Check for updates
Revisión
Revista Actualidades Biológicas
Actual. Biol. 47(122): e4702, 2025 | Enero-Junio | Medellin | DOI:10.17533/udea.acbi/v47n122a02

Estado actual del conocimiento sobre el efecto de los microplásticos en comunidades de macroinvertebrados de ecosistemas lóticos

Current state of knowledge on the effect of microplastics on macroinvertebrate communities in lotic ecosystems

Karem Valentina Rodriguez-Calvache[1*], Luz Nidia Gil-Padilla[1], Nidya Alexandra Segura Guerrero[2]

Resumen

La producción mundial de plástico asciende a 6300 millones de toneladas, lo cual influye grandemente en la creciente contaminación por productos plásticos, originando un problema que afecta de diferentes maneras los ecosistemas, especialmente los de agua dulce, identificados recientemente como los principales sumideros de partículas plásticas ya que se encuentran directamente expuestos a los asentamientos humanos y por consiguiente a actividades antrópicas. La incorporación de microplásticos en la base de la red alimentaria se realiza a través de su ingestión por parte de macroinvertebrados de diferentes grupos funcionales, como (i) filtradores: *Daphnia magna*, (ii) trituradores: *Gammarus pulex* y *Hyalella azteca*, (iii) recolectores: *Culex pipiens*, *Chironomus riparius*, *Chironomus tepperi* y (iv) herbívoros como el caracol *Physella acuta*, lo cual puede conllevar al bloqueo del tracto digestivo, aumentar la mortalidad, disminuir la fecundidad, provocar respuestas inflamatorias, alterar el metabolismo, interrumpir la reproducción, cambiar el comportamiento y diesmar las reservas energéticas. En consecuencia, los microplásticos representan una amenaza para las comunidades de macroinvertebrados con graves consecuencias a nivel ecosistémico. Sin embargo, aún es necesario comprender los verdaderos riesgos de los microplásticos en los sistemas de agua dulce y otros ecosistemas teniendo en cuenta estructura, características funcionales y comportamiento de los organismos de estudio para concienciar la toma de decisiones del público. El presente artículo de revisión narrativa se realizó mediante la consulta de bases de datos nacionales e internacionales para compilar publicaciones que reflejen el estado actual de conocimiento del efecto de los microplásticos sobre las comunidades de macroinvertebrados de ecosistemas lóticos.

Palabras clave: contaminantes emergentes, microplásticos, niveles tróficos, perjuicio ecosistémico, ríos, transferencia

Abstract

The global production of plastic amounts to 6.3 billion tons, greatly influencing the increasing contamination from plastic products and resulting in a problem that affects ecosystems in various ways, especially freshwater ecosystems. Freshwater ecosystems have recently been identified as the main sinks for plastic particles because they are directly exposed to human settlements

[1] Unidad de ecología en sistemas acuáticos (UDESA). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá, Colombia.
[2] Grupo de Investigación Ciencias Biomédicas UPTC (GICBUPTC). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá, Colombia.

* Autor de correspondencia: karem.rodriguez@uptc.edu.co

Recibido: noviembre 22, 2023; aceptado: agosto 1, 2024; publicado: noviembre 20, 2024.

and consequently to anthropogenic activities. The incorporation of microplastics at the base of the food web occurs through their ingestion by different macroinvertebrates, such as (i) filter feeders: *Daphnia magna*, (ii) shredders: *Gammarus pulex* and *Hyalella azteca*, (iii) collectors: *Culex pipiens*, *Chironomus riparius*, *Chironomus tepperi*, and (iv) herbivores like the snail *Physella acuta*. Microplastic ingestion can lead to the blockage of the digestive tract, increased mortality, decreased fecundity, inflammatory responses, altered metabolism, disrupted reproduction, behavioral changes, and depleted energy reserves. Consequently, microplastics pose a threat to macroinvertebrate communities with severe ecosystem-level consequences. However, it is necessary to understand the true risks of microplastics in freshwater and other ecosystems, considering the structure, functional characteristics, and behavior of the study organisms to guide public decision-making awareness. This narrative review paper was conducted by consulting national and international databases to compile publications that reflect the current state of knowledge on the effect of microplastics on macroinvertebrate communities in lotic ecosystems.

Keywords: Emerging contaminants, microplastics, trophic levels, ecosystem harm, rivers, transfer

INTRODUCCIÓN

La contaminación plástica en las fuentes hídricas del mundo es un problema ampliamente informado; dicha problemática se da desde el macroplástico visible, hasta los plásticos más pequeños que incluyen microplásticos, los cuales tienen una dimensión inferior a cinco mm y los nanoplásticos, con un tamaño menor a 1000 nm (Laskar & Kumar, 2019; Yıldız et al., 2022; Zhang et al., 2021). La Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (European Chemicals Agency-ECHA) define el concepto de microplástico (MP) como materiales poliméricos sintéticos, biopolímeros modificados químicamente, sólido y/o semisólido con una morfología de esferas, fibras o láminas (Bollaín-Pastor & Vicente-Agulló, 2019; Vásquez-Molano et al., 2021). Actualmente, estos polímeros se encuentran en todo tipo de ecosistemas, incluidos los de agua dulce, estuarios y marinos (Azevedo-Santos et al., 2019; Rozman & Kalčíková, 2022).

La investigación sobre MP ganó terreno por primera vez en la década de 1970 cuando Carpenter y Smith (1972), realizaron estudios que abordaron en gran medida los entornos marinos. En contraste, la contaminación por MP en agua dulce es un campo de investigación relativamente nuevo, con investigaciones publicadas sólo en los últimos 15 años (Talbot et al., 2022). Según proyecciones de Geyer et al. (2017), la producción mundial de plásticos para el 2025 será de 10.000 millones de toneladas métricas, de las cuales 7500 serán descartadas como desechos, 2500 incineradas y menos de 1000 recicladas.

La pandemia producida por la enfermedad respiratoria infecciosa causada por el coronavirus SARS-CoV-2 del síndrome respiratorio agudo-grave (COVID-19), ha incrementado dramáticamente el consumo de plástico de un solo uso; desde marzo de 2020 se han generado 1,6 millones de toneladas/día de residuos plásticos en el mundo (Orona-Návar et al., 2022). Anualmente, entre cuatro y 12 millones de toneladas de plástico tienen como destino final los océanos, tanto es así que lo más probable es que en los próximos años los MP superen la cantidad de peces (Barcelo & Pico, 2020). Por su parte, los ecosistemas de agua dulce se han identificado recientemente como los principales sumideros de dichas partículas (Gan et al., 2024; Silva et al., 2022a; Wang et al., 2023).

Los MP tienen un efecto perjudicial sobre los organismos acuáticos debido a una alta probabilidad de lixiviación de aditivos plásticos que pueden inducir efectos tóxicos evidenciados a nivel molecular, celular, sistémico y orgánico, causando estrés oxidativo, pérdida de apetito, respuestas inflamatorias, daño genético, comportamiento alterado, neurotoxicidad y muerte (Cera et al., 2020; Fu et al., 2022; Vásquez-Molano et al., 2021). Por otro lado, el transporte, destino e impacto de los plásticos en los sistemas de agua dulce es tema de preocupación, debido a que estos ecosistemas transportan el material plástico desde fuentes terrestres, a lagos, lagunas y al medio marino, además de actuar como sumideros temporales o a largo plazo (Kukkola et al., 2021).

La presencia de MP representa una amenaza

significativa, no solo para los ecosistemas acuáticos sino también para la humanidad, debido a los efectos negativos que generan en la salud y en el medio ambiente como contaminantes (Usman et al., 2022; Yang et al., 2022). La contaminación fluvial a menudo puede variar espacial y temporalmente según el uso del suelo y el grado de urbanización al crear puntos y momentos críticos de polución elevada (De Carvalho et al., 2022), convirtiéndose en una amenaza global emergente para gran variedad de organismos y especies, con afectaciones a nivel de poblaciones, comunidades y ecosistemas (Chinfak et al., 2021; Li et al., 2022).

Los ecosistemas más expuestos a este fenómeno son las quebradas y los ríos, ya que se encuentran bajo la acción de asentamientos humanos y las actividades antrópicas, causando diferentes perturbaciones a la comunidad y entornos asociados, este es un problema en crecimiento, porque los ambientes de agua dulce representan la principal vía de transporte para los MP desde los ecosistemas terrestres hasta los marinos y costeros (Calderón et al., 2020; De Carvalho et al., 2021; Preciado & Zapata, 2020). Además, la velocidad del flujo de agua también se ha relacionado con las concentraciones de MP, ya que una hidrodinámica suave podría facilitar su acumulación, razón por lo cual, en las orillas de los ríos se presenta la mayor acumulación de estas partículas (Watkins et al., 2019).

Al entrar en contacto el plástico con los ecosistemas acuáticos, es de esperar interacción de este con la biodiversidad, siendo la ingestión por animales un problema frecuente, ya que estas partículas pueden incorporarse en las redes tróficas, debido a su fácil acceso en las redes alimentarias de los primeros niveles (Donoso & Rios-Touma, 2020). La ingestión y la translocación de MP pueden afectar a los organismos acuáticos, incluidos el zooplancton, los invertebrados, peces y aves (Kumar et al., 2021; Maheswaran et al., 2022; Windsor et al., 2019). Medidas como el tratamiento de aguas residuales ofrecen soluciones parciales a este problema, ya que estas sirven como importantes vías de entrega de MP a entornos de agua dulce al retener menos del 80% de los MP de un efluente, por lo que se ha observado, que la densidad poblacional humana se correlaciona positivamente con las concentraciones de MP (Ma et al., 2022; Talbot et al., 2022).

Se ha descubierto que una amplia gama de biota de agua dulce ingiere MP, estos incluyen vertebrados como: *Danio rerio* (Hamilton, 1822), originario del sur de Asia e introducido en diferentes lugares del mundo como pez de acuario, *Poecilia reticulata* (Peters, 1859), *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758), nativos de Suramérica y África respectivamente, con distribución global, excepto en la Antártida y *Physalaemus cuvieri* (Fitzinger, 1826), nativo de Suramérica con distribución tropical. Invertebrados como *Daphnia magna* (Straus, 1820), con distribución geográfica en América del Norte, América del Sur, Europa, Asia, África, Australia y Nueva Zelanda; camarones como *Paratya australiensis* (Kemp, 1917) originario de Australia y almejas como *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) distribuida en Asia, América del Norte, América del Sur, Europa, África y Australia.

Los factores abióticos rigen la interacción biótica, por ejemplo, adicionar factores estresantes como el cambio ambiental, que incluyen incremento de la temperatura y factores contaminantes de origen antropogénico, tales como antibióticos, metales, pesticidas y disruptores endocrinos, probablemente ocasionará una exacerbación de las interacciones negativas entre los MP y los organismos de agua dulce (Castro-Castellon et al., 2022); por lo anterior y según la fisiología del organismo, los factores ambientales, naturales y antropogénicos, pueden influir en la retención de partículas y en su probabilidad de trasladarse a otros tejidos y transferirse dentro de las redes alimentarias (O'Connor et al., 2022; Yan et al., 2021; Yıldız et al., 2022). El presente artículo de revisión presenta los diferentes impactos y consecuencias que tienen los MP sobre las comunidades de macroinvertebrados de ecosistemas lóticos.

MATERIALES Y METODOS

La búsqueda bibliográfica se realizó considerando artículos publicados entre los años 2019-2023 en las bases de datos Scopus, web of Science y Google Scholar, donde se compilaron diferentes publicaciones como artículos científicos, libros y otros materiales académicos que reflejaron el estado actual de la temática de estudio. Tras la revisión de 105 publicaciones se seleccionaron 56 referencias bibliográficas pertinentes, con las

cuales se obtuvieron los subtemas del presente artículo, con 7% de referencias correspondientes a investigaciones nacionales y 93% a internacionales de Asia, Europa y América del Norte. Adicionalmente, el 30% de la información consultada trataba sobre macroinvertebrados, mientras que el 70% mencionaban fuentes potenciales, riesgos ecológicos, variedad espacio temporal e interacción de los MP con el ambiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

¿Qué son los microplásticos?

Los plásticos son compuestos de polímeros sintéticos que se obtienen principalmente a partir de derivados químicos del petróleo (petroquímicos) y fuentes renovables. Tales compuestos poseen alta masa molecular y plasticidad, debido a la adición de sustancias o aditivos químicos, que son los que le confieren las propiedades deseadas en cuanto a su textura, resistencia, maleabilidad, estabilidad, brillo, entre otras (Correa, 2020; Laskar & Kumar, 2019). Una característica de estos polímeros convencionales es su alta resistencia a la degradación, lo cual, es la base de su elevada contaminación, actualmente se estima que la longevidad de estos elementos es de cientos o incluso miles de años, dependiendo de sus propiedades y de las condiciones ambientales circundantes (Zhang et al., 2021).

Se encuentran dos tipos de MP según Laskar y Kumar (2019): los MP primarios, que son las emisiones de partículas liberadas de la producción industrial, los cuales son manufacturados intencionalmente con un tamaño microscópico, mientras que los MP secundarios son el producto que proviene de la fragmentación de estructuras sintéticas más grandes debido a la exposición de condiciones externas como la radiación solar, oxidación, acción mecánica y/o degradación microbiana de los productos plásticos (figura 1). Los plásticos están compuestos principalmente por seis tipos principales de polímeros a base de petróleo: polietileno (PE), polipropileno (PP) y poliestireno expandido (PS) que tienen más probabilidades de flotar, y cloruro de polivinilo (PVC), poliamida (PA), también conocido como nylon y polietileno tereftalato (PET), que son más propensos a hundirse en la columna de agua debido a las diferencias en su densidad (Correa, 2020). Según Laskar y Kumar (2019) las fuentes de MP son: arena plástica, residuos al lavar ropa sintética, cosméticos, pasta de dientes, embarcaciones abandonadas y en ruinas, agentes de limpieza en artículos de tocador, gomas y neumáticos de automóviles.

La industria del embalaje produce el 39,9% del plástico presente en el planeta, mientras que otras actividades industriales como la construcción aporta el 19,8%, la automotriz el 9,9%, la electrónica el 6,2%, seguida del uso doméstico y de ocio 4,1% y la agricultura el 3,4% (Lechthaler et al., 2020). Las partículas de plástico se encuentran en diversos tamaños y formas, ya que a medida que se exponen a factores abióticos en el medio ambiente e interactúan con otros contaminantes, se presentan cambios en su aspecto, resultando en la descomposición del plástico a macro escala en piezas secundarias. Actualmente, estos polímeros se encuentran en todo tipo de ecosistemas, incluidos los de agua dulce, estuarios y marinos (Azevedo-Santos et al., 2019; Rozman & Kalčíková, 2022).

Cuando los plásticos ingresan al ambiente, pueden ser transportados con el viento. La precipitación y la escorrentía superficial podrían ser las principales rutas que transfieren plásticos del ecosistema terrestre a los ecosistemas acuáticos (Yan et al., 2021). Los MP pueden se colonizados por microorganismos que forman biopelículas, aumentando su densidad y reduciendo la flotabilidad, siendo un mecanismo importante para su asentamiento desde la columna de agua hasta el fondo (Vásquez-Molano et al., 2021), a esto se suma el transporte vertical debido a bioincrustaciones o agregación con otras partículas más densas, además, los flujos hiperpícnicos podrían desempeñar un papel importante en el transporte vertical de partículas plásticas (Zhang et al., 2021).

Efectos de los microplásticos en los macroinvertebrados

En la base de la red alimentaria de los macroinvertebrados bentónicos empieza el contacto con los MP (O'Connor et al., 2022). Se ha informado la presencia de MP en invertebrados bentónicos y epibentónicos recolectados en hábitats naturales (Rauchschwalbe et al., 2022; Silva et al., 2021). Los macroinvertebrados habitan el sitio central de la interfase sedimento-agua, por lo que desempeñan un papel importante en la descomposición del

Revista Actualidades Biológicas
Actual. Biol. 47(122): e4702, 2025 | Enero-Junio | Medellin | DOI:10.17533/udea.acbi/v47n122a02

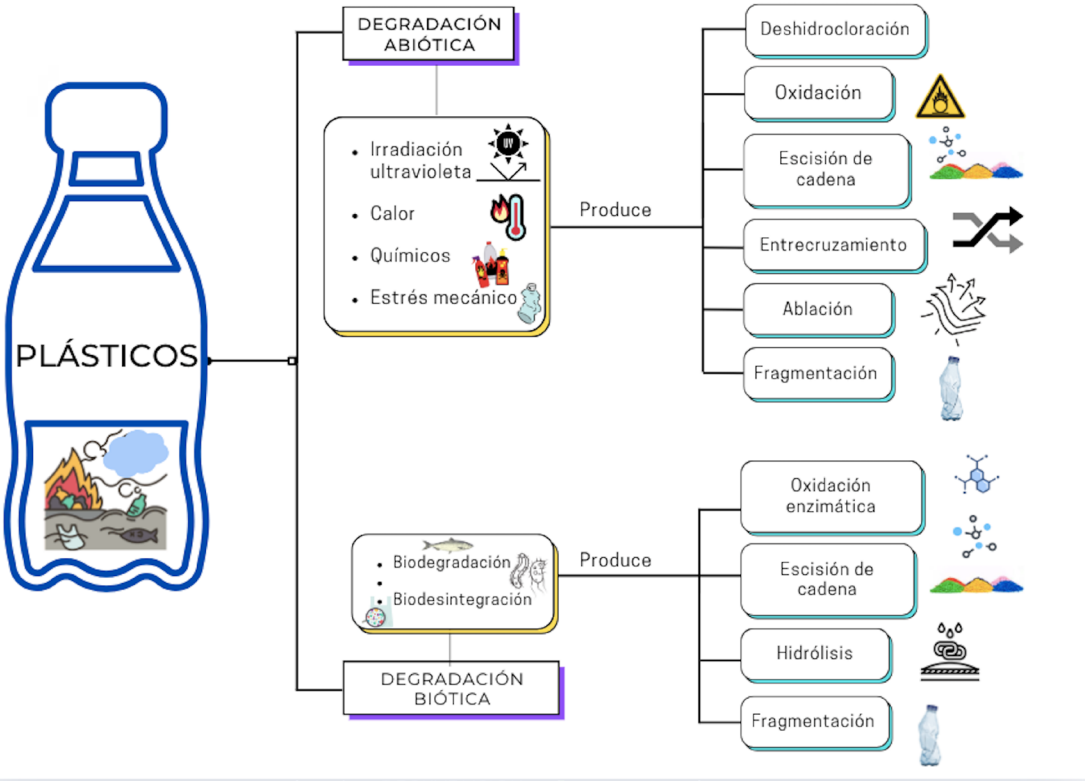

Figura 1. Diagrama esquemático de los procesos generales involucrados en la degradación de los plásticos (Fuente el autor). La degradación de los plásticos se puede producir debido a factores abióticos (luz, temperatura, aire, agua y fuerzas mecánicas) o factores bióticos (organismos que pueden degradar los plásticos mecánicamente o por acción enzimática) (Zhang et al., 2021).

sedimento y el intercambio de materiales entre los sedimentos y los cuerpos de agua (Fu et al., 2022; Silva et al., 2021). Los invertebrados macrobentónicos proporcionan un recurso trófico fundamental para muchas especies de peces y aves (Bertoli et al., 2022). Varios estudios sugieren que el encuentro, ingestión y egestión de MP difiere entre taxones y que los recuentos dentro del tracto gastrointestinal se pueden predecir a partir de las características biológicas de la especie, de manera general, a menudo se revelan mayores cargas de MP en los niveles tróficos más altos (Parker et al., 2022b; Silva et al., 2022b).

Los macroinvertebrados acuáticos están potencialmente expuestos a una mezcla de MP, aditivos, lixiviados y demás productos de degradación que podrían afectar los ecosistemas acuáticos y con ello la red trófica (Vásquez-Molano et al., 2021). Los MP se reconocen como una de las mayores amenazas y contaminantes emergentes para el medio ambiente a nivel global, también pueden actuar como medio de transporte para otros elementos tóxicos como el diclorodifeniltricloroetano (DDT) y hexaclorobenceno que eventualmente terminan dentro del cuerpo del organismo que lo consume (Kumar et al., 2021; Laskar & Kumar, 2019).

Los MP pueden afectar negativamente a los organismos de agua dulce a través de los efectos físicos del propio polímero y/o la exposición a los productos químicos que se agregan al plástico durante la producción para lograr las características deseadas (Ockenden et al., 2022). Varios estudios de laboratorio mostraron que los MP podrían ser ingeridos por varios invertebrados de agua dulce pertenecientes a diversos grupos de alimentación funcional, entre los que se encuentran filtradores, como *D. magna*, trituradoras como *Gammarus pulex* (Linnaeus, 1758) y *Hyalella azteca* (Saussure, 1858), recolectores como *Culex pipiens* (Linneo, 1758), *Chironomus riparius* (Meigen, 1804) o *Chironomus tepperi* (Skuse, 1889), y también herbívoros como el caracol *Physella acuta* (Draparnaud, 1805; Silva et al., 2021).

Por lo tanto, la ingesta de MP puede favorecer su bioacumulación, la cual se refiere al aumento progresivo de MP en un organismo a lo largo del tiempo debido a que la tasa de ingestión supera la tasa de egestión, sumado a esto, también se puede presentar biomagnificación, que hace referencia a concentraciones más altas de MP alcanzadas en los niveles tróficos más altos (Kumar et al., 2021; O'Connor et al., 2022).

Los MP que provienen de los PP o PET que adicionalmente contengan aditivos o químicos como bifenilos policlorados (PCBs), (Bisfenol – A) o hidrocarburos aromáticos policíclicos, que son carcinógenos o endocrinógenos, tienden a presentar una mayor toxicidad, porque cuando los organismos los ingieren les causan un estrés que se puede convertir en crónico o llevarlos a una bioacumulación pasiva o asintomática (aparente) de estos compuestos tornándose presas más fáciles de sus depredadores, lo que genera dentro de la red trófica un proceso de biomagnificación a varios niveles (Donoso & Rios-Touma, 2020; Fu et al., 2022).

La exposición a los MP puede bloquear el tracto digestivo, aumentar la mortalidad, disminuir la fecundidad, alterar el metabolismo, disminuir las reservas de energía, provocar respuestas inflamatorias, interrumpir la reproducción y cambiar el comportamiento de las especies que lo ingieren directa o indirectamente (Wu et al., 2022). El comportamiento se considera uno de los indicadores más sensibles de los impactos de la exposición y representan respuestas adaptativas a los estímulos ambientales, dichos cambios pueden atribuirse a la estimulación de partículas, la regulación positiva del contenido de estrógenos y el daño oxidativo del cuerpo (Fu et al., 2022; Silva et al., 2021). Se ha descubierto que el sistema de defensa antioxidante desempeña un papel esencial para aliviar la presión de los contaminantes externos, como los MP, la obstrucción intestinal y la inflamación, debido a que los MP pueden inducir potencialmente una respuesta inmunitaria que conduce a un aumento de los niveles de especies reactivas de oxígeno (ROS), de las respuestas antioxidantes, en última instancia, al estrés oxidativo; sumando a esto, la activación de la respuesta inmune y desintoxicación también puede implicar costos de energía y agotamiento de las reservas energéticas (Fu et al., 2022; Silva et al., 2021). Por otro lado, la infección parasitaria también ha sido tentativamente vinculada a la contaminación por MP sugiriendo que una mayor carga de parásitos aumenta la susceptibilidad de individuos a tener cargas más altas de MP (Parker et al. 2022a).

La estructura del tracto gastrointestinal puede afectar la capacidad de los individuos para expulsar partículas ingeridas y productos químicos asociados, por ejemplo, plastificantes como tereftalatos, aditivos como caucho de butadieno y acrílicos reticulados, causando una gama de impactos negativos en la alimentación y la fisiología de la biota de agua dulce llegando a producir mortandad. Además, se ha demostrado que los MP consiguen trasladarse del tracto digestivo a otros órganos internos y tejido muscular, pero el tracto digestivo sigue siendo el principal sitio residual (Parker et al., 2021).

Los organismos principalmente recolectores y raspadores que se alimentan de plantas, algas o escombros orgánicos, confunden partículas de plásticos verde-azuladas y las ingieren, como se ha visto en larvas de Ephemeroptera o en el Amphipoda *Gammarus duebeni* (Lilljeborg, 1852), donde se demostró que cuando los anfípodos se alimentan directamente de concentraciones relativamente altas de MP de polietileno tienen la capacidad de fragmentarlos. Además, los MP de PVC que contienen ftalato de dibutilo afectan la fisiología de los invertebrados (Mateos-Cárdenas et al., 2022; Ockenden et al., 2022; Parker et al., 2022a).

Por otro lado, parece haber una relación entre la carga microplástica dentro del sedimento, el agua y la biota (Kukkola et al., 2021). Estudios recientes muestran que la concentración de los MP disminuye a medida que aumenta el tamaño de las partículas, lo que es probable que afecte la ingestión por diferentes organismos. De hecho, los MP más pequeños tienen mayor posibilidad de ser ingeridos por organismos más pequeños, mientras que las partículas más grandes van a ser menos accesibles para la ingestión, además, los efectos negativos de los plásticos pueden aumentar a medida que disminuye el tamaño de las partículas (Mateos-Cárdenas et al., 2022; Kooi & Koelmans, 2019). Por otra parte, es posible que se den efectos toxicológicos a partir de 540 partículas

Revista Actualidades Biológicas
Actual. Biol. 47(122): e4702, 2025 | Enero-Junio | Medellin | DOI:10.17533/udea.acbi/v47n122a02

de MP por kg de sedimento, asimismo, la larga exposición y las altas concentraciones de MP consiguen producir pérdida de biomasa y muerte en los macroinvertebrados (Lwanga et al., 2023; Vermeiren et al., 2023).

El material orgánico dentro de las aguas dulces logra potencialmente capturar y acumular sustancias químicas. En este sentido, se encontró un número máximo de 5,04 partículas mg-1 de tejido en *Chironomus* spp. (moscas de la bahía) y un número máximo de 0,14 partículas mg-1 de tejido en las familias de efímeras Baetidae y Heptageniidae y en la familia de tricópteros Hydropsychidae; mientras que algunos informes han sugerido la transferencia trófica de plásticos de especies productoras a

Figura 2. Interacciones de los microplásticos con macroinvertebrados de ecosistemas lóticos (Fuente el autor). La principal fuente de MP proviene de las urbanizaciones aledañas y los diferentes desechos que son depositados en los ecosistemas lóticos, por lo anterior, macroinvertebrados recolectores y raspadores como anfípodos o larvas de efemerópteros ingieren fácilmente partículas de MP que se encuentran en la superficie de las plantas acuáticas de las que se alimentan.

consumidoras, por ejemplo, de algas marinas a bígaros, de microalgas a dáfnidos y de plantas vasculares a caracoles terrestres (Mateos-Cárdenas et al., 2022). Además, se demostró que los MP pueden absorberse en la superficie de las plantas acuáticas de las que se alimentan los anfípodos (figura 2), por lo cual, en los macroinvertebrados la abundancia de MP ingeridos se incrementa con la posición trófica (Garcia et al., 2021). Algunos taxones alcanzan a ingerir MP de forma activa a través de la selección de partículas específicas, mientras que otros consiguen ingerir plásticos accidentalmente durante la alimentación, por ejemplo, es más probable que los taxones que ingieren sedimentos, como Lumbricidae, ingieran MP sin percatarse, mientras que los taxones que se alimentan por filtración seleccionan MP en función de sus dimensiones relativas (Windsor et

al., 2019). Además, cualquier efecto generado por los MP en los diferentes grupos de alimentación funcional de los macroinvertebrados acuáticos a lo largo de múltiples generaciones trae consecuencias para el funcionamiento del ecosistema (Marchant et al., 2023).

En cuanto a la presencia de MP, se ha registrado que *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) principalmente presenta fibras, blancas y transparentes <1 mm y *Macrobrachium rosenbergii* (De Man, 1879) posee fibras y MP de PS, PE y PP de <1 mm (Lv et al., 2019; Liu et al., 2020). Por otra parte, *H. azteca* al exponerse a partículas de PE fluorescentes de 10 a 27 µm, o a fibras de PE de 20 a 75 µm, presentó disminución en el crecimiento y un aumento de la mortalidad y *C. tepperi* se vio afectado negativamente en la supervivencia, el crecimiento y la emergencia (Wu et al. 2022) y los patrones de desarrollo y emergencia de los quironómidos se ven afectados por éstos y otros MP (Rauchschwalbe et al., 2022); individuos de *Girardia tigrina* (Girard, 1850) expuestos a MP de poliuretano de 7–9 µm demostraron cambios de comportamiento al producir una mayor producción de mucus, una disminución del deslizamiento y la adopción de diversas formas corporales con efecto negativo en su comportamiento de caza, competencia de exploración y capacidad de escape de otros depredadores, mientras que individuos de *Dugesia japonica* (Ichikawa & Kawakatsu, 1964) expuestos a microesferas de polietileno (<10 µm de diámetro) y poliestireno (10, 50 y 100 µm), mostraron retraso en la regeneración de las aurículas, reducción significativa en el tamaño del cuerpo y del blastema (Silva et al., 2023).

¿Qué sucederá en el futuro?

Freshwater biodiversity in tropical countries La biodiversidad de agua dulce en los países tropicales es aún desconocida, por lo que los efectos de los contaminantes sobre la diversidad son difíciles de medir, sin embargo, es probable que se haya perdido o puesto en peligro varias especies, por lo que sus resultados a nivel del ecosistema pueden ser devastadores (Donoso & Rios-Touma, 2020). Los estudios de campo deben apuntar a recolectar comunidades representativas con un número significativo de los niveles tróficos y grupos funcionales (Parker et al., 2021), igualmente, las tasas de ingestión de alimentos y los tiempos de retención intestinal son herramientas importantes para entender la acumulación, la translocación y la transferencia dietética de MP a nivel de poblaciones y comunidades, por lo cual, es imperativo que se realicen más investigaciones para informar modelos de bioacumulación y biomagnificación (O'Connor et al., 2022). Dichos estudios permiten desarrollar e investigar la complejidad, incluida la forma en que los impactos de MP se ven afectados por otros factores estresantes, como el calentamiento y el enriquecimiento de nutrientes (Parker et al., 2021). Por lo anterior, la escasez de datos sobre la ocurrencia, las concentraciones o los posibles mecanismos de los efectos de los MP en los invertebrados de agua dulce, genera una comprensión del riesgo ecológico limitada (Windsor et al., 2019).

La cantidad de MP está altamente correlacionada con la concentración de contaminantes en el agua, principalmente con el aumento de la urbanización, por otra parte, problemáticas como la eliminación de bosques ribereños, pérdida de cobertura vegetal y cambios en el uso del suelo son factores importantes para la escorrentía de contaminantes, como los MP (Donoso & Rios-Touma, 2020). Dado que las redes alimentarias de los ríos están estrechamente relacionadas con el entorno terrestre, es importante lograr una mejor comprensión de los posibles aportes de MP asociados con estos recursos, debido que aún no se ha estudiado hasta qué punto interactúan con los MP en los ecosistemas fluviales y se reconoce que el recurso vegetal puede representar una vía para que los microplásticos ingresen a las redes alimentarias acuáticas (O'Connor et al., 2022). Es probable que los MP compartan vías de distribución con otros contaminantes y nutrientes que amenazan la calidad del agua (Talbot et al., 2022). Hasta que dichas fuentes o trayectorias de flujo se cuantifiquen y vinculen con efectos biológicos específicos, será difícil identificar las estrategias óptimas para remediar la contaminación por MP acuáticos (Windsor et al., 2019).

Se sugiere promulgar políticas que resulten en la disminución de las concentraciones de MP que llegan a los ambientes acuáticos, la descomposición de piezas más grandes de plástico y basura puede ser una fuente crítica de MP en los cuerpos de

agua dulce, por lo que identificar los puntos críticos de contaminación por MP ayudaría a potenciar proyectos enfocados en la remediación (Talbot et al., 2022). Es urgente que las ciudades ubicadas en las partes altas de las cuencas, adopten medidas para el control de la contaminación, como implementar plantas de tratamiento de aguas residuales eficientes para mejorar la calidad ecológica de los ríos, especialmente en los ríos urbanizados, para dejar de contribuir con plásticos y otros contaminantes a los ecosistemas acuáticos; capacitar a la ciudadanía respecto al manejo adecuado de desechos tanto sólidos como líquidos de diferentes actividades antrópicas (agricultura, ganadería, industrialización y deforestación); designar zonas de control ecológico con permanente supervisión en el área urbanizada, así como limpiezas frecuentes e implementar procesos de cuidado, recuperación y conservación del ecosistema a través de herramientas como el biomonitoreo (Donoso & Rios-Touma, 2020; Zhai et al., 2023).

CONCLUSIÓN

Los plásticos, compuestos principalmente de polímeros sintéticos derivados del petróleo, presentan alta resistencia a la degradación, contribuyendo significativamente a la contaminación ambiental. Su durabilidad, variedad de formas y tamaños, junto con la prevalencia en su producción, conlleva a que se encuentren distribuidos en todos los ecosistemas, incluidos acuáticos.

La fragmentación de los plásticos y su capacidad de transporte mediante diversos mecanismos exacerban su impacto ambiental, desencadenando una amenaza para los ecosistemas acuáticos y la biota de agua dulce. La presencia de MP en los macroinvertebrados bentónicos y epibentónicos, que desempeñan un papel crucial en el intercambio de materiales entre sedimentos y agua, resalta el impacto de su contaminación en las redes tróficas, debido que la exposición a estos puede provocar efectos negativos como estrés oxidativo, alteraciones en la reproducción, y cambios en la ecofisiología de los organismos.

Los efectos de los MP sobre la biodiversidad de macroinvertebrados de agua dulce en los países tropicales son evidencia de la limitada comprensión del riesgo ecológico al que se somete el planeta. Por esto, se resalta la necesidad de estudios más detallados. Es crucial que se desarrollen políticas para reducir las concentraciones de MP en ambientes acuáticos, mejorar las prácticas de gestión de desechos y fortalecer la capacidad de tratamiento de aguas residuales. La implementación de medidas de control y remediación, así como la educación y biomonitoreo, son esenciales para proteger los ecosistemas acuáticos y mitigar los efectos de la contaminación por MP.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores de esta publicación generaron aportaciones importantes a la idea y diseño del estudio, en la recopilación de datos, en el análisis e interpretación de los mismos, además, en conjunto se realizó la redacción, revisión crítica de su contenido intelectual y aprobación final de la versión que va a publicarse.

CONFLICTO DE INTERESES

No se tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

REFERENCIAS

Azevedo-Santos, V. M., Gonçalves, G. R. L., Manoel, P. S., Andrade, M. C., Lima, F. P. & Pelicice, F. M. (2019). Plastic ingestion by fish: A global assessment. *Environmental Pollution, 255*(1), 112994. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.112994

Barcelo, D. & Pico, Y. (2020). Case studies of macro- and microplastics pollution in coastal waters and rivers: Is there a solution with new removal technologies and policy actions?. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2,* 100019. https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2020.100019

Bertoli, M., Pastorino, P., Lesa, D., Renzi, M., Anselmi, S., Prearo, M. & Pizzul, E. (2022). Microplastics accumulation in functional feeding guilds and functional habit groups of freshwater macrobenthic invertebrates: Novel insights in a riverine ecosystem. *Science of The Total Environment, 804,* 150207. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150207

Bollaín-Pastor, C. & Vicente-Agulló, D. (2019). Presence of microplastics in water and the potential impact on public health. *Revista Española de Salud Pública, 93.* e201908064. https://www.scielosp.org/article/resp/2019.v93/e201908064

Calderón, H., Martínez, P. & Muñoz, J. (2020). *Caracterización y cuantificación de microplásticos en los sedimentos y la columna de agua del río Magdalena en la ciudad de Neiva, Colombia.* Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.

Carpenter, E. & Smith, K. (1972). Plastics on the Sargasso Sea surface. *Science, 175*(4027), 1240-1241. DOI: 10.1126/science.175.4027.1240

Castro-Castellon, A., Horton, A., Hughes, J., Rampley, C., Jeffers, E., Bussi, G. & Whitehead, P. (2022). Ecotoxicity of microplastics to freshwater biota: Considering exposure and hazard across trophic levels. *Science of The Total Environment, 816*, 151638. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151638

Cera, A., Cesarini, G. & Scalici, M. (2020). Microplastics in freshwater: what is the news from the world?. *Diversity, 12*(7), 276. https://doi.org/10.3390/d12070276

Chinfak, N., Sompongchaiyakul, P., Charoenpong, C., Shi, H., Yeemin, T. & Zhang, J. (2021). Abundance, composition, and fate of microplastics in water, sediment, and shellfish in the Tapi-Phumduang River system and Bandon Bay, Thailand. *Science of The Total Environment, 781*, 146700. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146700

Correa, J. (2020). *Revisión de la problemática de la contaminación por microplásticos en el recurso hídrico* [Tesis de especialización, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional de la Universidad de Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/15453

De Carvalho, A. R., Garcia, F., Riem-Galliano, L., Tudesque, L., Albignac, M., Ter Halle, A. & Cucherousset, J. (2021). Urbanization and hydrological conditions drive the spatial and temporal variability of microplastic pollution in the Garonne River. *Science of The Total Environment, 769*, 144479. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144479

De Carvalho, A. R., Riem-Galliano, L., Ter Halle, A. & Cucherousset, J. (2022). Interactive effect of urbanization and flood in modulating microplastic pollution in rivers. *Environmental Pollution, 309*, 119760. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.119760

Donoso, J. M. & Rios-Touma, B. (2020). Microplastics in tropical Andean rivers: A perspective from a highly populated Ecuadorian basin without wastewater treatment. *Heliyon, 6*(7), e04302. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E04302

Fu, L., Xi, M., Nicholaus, R., Wang, Z., Wang, X., Kong, F. & Yu, Z. (2022). Behaviors and biochemical responses of macroinvertebrate *Corbicula fluminea* to polystyrene microplastics. *Science of The Total Environment, 813*, 152617. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.152617

Gan, M., Zhang, Y., Shi, P., Cui, L., Zhang, C. & Guo, J. (2024). Occurrence, potential sources, and ecological risk assessment of microplastics in the inland river basins in Northern China. *Marine Pollution Bulletin, 205*, 116656. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116656

Garcia, F., De Carvalho, A. R., Riem-Galliano, L., Tudesque, L., Albignac, M., Halle, A. & Cucherousset, J. (2021). Stable isotope insights into microplastic contamination within freshwater food webs. *Environmental Science & Technology, 55*(2), 1024–1035. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06221

Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances, 3*(7), 275-280. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

Kooi, M. & Koelmans, A. (2019). Simplifying Microplastic microplastic via continuous probability distributions for size, shape, and density. *Environmental Science & Technology Letters, 6*(9), 551–557. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00379

Kukkola, A., Krause, S., Lynch, I., Sambrook Smith, G. H. & Nel, H. (2021). Nano and microplastic interactions with freshwater biota – Current knowledge, challenges and future solutions. *Environment International, 152*, 106504. https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2021.106504

Kumar, R., Sharma, P., Manna, C. & Jain, M. (2021). Abundance, interaction, ingestion, ecological concerns, and mitigation policies of microplastic pollution in riverine ecosystem: A review. *Science of The Total Environment, 782*, 146695. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146695

Laskar, N. & Kumar, U. (2019). Plastics and microplastics: A threat to the environment. *Environmental Technology & Innovation, 14*, 100352. https://doi.org/10.1016/J.ETI.2019.100352

Lechthaler, S., Waldschläger, K., Stauch, G. & Schüttrumpf, H. (2020). The Way of Macroplastic through the Environment. *Environments, 7*(10), 73. https://doi.org/10.3390/environments7100073

Li, H. X., Shi, M., Tian, F., Lin, L., Liu, S., Hou, R., Peng, J. P. & Xu, X. R. (2022). Microplastics contamination in bivalves from the Daya Bay: Species variability and spatio-temporal distribution and human health risks. *Science of The Total Environment, 841*, 156749. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.156749

Liu, X., Shao, Z., Cheng, G., Lu, S., Gu, Z., Zhu, H., Shen, H., Wang, J. & Chen, X. (2020). Ecological engineering in pond aquaculture: a review from the whole-process perspective in China. *Reviews in Aquaculture, 13*(2), 1060-1076. https://doi.org/10.1111/raq.12512

Lv, W., Zhou, W., Lu, S., Huang, W., Yuan, Q., Tian, M., Lv, W. & He, D. (2019). Microplastic pollution in rice-fish co-culture system: A report of three farmland stations in Shanghai, China. *Science of The Total Environment,*

652, 1209–1218. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.10.321

Lwanga, E., Roshum, I., Munhoz, D., Meng, K., Rezaei, M., Goossens, D., Bijsterbosch, J., Alexandre, N., Oosterwijk, J., Krol, M., Peters, P., Geissen, V. & Ritsema, C. (2023). Microplastic appraisal of soil, water, ditch sediment and airborne dust: The case of agricultural systems. *Environmental Pollution, 316*. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120513

Ma, M., Liu, S., Su, M., Wang, C., Ying, Z., Huo, M., Lin, Y. & Yang, W. (2022). Spatial distribution and potential sources of microplastics in the Songhua River flowing through urban centers in Northeast China. *Environmental Pollution, 292*, 118384. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.118384

Maheswaran, B., Karmegam, N., Al-Ansari, M., Subbaiya, R., Al-Humaid, L., Sebastin Raj, J. & Govarthanan, M. (2022). Assessment, characterization, and quantification of microplastics from river sediments. *Chemosphere, 298*, 134268. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134268

Marchant, D., Rodríguez, A., Francelle, P., Jones, J. & Kratina, P. (2023). Contrasting the effects of microplastic types, concentrations and nutrient enrichment on freshwater communities and ecosystem functioning. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 255*, 114834. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114834

Mateos-Cárdenas, A., Moroney, A. von der G., Van Pelt, F., O'Halloran, J. & Jansen, M. A. (2022). Trophic transfer of microplastics in a model freshwater microcosm; lack of a consumer avoidance response. *Food Webs, 31*, e00228. https://doi.org/10.1016/J.FOOWEB.2022.E00228

Ockenden, A., Northcott, G. L., Tremblay, L. A. & Simon, K. S. (2022). Disentangling the influence of microplastics and their chemical additives on a model detritivore system. *Environmental Pollution, 307*, 119558. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.119558

O'Connor, J. D., Lally, H. T., Koelmans, A. A., Mahon, A. M., O'Connor, I., Nash, R., O'Sullivan, J. J., Bruen, M., Heerey, L. & Murphy, S. (2022). Modelling the transfer and accumulation of microplastics in a riverine freshwater food web. *Environmental Advances, 8*, 100192. https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2022.100192

Orona-Návar, C., García-Morales, R., Loge, F. J., Mahlknecht, J., Aguilar-Hernández, I. & Ornelas-Soto, N. (2022). Microplastics in Latin America and the Caribbean: A review on current status and perspectives. *Journal of Environmental Management, 309*, 114698. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114698

Parker, B., Andreou, D., Green, I. D. & Britton, J. (2021). Microplastics in freshwater fishes: Occurrence, impacts and future perspectives. *Fish and Fisheries, 22*(3), 467–488. https://doi.org/10.1111/faf.12528

Parker, B., Andreou, D., Pabortsava, K., Barrow, M., Green, I. D. & Britton, J. R. (2022a). Microplastic loads within riverine fishes and macroinvertebrates are not predictable from ecological or morphological characteristics. *Science of The Total Environment, 839*. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.156321

Parker, B., Britton, J. R., Pabortsava, K., Barrow, M., Green, I. D., Dominguez Almela, V. & Andreou, D. (2022b). Distinct microplastic patterns in the sediment and biota of an urban stream. *Science of The Total Environment, 838*, 156477. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.156477

Preciado, D. K. & Zapata A. P. (2020). *Contaminación por basura marina y microplástico en puntos priorizados de suelos de manglar del municipio de San Andrés de Tumaco – Nariño* [Tesis de pregrado, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca]. Repositorio Uniautónoma del Cauca. https://repositorio.uniautonoma.edu.co/handle/123456789/336?show=full

Rauchschwalbe, M. T., Höss, S., Haegerbaeumer, A. & Traunspurger, W. (2022). Long-term exposure of a free-living freshwater micro- and meiobenthos community to microplastic mixtures in microcosms. *Science of The Total Environment, 827*, 154207. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154207

Rozman, U. & Kalčíková, G. (2022). Seeking for a perfect (non-spherical) microplastic particle – The most comprehensive review on microplastic laboratory research. *Journal of Hazardous Materials, 424*, 127529. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127529

Silva, C. J. M., Machado, A. L., Campos, D., Rodrigues, A. C. M., Patrício Silva, A. L., Soares, A. M. V. M. & Pestana, J. L. T. (2022a). Microplastics in freshwater sediments: Effects on benthic invertebrate communities and ecosystem functioning assessed in artificial streams. *Science of The Total Environment, 804*, 150118. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150118

Silva, C. J. M., Machado, A. L., Campos, D., Soares, A. & Pestana, J. L. T. (2022b). Combined effects of polyethylene microplastics and natural stressors on *Chironomus riparius* life-history traits. *Environmental Research, 213*, 113641. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.113641

Silva, C. J., Patrício Silva, A. L., Campos, D., Soares, A. M., Pestana, J. L. & Gravato, C. (2021). *Lumbriculus variegatus* (oligochaeta) exposed to polyethylene microplastics: biochemical, physiological and reproductive responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 207*, 111375. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.111375

Silva, S., Prata, J., Pereira, P., Rodrigues, A., Soares, A., Sarmento, R., Santos, T., Gravato, C. & Silva, A. (2023). Microplastics altered cellular responses,

physiology, behaviour, and regeneration of planarians feeding on contaminated prey. *Science of The Total Environment, 875*, 162556. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162556

Talbot, R., Granek, E., Chang, H., Wood, R. & Brander, S. (2022). Spatial and temporal variations of microplastic concentrations in Portland's freshwater ecosystems. *Science of The Total Environment, 833*, 155143. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155143

Usman, S., Abdull Razis, A. F., Shaari, K., Azmai, M. N. A., Saad, M. Z., Mat Isa, N. & Nazarudin, M. F. (2022). The burden of microplastics pollution and contending policies and regulations. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(11), 6773. https://doi.org/10.3390/ijerph19116773

Vásquez-Molano, D., Molina, A. & Duque, G. (2021). Distribución espacial y aumento a través del tiempo de microplásticos en sedimentos de la Bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, 50*(1), 27-42. http://www.scielo.org.co/pdf/mar/v50n1/es_0122-9761-mar-50-01-27.pdf

Vermeiren, P., Ikejima, K., Uchida, Y. & Cynthia C. (2023). Microplastic distribution among estuarine sedimentary habitats utilized by intertidal crabs. *Science of The Total Environment, 866*, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161400

Watkins, L., Sullivan, P. J. & Walter, M. T. (2019). A case study investigating temporal factors that influence microplastic concentration in streams under different treatment regimes. *Environmental Science and Pollution Research, 26*(21), 21797–21807. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04663-8

Wang, B., Lan, X., Zhang, H. & Hu, Y. (2023). Benthic biofilms in riverine systems: A sink for microplastics and the underlying influences. *Environmental Pollution, 337*, 122607. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122607

Windsor, F. M., Tilley, R. M., Tyler, C. R. & Ormerod, S. J. (2019). Microplastic ingestion by riverine macroinvertebrates. *Science of The Total Environment, 646*, 68–74. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.07.271

Wu, C., Xiong, X., Hamidian, A. H., Zhang, Y. & Xu, X. (2022). A review on source, occurrence, and impacts of microplastics in freshwater aquaculture systems in China. *Water Biology and Security, 1*(3), 100040. https://doi.org/10.1016/J.WATBS.2022.100040

Yan, Z., Chen, Y., Bao, X., Zhang, X., Ling, X., Lu, G., Liu, J. & Nie, Y. (2021). Microplastic pollution in an urbanized river affected by water diversion: Combining with active biomonitoring. *Journal of Hazardous Materials, 417*, 126058. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.126058

Yang, X., Man, Y. B., Wong, M. H., Owen, R. B. & Chow, K. L. (2022). Environmental health impacts of microplastics exposure on structural organization levels in the human body. *Science of The Total Environment, 825*, 154025. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154025

Yıldız, D., Yalçın, G., Jovanović, B., Boukal, D. S., Vebrová, L., Riha, D., Stanković, J., Savić-Zdraković, D., Metin, M., Akyürek, Y. N., Balkanlı, D., Filiz, N., Milošević, D., Feuchtmayr, H., Richardson, J. A. & Beklioğlu, M. (2022). Effects of a microplastic mixture differ across trophic levels and taxa in a freshwater food web: In situ mesocosm experiment. *Science of The Total Environment, 836*, 155407. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155407

Zhai, T., Chang, M., Ma, Y., Huang, L. & Li, L. (2023). Exploring the changes and driving mechanisms in the production-transport-consumption process of ecosystem services flow in the Yellow River Basin under the background of policy changes. *Ecological Indicators, 151*, 110316. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110316

Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J., Wu, C. & Lam, P. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution, 274*, 116554. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.1165