

Los microplásticos en el ambiente: una solución natural a un problema sintético

Microplastics in the Environment: A Natural Solution to a Synthetic Problem.

Alejandra Paola Huichapa Tinoco¹

Ixchel Alejandra Mejía Estrella²

Virgilio Zúñiga Grajeda¹

Belkis Sulbarán Rangel¹

ORCID 0009-0007-4557-4787,
Huichapa Tinoco, A. P.

ORCID 0000-0003-4443-5957,
Mejía Estrella, I. A.

ORCID 0000-0002-8248-0604,
Zúñiga Grajeda, V.

ORCID 0000-0002-5758-6140,
Sulbarán Rangel, B.

1. Centro Universitario de
Tonalá. Universidad de
Guadalajara.

2. Centro Universitario de
Tlajomulco. Universidad de
Guadalajara.

Huichapa Tinoco, A. P., Mejía
Estrella, I. A., Zúñiga Grajeda,
V- y Sulbarán Rangel, B.
(2025). Los microplásticos
en el ambiente: una solución
natural a un problema sintético.
Concordia, 2 (3), 20-35.

Recibido: 23/05/2025

Aprobado: 27/09/2025

Resumen: Los plásticos se encuentran en todos los ámbitos de nuestra vida, ya que es un material increíblemente versátil y económico. Sin embargo, una vez que termina su vida útil representan una preocupación ambiental muy significativa debido a la mala gestión de los residuos plásticos, ya que únicamente el 9% de estos residuos son reciclados, 12% incinerado y el resto terminan acumulándose en el ambiente o en vertederos. Los plásticos se fragmentan en el ambiente y generan microplásticos (MP). La contaminación del suelo por microplásticos es un problema ambiental que impacta negativamente en la calidad del suelo, los servicios ecosistémicos e incluso puede llegar a afectar la salud humana.

Palabras clave: Biorremediación, contaminación de suelo, microorganismos, degradación e inmovilización.

Abstract: Plastics are found in all aspects of our lives, as they are incredibly versatile and economical. However, once their useful life ends, they represent a significant environmental concern due to poor plastic waste management. Only 9% of this waste is recycled, 12% is incinerated, and the rest ends up accumulating in the environment or in landfills. Plastics fragment in the environment and generate microplastics. Soil contamination by microplastics is an environmental problem that negatively impacts soil quality, ecosystem services, and can even affect human health.

Keywords: Bioremediation, soil contamination, microorganisms, degradation, and immobilization.

Introducción

El objetivo de este artículo es realizar una revisión sistemática sobre la aplicación de técnicas de biorremediación (utilizar organismos vivos como bacterias, hongos o plantas para descontaminar) como una estrategia prometedora para abordar esta problemática. Para ello se analizaron investigaciones recientes enfocadas en la biorremediación de microplásticos en suelos, identificando los principales organismos implicados, sus mecanismos de acción y su eficacia, con el fin de visibilizar las oportunidades reales y potenciales de estas estrategias para su aplicación práctica en el saneamiento ambiental y en la toma de decisiones en políticas públicas.

Los plásticos son fracciones de hidrocarburos polimerizados que a menudo se complementan con aditivos que se utilizan para mejorar la flexibilidad y la durabilidad (resistencia a la oxidación/al fuego y no degradabilidad general) (Falandysz et al., 2024). Éstos se encuentran en todos los ámbitos de la vida cotidiana, ya que es un material increíblemente versátil y económico (Kane & Clare, 2019). En 2019, la producción mundial de plásticos fue de 370 millones de toneladas, de los cuales únicamente el 9% han sido reciclados, el 12% incinerados y el resto terminaron acumulándose en el ambiente o en vertederos (R. Kumar et al., 2021). Además, se estima que para 2050 esta cifra alcanzaría 1480 millones de toneladas (Maddela et al., 2023). La mala gestión de los residuos plásticos es la principal causa de contaminación del entorno natural (M. Kumar et al., 2021).

Los microplásticos son fragmentos plásticos con un tamaño inferior a los 5 mm (M. Kumar et al., 2021) y derivan de fuentes primarias y secundarias. Los MP primarios son producidos a microescalas o nanoescalas y añadidos a productos específicos como cosméticos, productos de cuidado personal, pinturas y productos médicos, éstos entran al ambiente como MP por la inadecuada disposición final de los productos que los contienen. Los MP secundarios se forman a través de la fragmentación ambiental de residuos plásticos más grandes. Esta fragmentación ocurre típicamente debido a procesos como fotodegradación, abrasión física, descomposición química o biológica (Zhou et al., 2024).

En la actualidad, la contaminación por microplásticos en suelos representa una amenaza silenciosa y creciente para los ecosistemas terrestres y la salud humana. Esta problemática exige soluciones innovadoras, sostenibles y alineadas con los principios de la economía circular que son reducir, reutilizar, reparar, reciclar y regenerar recursos minimizando residuos y el impacto ambiental. La contaminación por MP representa un desafío ambiental considerable a escala global, afectando tanto

a ecosistemas acuáticos como terrestres. Por ejemplo, en China, India, Indonesia, Filipinas, Vietnam, Tailandia y Bangladesh, enfrentan una importante contaminación por plásticos en sus ecosistemas Edáficos (Thapliyal et al., 2024). La problemática de contaminación por MP en suelos se deriva de diversos factores, como la adopción generalizada de acolchado plástico en la agricultura, la mala gestión de residuos, la deposición atmosférica, mala disposición de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales y el rápido ritmo de la industrialización (Lehmann et al., 2021; Thapliyal et al., 2024). La biorremediación emerge como una alternativa natural que responde a este reto sintético, integrando conocimiento científico y aprovechamiento biológico para restaurar la calidad del suelo.

Metodología

Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica mediante la base de datos Science Direct entre enero y abril de 2025, utilizando los términos clave: “microplastic biorremediation soil”. Se aplicaron filtros para incluir únicamente artículos publicados en los últimos 10 años, en idioma inglés y español, y que presentaran estudios experimentales o de revisión centrados en organismos utilizados para degradar, inmovilizar o transformar microplásticos en suelo, con el fin de garantizar la inclusión de estudios recientes y relativos con la temática abordada. Se recuperaron inicialmente 1,133 artículos, de los cuales se seleccionaron 48 tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, como: pertinencia temática, disponibilidad del texto completo, calidad metodológica (uso de controles, métodos analíticos claros) y resultados relevantes. La información fue organizada por tipo de estrategia (microorganismos, hongos, plantas, animales y organismos modificados genéticamente), tipo de polímero abordado, condiciones experimentales y principales hallazgos.

Resultados

Los microplásticos (MP) encontrados en el medio ambiente son partículas plásticas derivadas del petróleo, con diferentes características y propiedades como densidad, forma y composición química, originadas a partir de procesos industriales (Rodríguez-Seijo et al., 2017). Los MP se pueden clasificar en dos categorías según su origen, microplásticos primarios y microplásticos secundarios. Los microplásticos primarios incluyen partículas producidas y liberadas en un rango de tamaño menor a 5 mm, y presentan formas como pellets industriales, fibras o micro perlas o en cosméticos y productos de higiene personal; mientras que los microplásticos secundarios, se forman a partir de la degradación de plásticos de mayor tamaño por medios físicos, químicos y biológicos, disminuyendo su tamaño hasta llegar a dimensiones menores a 5 mm como se observa en la figura 1. En general, los microplásticos secundarios presentan

formas irregulares, siendo esta última forma la más comúnmente encontrada en el medio ambiente (Piccardo et al., 2020).

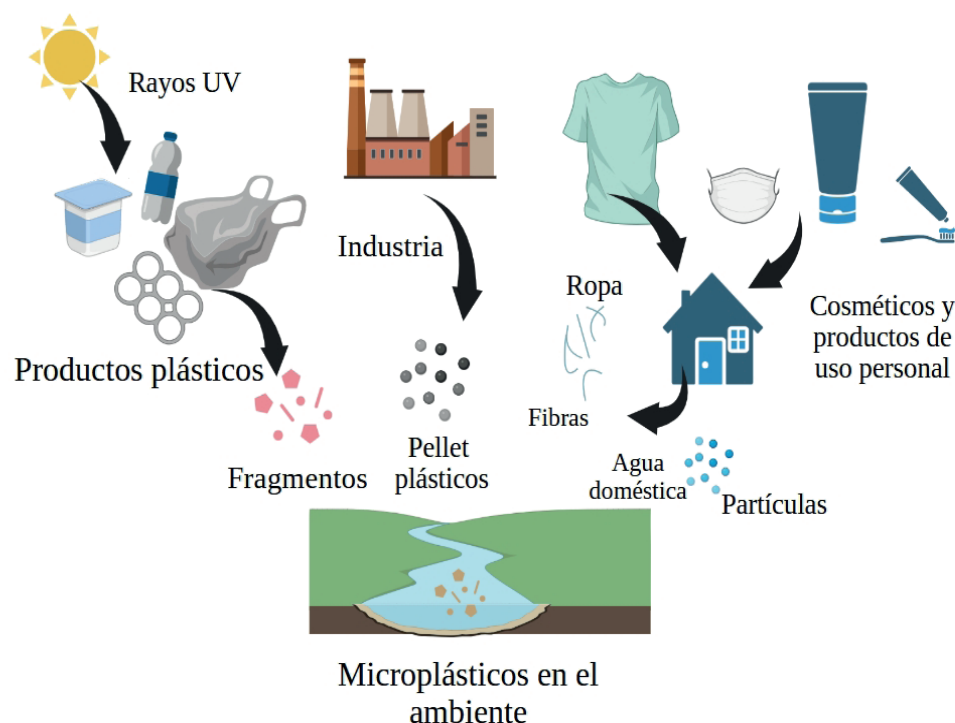


Figura 1. Representación de fuente y origen de microplásticos primarios y secundarios en el ambiente.
Elaboración propia.

El creciente interés por estrategias de tratamiento más amigables con el ambiente ha impulsado el desarrollo de diversas estrategias de biorremediación como una alternativa para disminuir la contaminación causada por MP en suelos. De la búsqueda realizada en Science Direct con las palabras clave: “microplastic biorremediation soil”, se obtuvo un total de 1133 artículos. La figura 2a presenta la evolución de la investigación sobre biorremediación de suelos contaminados por MP en los últimos años, evidenciando un creciente interés científico sobre este tema. Por otra parte, en la figura 2b se presenta la clasificación de los artículos considerados en esta revisión, tomando únicamente aquellos enfocados en estudios sobre la degradación de microplásticos mediante organismos biológicos. Del total, el 44% corresponde a investigaciones con microorganismos, seguidas por un 24% que involucran animales del suelo, 16% con plantas, y un 8% tanto con hongos como con microorganismos modificados. Como puede observarse, la mayoría de los estudios se concentran en el uso de microorganismos como estrategia principal de biorremediación.

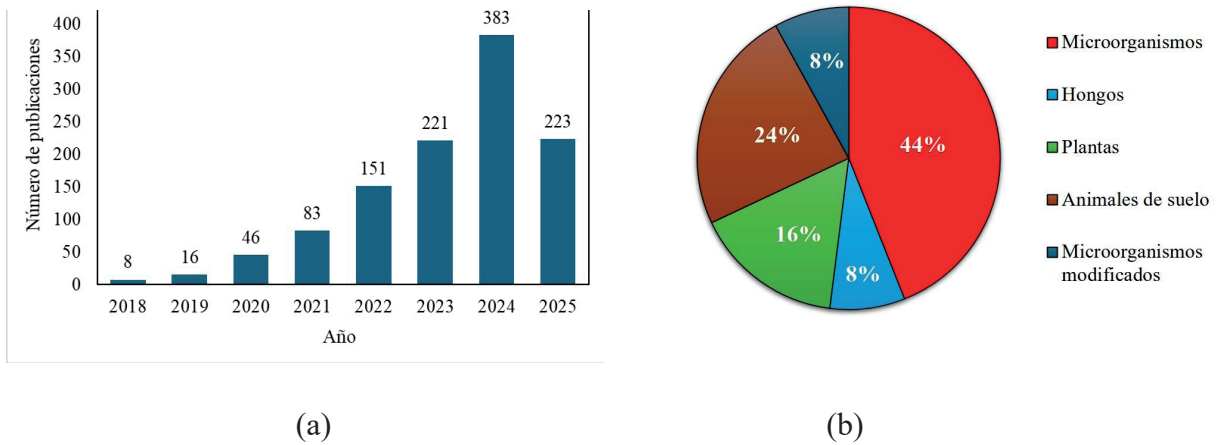


Figura 2. Revisión bibliográfica de artículos sobre biorremediación de suelos contaminados con microplásticos: (a) Número de artículos por años (b) % de artículos utilizados en la presente revisión. Elaboración propia.

A continuación, se describen las principales estrategias de biorremediación en donde destaca el uso de microorganismos, hongos, plantas y animales del suelo, así como enfoques avanzados como la ingeniería genética y la biología sintética:

Microorganismos para la degradación de MP

Los MP son polímeros sintéticos compuestos principalmente de carbono e hidrogeno, y puede llegar a ser atacados por diversos microorganismos. Diversos estudios han reportado la colonización de comunidades microbianas como bacterias, arqueas, hongos, algas, diatomeas, virus y protozoos que forman biopelículas en la superficie de los MP lo que ha sido conocido como “plastisfera”. Estas comunidades pueden llegar a degradar los MP de forma secuencial a través de hidrólisis enzimática, descomponiendo los polímeros en oligómeros, dímeros y monómeros, los cuales pueden llegar a ser utilizados como única fuente de carbono y energía. Este proceso puede culminar en una mineralización completa, transformándolos en dióxido de carbono y agua (Thapliyal et al., 2024). El proceso descrito se ilustra en la figura 3 donde se muestra la degradación de una botella de tereftalato de polietileno (PET) por las enzimas PETasa y MHETasa. La bacteria gramnegativa *I. sakaiensis* 201-F6 es capaz de producir las enzimas IsPETasa e IsMHETasa.

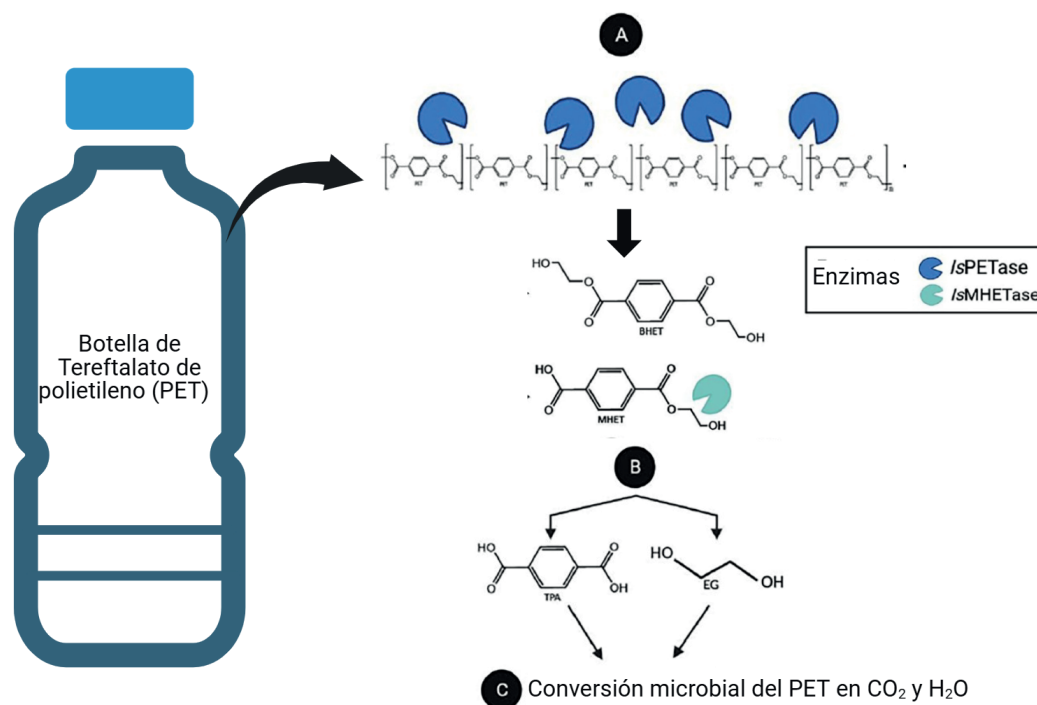


Figura 3. Biodegradación de MP para generar dióxido de carbono y agua. Elaboración propia modificado de (Rener & Ruwaya, 2023).

En la figura 3 en el punto (A) se muestra como la *IsPETase* degrada la cadena de polietileno, produciendo bis(2-hidroxietil)tereftalato (BHET) o mono(2-hidroxietil)tereftalato (MHET). En (B) se observa que la *IsMHETase* convierte el MHET en compuestos no tóxicos como ácido tereftálico y etilenglicol y en (C) por asimilación, estas moléculas se convierten en dióxido de carbono como subproducto de la conversión microbiana del PET (Rener & Ruwaya, 2023).

Se han descubierto que los microorganismos presentes en el suelo, vertederos o sedimentos son capaces de degradar diversos tipos de MP. Por ejemplo, se ha reportado que varias especies de algas como *Phormidium lucidum*, *Oscillatoria subbrevis*, *Scenedesmus dimorphus*, *Anabaena spiroides*, y *Navicula popula*, son eficientes en la degradación de polietileno (Sarmah & Rout, 2020). Cabe destacar que algunos microorganismos pueden degradar directamente el MP, mientras que otros pueden producir enzimas que actúan como catalizadores en la degradación de polímeros complejos en compuestos más simples (Thapliyal et al., 2024). En la tabla 1 se presentan algunos de los microorganismos que tienen el potencial de degradar MP, también se incluyen las enzimas que producen y que pueden influir en el proceso.

Microorganismo	Enzima	Tipo de MP que degrada	Referencia
<i>Thermobifida alba</i> AHK119	Cutinase	Polietileno Tereftalato PET	(Kitadokoro et al., 2012)
<i>Pseudomonas sp.</i>	No menciona	Polietileno Polipropileno Cloruro de polivinilo Poliestireno Poliuretano PET Succinato de polietileno Polietilenglicol Alcohol polivinílico	(Wilkes & Aristilde, 2017)
<i>Pseudomona knack mussii</i> N1-2	Monooxygenase Dioxygenase hydroxylase	Polietileno	(Hou et al., 2022)
<i>Pseudomona aeruginosa</i> RD1-3	Monooxygenase Dioxygenase hydroxylase	Polietileno	(Hou et al., 2022)
<i>Penicillium simplicissimum</i>	Lipasa	PET	(Moyses et al., 2021)
<i>Lysinibacillus sp.</i> JJY0216	No menciona	Polipropileno Polietileno de baja densidad	(Jeon et al., 2021)
<i>Ideonella sakaiensis</i>	PETase MHETase	PET	(Yoshida et al., 2021)
<i>Amycolatopsis</i> SNC	Enzimas hidrolíticas	Ácido poli láctico	(Decorosi et al., 2019)

Tabla 1. Microorganismos y enzimas capaces de degradar MP.

Biorremediación por animales presentes en el suelo

La abundancia de MP en el suelo ha incrementado las interacciones entre estos contaminantes y la biota terrestre, incluyendo lombrices de tierra, caracoles, gusanos, babosas, ciempiés, larvas, etc. Estas interacciones han motivado diversas investigaciones para evaluar el potencial de varios insectos y animales del suelo para la degradación de MP, considerando tanto resultados positivos como los riesgos asociados a estos procesos de biorremediación (Thapliyal et al., 2024).

Entre los animales que se han evaluado para la biorremediación de suelos contaminados por MP se encuentran: el caracol terrestre, la lombriz de tierra, la polilla de tierra en su fase de larva, el super gusano, algunos escarabajos, el gusano de harina, el gusano amarillo, y el gusano oscuro (Thapliyal et al., 2024). La lombriz de tierra (*Lumbricus Terrestris*) ha demostrado ser especialmente prometedora para la degradación de MP (Meng et al., 2023). Se ha reportado que la lombriz de tierra tiene la capacidad de fragmentar MP e incluso llegar a una despolimerización de los mismos gracias a los microorganismos presentes en su intestino, ya que este puede albergar hasta 4000 veces más microorganismos que el suelo circundante (Huerta Lwanga et al., 2018; Meng et al., 2023). En una investigación, se aislaron bacterias presentes en el intestino de la lombriz de tierra y se observó una reducción significativa del tamaño de los MP, así como la emisión de compuestos volátiles, como alcanos de cadena larga, lo cual evidencio la biodegradación inducida por estos microorganismos (Huerta Lwanga et al., 2018).

No obstante, también se han identificado algunos efectos adversos al utilizar la lombriz de tierra para la biorremediación de suelos contaminados por MP, en una investigación se descubrió que en caso de que la lombriz no alcanzara a llevar a cabo la degradación completa del MP se corre el riesgo de un transporte vertical de MP y de sus contaminantes adheridos, lo cual puede llevar contaminantes a capas más profundas del suelo, incluso cerca de los acuíferos (Ju et al., 2023). Por otro lado, se ha documentado que el gusano de harina oscuro (larva de *Tenebrio obscurus*) tiene la capacidad de degradar poliestireno (PS) dentro de su intestino (Peng et al., 2019). De manera similar, se descubrió que la larva del super gusano (*Zophobas atratus*) es capaz de comer, degradar y mineralizar MP de PS. Además, podría vivir con una dieta exclusiva de poliestireno y su tasa promedio de consumo de este polímero es cuatro veces mayor que la del gusano de la harina (Yang et al., 2020).

Micorremediación

El uso de hongos para la biorremediación de suelos contaminados por plásticos ha emergido como una estrategia prometedora. Se ha destacado el potencial de diferentes

especies de hongos para degradar varios tipos de MP, gracias a su capacidad para utilizar polímeros como fuente principal de carbono o energía. En estudios recientes, los hongos del género *Aspergillus* han recibido especial atención, ya que varias de sus especies son útiles para la degradación de MP comúnmente encontrados en suelos contaminados. Específicamente, *Aspergillus clavatus* ha sido reportado como eficiente en la degradación de polietileno, *Aspergillus fumigatus* en la degradación de poliuretano, y *Aspergillus niger* en la degradación de polipropileno. Estos hongos fueron aislados de diversos hábitats terrestres (Yadav et al., 2022). Asimismo, se ha documentado que *Pleurotus ostreatus*, hongo basidiomiceto conocido por su capacidad de degradar la lignina y la celulosa, es capaz de degradar las bolsas de plástico de polietileno. Se sospecha que esta degradación puede estar relacionada a la actividad de las enzimas lignocelulolíticas que se producen durante el crecimiento de este hongo (Maria Rodrigues da Luz et al., 2020).

Fitorremediación

Algunas plantas tienen el potencial de gestionar la contaminación por MP en el suelo mediante varios mecanismos de biorremediación. Las propiedades de los MP, como su tamaño, la forma, la carga superficial, la composición y las propiedades mecánicas influyen en su acumulación y absorción por las plantas (Thapliyal et al., 2024). Se ha observado que entre más pequeñas son las partículas de MP más fácil son absorbidas por las plantas.

Se ha confirmado la absorción de MP de poliestireno (PS) y polimetilmetacrilato (PMMA) en los cultivos de trigo (*Triticum aestivum*) y lechuga (*Lactuca sativa*), el modo de entrada de estos MP es a través de las grietas de las raíces laterales e incluso pueden llegar a transportarse desde las raíces hasta los brotes (Li, Luo, Li, et al., 2020). Además, se ha documentado la capacidad de captación y transporte de microperlas de PS por las raíces del trigo, así como su distribución posterior en tallos y hojas (Li, Luo, Peijnenburg, et al., 2020). La evidencia de acumulación de MP en diferentes partes de la planta insinúan la disminución de los MP de los suelos contaminados con ellos.

Las raíces de las plantas pueden atrapar MP, permitiendo su inmovilización, lo que disminuye su biodisponibilidad para las demás partes de la planta y a su vez reduce el daño potencial a otros organismos del suelo (Thapliyal et al., 2024). Un estudio reveló que la planta ornamental *M. Jalapa* es capaz de tolerar el estrés generado por la coexposición de galaxolida (HHCB) y poliestireno (PS), se observó que los MP de PS pueden penetrar en las raíces de la planta y en los brotes bajo el efecto transportador del HHCB. Esta planta ornamental tiene gran potencial de ser utilizada

para la fitorremediación de suelos contaminados con MP, además es menos probable que los contaminantes atrapados por una planta ornamental entren en la cadena alimentaria y pongan en peligro la salud humana (Wang et al., 2023).

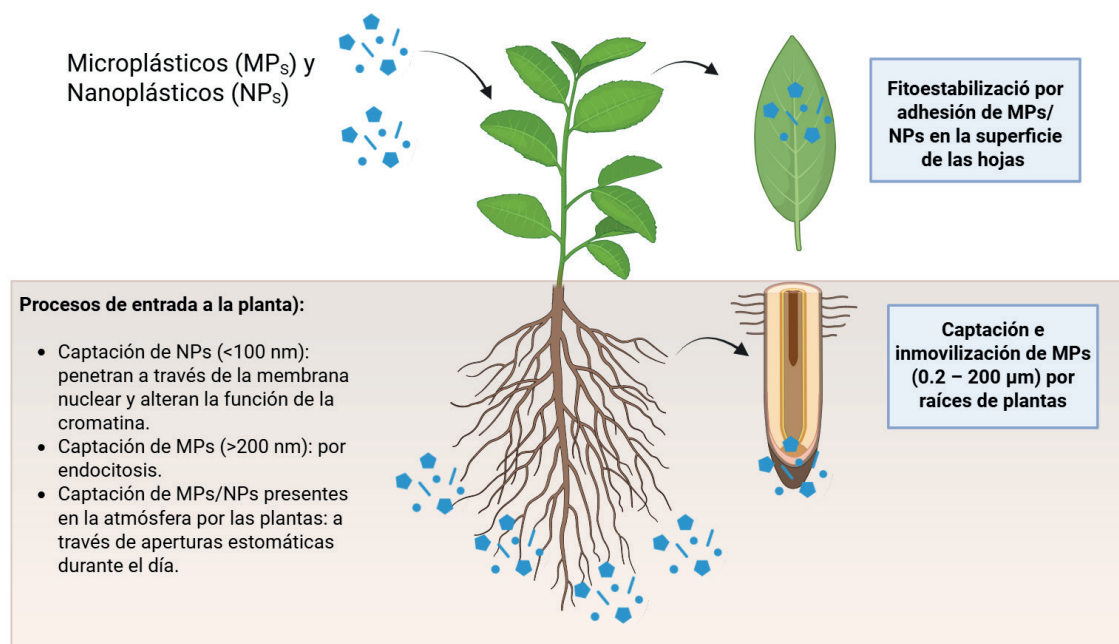


Figura 4. Diagrama que muestra las estrategias de fitorremediación: acumulación y absorción de MP por las plantas y rizorremediación por microorganismos del suelo y sus enzimas. Elaboración propia modificado de (Thapliyal et al., 2024).

En la figura 4 se muestra un diagrama de la absorción y acumulación de MP por las plantas y se observa que los microplásticos (MPs) y nanoplásticos (NPs) pueden ingresar a las plantas a través de hojas y raíces. En la parte aérea, se adhieren a las hojas por interacciones físico-químicas o penetran por las estomas durante el día. En las raíces, pueden ser absorbidos por endocitosis o a través de grietas, y quedar inmovilizados por mucílagos. Microorganismos y hongos presentes en la rizosfera secretan enzimas que degradan MPs/NPs, transformándolos en dióxido de carbono (CO₂) agua (H₂O) y metano (CH₄). Además, algunas plantas estabilizan estos contaminantes en su superficie, contribuyendo a reducir su movilidad y posible toxicidad en los suelos.

La biorremediación con plantas, o fitorremediación, es una estrategia viable a gran escala debido a su bajo costo, carácter ambientalmente amigable y capacidad para aplicarse in situ en áreas extensas. Sin embargo, su eficiencia puede verse limitada por la lenta tasa de remediación, la toxicidad de ciertos contaminantes y la necesidad

de especies vegetales específicas adaptadas al entorno. En el caso de microplásticos, las plantas por sí solas no los degradan completamente, pero pueden inmovilizarlos o estabilizarlos, especialmente si se combinan con microorganismos del suelo. Para mejorar su aplicación, se investiga el uso de plantas transgénicas, asociaciones con microbios y enmiendas al suelo.

Microorganismos modificados sintéticamente

No todos los microorganismos autóctonos tienen el potencial de degradar MP, por lo cual se ha impulsado el desarrollo de enfoques basados en ingeniería genética y biología sintética para diseñar cepas microbianas que permitan mejorar la biodegradación de polímeros. En un estudio, se utilizó la microalga *Phaeodactylum tricornutum* como base para la producción de una versión modificada de la enzima PETasa. Se demostró que esta PETasa modificada degradaba tereftalato de polietileno (PET) y polietileno tereftalato glicol (PETG) (Moog et al., 2019). Por otra parte, también se ha explorado la aplicación de la ingeniería genética en biopelículas microbianas para mejorar la acumulación de MP en su interior. En una investigación reciente con *Pseudomonas aeruginosa*, se desarrolló una cepa modificada con operón *wsp* para mejorar la formación de biopelículas y aumentar la bioacumulación de MP. También se realizó la incorporación de un mecanismo de liberación por dispersión que promovió la liberación y recuperación eficiente de MP tras su acumulación (Liu et al., 2021).

Conclusión

La biorremediación se presenta como una alternativa prometedora para enfrentar la contaminación de suelos por MP, ya que se aprovecha la capacidad de diversos organismos vivos para degradar o inmovilizar estos polímeros. Sin embargo, aún se cuenta con múltiples desafíos en esta área, como la eficiencia limitada a ciertos tipos de polímeros, la variabilidad en las tasas de degradación de los MP, los posibles efectos negativos en los ecosistemas y los largos tiempos que se requieren para la degradación de MP. Además, la mayoría de las pruebas de biorremediación de suelos contaminados por MP se han realizado a escala laboratorio, lo que presenta grandes retos para su aplicación a gran escala. Por lo tanto, aun se requiere una mayor investigación sobre la biorremediación de suelos contaminados por MP para optimizar estos procesos y desarrollar modelos viables a gran escala, así como la implementación de legislación ambiental que logre disminuir el problema desde sus orígenes. En este sentido, la biorremediación se posiciona no solo como una estrategia experimental, sino como una solución viable y necesaria ante una crisis ambiental de escala global. Retomar el equilibrio natural mediante el uso de organismos vivos plantea un enfoque transformador hacia la restauración de suelos contaminados. Se

requiere fortalecer la investigación aplicada y generar sinergias entre la ciencia, la industria y los tomadores de decisiones, para impulsar soluciones integrales que aborden el problema desde su origen hasta su remediación efectiva.

Referencias

- Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution And Importance of Microplastics in The Marine Environment: A Review of the Sources, Fate, Effects, and Potential Solutions. *Environment International*. 102, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
- Bhattacharjee, U., Baruah, K. N., & Shah, M. P. (2025). Exploring Sustainable Strategies for Mitigating Microplastic Contamination in Soil, Water, and The Food Chain: A Comprehensive Analysis. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*. 7, 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.enccco.2025.02.010>
- Decorosi, F., Exana, M. L., Pini, F., Adessi, A., Messini, A., Giovannetti, L., & Viti, C. (2019). The Degradative Capabilities of New Amycolatopsis Isolates on Polylactic Acid. *Microorganisms*, 7, (12), 590. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7120590>
- Hasan, M. M., & Tarannum, M. N. (2025). Adverse Impacts of Microplastics on Soil Physicochemical Properties And Crop Health in Agricultural Systems. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 17. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100528>
- Hou, L., Xi, J., Liu, J., Wang, P., Xu, T., Liu, T., Qu, W., & Lin, Y. B. (2022). Biodegradability of Polyethylene Mulching Film by Two Pseudomonas Bacteria and Their Potential Degradation Mechanism. *Chemosphere*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131758>
- Huerta Lwanga, E., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., & Garbeva, P. (2018). Decay of Low-Density Polyethylene by Bacteria Extracted from Earthworm's Guts: A Potential for Soil Restoration. *Science of the Total Environment*, 624, 753–757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.144>
- Jeon, J. M., Park, S. J., Choi, T. R., Park, J. H., Yang, Y. H., & Yoon, J. J. (2021). Biodegradation Of Polyethylene and Polypropylene by Lysinibacillus Species JJY0216 Isolated from Soil Grove. *Polymer Degradation and Stability*, 191.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109662>

- Ju, H., Yang, X., Osman, R., & Geissen, V. (2023). Effects of Microplastics and Chlorpyrifos on Earthworms (*Lumbricus Terrestris*) and Their Biogenic Transport in Sandy Soil. *Environmental Pollution*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120483>
- Kitadokoro, K., Thumarat, U., Nakamura, R., Nishimura, K., Karatani, H., Suzuki, H., & Kawai, F. (2012). Crystal Structure of Cutinase Est119 from *Thermobifida Alba* AHK119 That Can Degrade Modified Polyethylene Terephthalate At 1.76 Å Resolution. *Polymer Degradation and Stability*, 97(5), 771–775. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.02.003>
- Kumar, M., Chen, H., Sarsaiya, S., Qin, S., Liu, H., Awasthi, M. K., Kumar, S., Singh, L., Zhang, Z., Bolan, N. S., Pandey, A., Varjani, S., & Taherzadeh, M. J. (2021). Current Research Trends on Micro- and Nano-Plastics as an Emerging Threat to Global Environment: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 409. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124967>
- Kumar, R., Verma, A., Shome, A., Sinha, R., Sinha, S., Jha, P. K., Kumar, R., Kumar, P., Shubham, Das, S., Sharma, P., & Prasad, P. V. V. (2021). Impacts of Plastic Pollution on Ecosystem Services, Sustainable Development Goals, and Need to Focus on Circular Economy and Policy Interventions. *Sustainability Switzerland*, 13 (17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su13179963>
- Lehmann, A., Leifheit, E. F., Gerdawischke, M., & Rillig, M. C. (2021). Microplastics Have Shape- and Polymer-Dependent Effects on Soil Aggregation and Organic Matter Loss – An Experimental and Meta-Analytical Approach. *Microplastics and Nanoplastics*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00007-x>
- Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W. J. G. M., Yin, N., Yang, J., Tu, C., & Zhang, Y. (2020). Effective Uptake of Submicrometre Plastics by Crop Plants Via A Crack-Entry Mode. *Nature Sustainability*, 3(11), 929–937. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9>
- Li, L., Luo, Y., Peijnenburg, W. J. G. M., Li, R., Yang, J., & Zhou, Q. (2020). Confocal Measurement of Microplastics Uptake by Plants. *MethodsX*, 7, 1007-50. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.11.023>

- Liu, S. Y., Leung, M. M.-L., Fang, J. K.-H., & Chua, S. L. (2021). Engineering A Microbial ‘Trap and Release’ Mechanism for Microplastics Removal. *Chemical Engineering Journal*, 404, 1270-79. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127079>
- Maddela, N. R., Kakarla, D., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2023). Additives of Plastics: Entry Into The Environment and Potential Risks to Human and Ecological Health. *Journal of Environmental Management*. 348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119364>
- Maria Rodrigues da Luz, J., de Cássia Soares da Silva, M., Ferreira dos Santos, L., & Catarina Megumi Kasuya, M. (2020). Plastics Polymers Degradation by Fungi. *Microorganisms*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88608>
- Meng, K., Lwanga, E. H., van der Zee, M., Munhoz, D. R., & Geissen, V. (2023). Fragmentation and Depolymerization of Microplastics in the Earthworm Gut: A Potential for Microplastic Bioremediation? *Journal of Hazardous Materials*, 447. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130765>
- Moog, D., Schmitt, J., Senger, J., Zarzycki, J., Rexer, K.-H., Linne, U., Erb, T., & Maier, U. G. (2019). Using a Marine Microalga as a Chassis for Polyethylene Terephthalate (PET) Degradation. *Microbial Cell Factories*, 18 (171). <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1220-z>
- Moyses, D. N., Teixeira, D. A., Waldow, V. A., Freire, D. M. G., & Castro, A. M. (2021). Fungal and Enzymatic Bio-depolymerization of Waste Post-consumer poly (ethylene terephthalate) (PET) bottles using *Penicillium* species. 3 *Biotech*, 11(10), 435. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02988-1>
- Peng, B.-Y., Su, Y., Chen, Z., Chen, J., Zhou, X., Benbow, M. E., Criddle, C. S., Wu, W.-M., & Zhang, Y. (2019). Biodegradation of Polystyrene by Dark (*Tenebrio obscurus*) and Yellow (*Tenebrio molitor*) Mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae). *Environmental Science & Technology*, 53 (9), 5256–5265. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06963>
- Renner, D. J., & Ruwaya, A. (2023). A minireview on the Bioremediative Potential of Microbial Enzymes as Solution to Emerging Microplastic Pollution. *Frontiers in Microbiology*, 13. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1066133>

- Sarmah, P., & Rout, J. (2020). Role of Algae and Cyanobacteria in Bioremediation: Prospects in Polyethylene Biodegradation. *Advances in Cyanobacterial Biology*. 333–349. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819311-2.00022-X>
- Thapliyal, C., Priya, A., Singh, S. B., Bahuguna, V., & Daverey, A. (2024). Potential Strategies for Bioremediation of Microplastic Contaminated Soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.05.001>
- Wang, M., Xiao, Y., Li, Y., & Liu, J. (2023). Optimistic Effects of Galaxolide and Polystyrene Microplastic Stress on the Physio-biochemical Characteristics and Metabolic Profiles of an Ornamental Plant. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 350–360. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.01.062>
- Wilkes, R. A., & Aristilde, L. (2017). Degradation and Metabolism of Synthetic Plastics and Associated Products by *Pseudomonas* sp.: Capabilities and Challenges. *Journal of Applied Microbiology*. 123 (3) 582–593. <https://doi.org/10.1111/jam.13472>
- Yadav, V., Dhanger, S., & Sharma, J. (2022). Microplastics Accumulation in Agricultural Soil: Evidence for the Presence, Potential Effects, Extraction, and Current Bioremediation Approaches. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 10, 38–47. <https://doi.org/10.7324/JABB.2022.10s204>
- Yang, Y., Wang, J., & Xia, M. (2020). Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Superworms *Zophobas Atratus*. *Science of The Total Environment*, 708, 135233. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135233>
- Yoshida, S., Hiraga, K., Taniguchi, I., & Oda, K. (2021). Ideonella Sakaiensis, PETase, and MHEase: From Identification of Microbial PET Degradation to Enzyme Characterization. *Methods in Enzymology*. 648, 187–205. Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2020.12.007>
- Zhou, J., Chen, M., Li, Y., Wang, J., Chen, G., & Wang, J. (2024). Microbial Bioremediation Techniques of Microplastics and Nanoplastics in the Marine Environment. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. 180. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117971>

Zou, H. H., He, P. J., Peng, W., Lan, D. Y., Xian, H. Y., Lü, F., & Zhang, H. (2023). Rapid Detection of Colored and Colorless Macro- and Micro-plastics in Complex Environment Via Near-infrared Spectroscopy and Machine Learning. *Journal of Environmental Sciences*, 147, 512–522. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.12.004>