y orientación académica. Finalmente, deseo expresar mi profundo agradecimiento a Leandra Monserrat por su apoyo, motivación constante y por la especial importancia que ha tenido en mi vida durante este proceso. Su influencia y confianza en mí fueron fundamentales para encontrar la determinación necesaria para culminar y presentar este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Huang, S., Wang, H., Ahmad, W., Ahmad, A., Vatin, N. I., Mohamed, A. M., Deifalla, A. F., & Mehmood, I. (2022). Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4556.
- [2] Shukla, S., Khanna, S., & Khanna, K. (2023). Unveiling the toxicity of micro-nanoplastics: A systematic exploration of understanding environmental and health implications. *Science of The Total Environment*, 884, 163836.
- [3] European Union. (2023). Commission Regulation (EU) 2023/2055 of 25 September 2023 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards synthetic polymer microparticles. *Official Journal of the European Union*, L 239, 67–89.
- [4] Sendra, M., Sparaventi, E., Novoa, B., & Figueras, A. (2021). An overview of the internalization and effects of microplastics and nanoplastics as pollutants of emerging concern in bivalves. *Science of The Total Environment*, 753, 142024.
- [5] Mir, M.A., Khan, M.A., Banik, B.K., Andrews, K., & Abba, S.I. (2025). Microplastics in food products: Prevalence, artificial intelligence-based detection, and potential health impacts on humans. *Emerging Contaminants*, 11(2), 100477.
- [6] Dey, S., Sen, K., Saha, N. C., & Saha, S. (2025). Analytical approaches for quantifying and characterizing microplastics: Environmental impacts and bioaccumulation in aquatic systems. *Green Analytical Chemistry*, 12, 100191.
- [7] Yang, H., Niu, S., Guo, M., & Xue, Y. (2025). A critical review of the ecotoxic effects of microplastics on aquatic, soil and atmospheric ecosystems and current research challenges. *Environmental Research*, 274, 121361.
- [8] Ortiz-Moriano, M. P., Garcia-Vazquez, E., & Machado-Schiaffino, G. (2025). Genes of filter-feeding species as a potential toolkit for monitoring microplastic impacts. *Aquatic Toxicology*, 279, 107234.

- [9] Dokl, M., Copot, A., Krajnc, D., Kravanja, Z., & Čuček, L. (2024). *Global projections of plastic use, end-of-life fate and potential changes in consumption, reduction, recycling and replacement with bioplastics to 2050. Sustainable Production and Consumption*, 51, 498–518.
- [10] Impellitteri, F., Multisanti, C. R., Rusanova, P., Piccione, G., Falco, F., & Faggio, C. (2023). *Exploring the impact of contaminants of emerging concern on fish and invertebrates physiology in the Mediterranean Sea. Toxics*, 11(1), 80.
- [11] Offiong, N.-A. O., Okop, I. J., Shaibu, S. E., Adegboyega, T. A., & Benson, N. U. (2025). Bioindicators for monitoring atmospheric perfluorinated compounds: Review of occurrences, transport, fate and analytical protocols. *Environmental Chemistry*, 22(2), EN24083.
- [12] Maznikova, V. N., Ormerod, S. J., & Gómez-Serrano, M. A. (2024). *Birds as bioindicators of river pollution and beyond: Specific and general lessons from an apex predator. Ecological Indicators*, 158, 111366.
- [13] Impellitteri, F., Multisanti, C. R., Rusanova, P., Piccione, G., Falco, F., & Faggio, C. (2023). Exploring the impact of contaminants of emerging concern on fish and invertebrates physiology in the Mediterranean Sea. *Biology*, 12(767), 1-16.
- [14] Wayman, C., Fernandez-Piñas, F., Fernández-Valeriano, R., Anibarro García-Baquero, G., Lopez-Márquez, I., Gonzalez-Gonzalez, F., Rosal, R., & Gonzalez-Pleiter, M. (2024). *The potential use of birds as bioindicators of suspended atmospheric microplastics and artificial fibers. Environmental Pollution*, 345, 122357.
- [15] Joyce, H., Nash, R., Frias, J., White, J., Cau, A., Carreras-Colom, E., & Kavanagh, F. (2023). Monitoring microplastic pollution: The potential and limitations of *Nephrops norvegicus*. *Ecological Indicators*, 154, 110441.
- [16] Garcés-Ordóñez, O., Saldarriaga-Vélez, J. F., Espinosa-Díaz, L. F., Canals, M., Sanchez-Vidal, A., & Thiel, M. (2022). A systematic review on microplastic pollution in water, sediments, and organisms from 50 coastal lagoons across the globe. *Environmental Pollution*, 315, 120366.
- [17] Ding, J., Sun, C., Li, J., Shi, H., Xu, X., Ju, P., Jiang, F., & Li, F. (2022). Microplastics in global bivalve mollusks: A call for protocol standardization. *Journal of Hazardous Materials*, 438, 129490.
- [18] Khanjani, M. H., Sharifinia, M., & Mohammadi, A. R. (2023). The impact of microplastics on bivalve mollusks: A bibliometric and scientific review. *Marine Pollution Bulletin*, 194(Part A), 115271.
- [19] Bruschi, R., Pastorino, P., Barceló, D., & Renzi, M. (2023). Microplastic levels and sentinel species used to monitor the environmental quality of lagoons: A state of the art in Italy. *Ecological Indicators*, 154, 110596.
- [20] Mansfield, I., Reynolds, S. J., Lynch, I., Matthews, T. J., & Sadler, J. P. (2024). Birds as bioindicators of plastic pollution in terrestrial and freshwater environments: A 30-year review. *Environmental Pollution*, 348, 123790.
- [21] Carrasco, L., Jiménez-Mora, E., Utrilla, M. J., Téllez Pizarro, I., Reglero, M. M., Rico-San Román, L., & Martín-Maldonado, B. (2024). Birds as bioindicators: Revealing the widespread impact of microplastics.
- [22] Zantis, L. J., Carroll, E. L., Nelms, S. E., & Bosker, T. (2021). Marine mammals and microplastics: A systematic review and call for standardisation. *Environmental Pollution*, 269, 116142.
- [23] Fehrenbach, G. W., Murphy, E., Tanoeiro, J. R., Pogue, R., & Major, I. (2025). Monitoring water contamination through shellfish: A systematic review of biomarkers, species selection, and host response. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 295, 118120.
- [24] Wang, M., Zhou, P., DuBay, S., Zhang, S., Yang, Z., Wang, Y., Zhang, J., Cao, Y., Hu, Z., He, X., Wang, S., Li, M., Fan, C., Zou, B., Zhou, C., & Wu, Y. (2025). Assessing microplastic and nanoplastic contamination in bird lungs: Evidence of ecological risks and bioindicator potential. *Journal of Hazardous Materials*, 487, 137274.
- [25] Provenza, F., Rampih, D., Pignatelli, S., Pastorino, P., Barceló, D., Prearo, M., Specchiulli, A., & Renzi, M. (2022). Mussel watch program for microplastics in the Mediterranean sea: Identification of biomarkers of exposure using *Mytilus galloprovincialis*.
- [26] Trestrail, C., Nugegoda, D., & Shimeta, J. (2020). Invertebrate responses to microplastic ingestion: Reviewing the role of the antioxidant system. *Science of the Total Environment*, 734, 138559.
- [27] Pizzurro, F., Recchi, S., Nerone, E., Salini, R., & Barile, N. B. (2022). *Accumulation evaluation of potential microplastic particles in Mytilus galloprovincialis from the Goro Sacca (Adriatic Sea, Italy).*
- [28] Mondal, M. T., Khan, M. A., & Mortuza, M. G. (2025). *Microplastic pollution in indigenous fish from the Padma River, Bangladesh: A case study.*
- [29] Akindele, E. O., Ehlers, S. M., & Koop, J. H. E. (2020). Freshwater insects of different feeding guilds ingest microplastics in two Gulf of Guinea tributaries in Nigeria. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(30), 33373–33379.
- [30] Hoellein, T. J., Rovegno, C., Uhrin, A. V., Johnson, E., & Herring, C. (2021). Microplastics in invasive freshwater mussels (*Dreissena* sp.): Spatiotemporal variation and occurrence with chemical contaminants. *Frontiers in Marine Science*, 8, 690401.
- [31] Max, A., et al. (2025). Microplastics in stomach contents of urban yellow-legged gull chicks (*Larus michahellis*) from Barcelona, Spain. *Marine Pollution Bulletin*, 211, 117409.
- [32] Joyce, H., Frias, J., Kavanagh, F., Lynch, R., Pagter, E., White, J., & Nash, R. (2022). Plastics, prawns, and patterns: Microplastic loadings in *Nephrops norvegicus* and surrounding habitat in the North East Atlantic.
- [33] Khedre, A. M., Ramadan, S. A., Ashry, A., & Alaraby, M. (2023). *Seasonal variations of microplastic in sediment, Chironomus sp. larvae, and chironomid tubes in two wastewater sites in Sohag Governorate, Egypt.*
- [34] Savage, G., Porter, A., & Simpson, S. D. (2022). *Uptake of microplastics by the snakelocks anemone (Anemonia viridis) is commonplace across environmental conditions.*
- [35] Ríos, N., Hernández-Moresino, R. D., & Galván, D. E. (2020). Microplastics in different environmental matrices from the Nuevo Gulf (Patagonia, Argentina): First study and comparison. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111284.
- [36] Praved, P. H., Neethu, K. V., Bijoy Nandan, S., Deepak Sankar, N., Aravind, E. H., Sebastian, S., Marigoudar, S. R., & Sharma, K. V. (2024). Evaluation of microplastic pollution and risk assessment in a tropical monsoonal estuary, with special emphasis on contamination in jellyfish. *Environmental Pollution*, 343, 123158.
- [37] Iliff, S. M., Lowman, H. E., & Burnaford, J. L. (2020). Abundance and composition of microplastics in *Cassiopea xamachana* from the Florida Keys and Florida's Gulf and Atlantic coasts. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111756.
- [38] Koutsikos, N., Vardakas, L., Kalogianni, E., & Zogaris, S. (2023). Microplastic ingestion by the endemic freshwater fish *Squalius vardarensis* (Karaman, 1928) in a Mediterranean river. *Marine and Freshwater Research*, 74(11), 933-942.
- [39] Lourenço, S. C., Aleluia, A. A. M. R. A., Barboza, L. G. A., Otero, X. L., Cunha, S. C., Fernandes, J. O., & Guilhermino, L. (2025). *Microplastic contamination and biological alterations in Atlantic wild fish populations, and human health risks associated to fillet consumption.*
- [40] Al-Tarshi, M., Husband, J., & Dobretsov, S. (2025). Evaluating microplastic contamination in Omani mangrove habitats using large mud snails (*Terebralia palustris*).
- [41] Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n160.
- [42] Liu, W., Zhao, C., Zhang, P., Liang, T., Huang, Q., Liu, Y. & Liu, X. (2025). *Effects of microplastics on energy accumulation in a migratory shorebird in the coastal wetlands of the Yellow Sea, China. Journal of Hazardous Materials*, 488, 137386.
- [43] Shetu, M. H., Parvin, F., & Tareq, S. M. (2023). Identifying the presence of microplastics in frogs from the largest delta of the world. *Environmental Advances*, 11, 100355.
- [44] Ding, J., Sun, C., He, C., Li, J., Ju, P., & Li, F. (2021). Microplastics in four bivalve species and basis for using bivalves as bioindicators of microplastic pollution. *Science of the Total Environment*, 782, 146830.
- [45] Naidu, B. C., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P., Jaiswar, A. K., & Nayak, B. B. (2022). Microplastics in the foreshore coastal waters, sediment, and coastal fauna of a highly populated megacity – A study on the effect of anthropogenic discharge on clams. *Marine Pollution Bulletin*, 185(Part A), 114262.

- [46]Hogan, S., Wood, S., & Urban-Rich, J. (2025). Changes in the abundance, concentration, and composition of the microplastics and fibers in gray seals (*Halichoerus grypus atlantica*) scat on Nantucket Island in July and November 2019 and January 2020. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 117893.
- [47]Tümerkan, E. T. A., Köse, E., Aksu, S., Mol, O., Kantamaneni, K., Başkurt, S., Çınar, E., & Emiroğlu, Ö. (2024). *Beadlet anemone: A novel bio-indicator of microplastic pollution in the marine environment. Journal of Environmental Management*, 349, 119538.