

Los microplásticos: enemigo silencioso de las plantas^φ

William Alberto Sánchez-Cifuentes, Miguel Ángel Herrera-Alamillo,
Luis Carlos Rodríguez-Zapata

Introducción

A nivel mundial, la producción anual de plásticos ha alcanzado los 300 millones de toneladas y menos del 70% de estos productos son reciclados (Cole *et al.* 2011). Sin embargo, el verdadero desafío ambiental radica no solo en la acumulación de plásticos visibles sino en su degradación en pequeñas partículas. La degradación que produce los microplásticos (MPs) representa una amenaza ambiental significativa para los ecosistemas agrícolas ya que afecta directamente a la fisiología vegetal y la salud del suelo. No obstante, la interacción entre MPs y las plantas sigue siendo poco estudiada. El objetivo de este artículo es examinar la problemática de los MPs sobre las plantas y concientizar a la población sobre alternativas para mitigar sus efectos en la agricultura.

Diminutos invasores: origen y efectos

Los MPs, cuyo tamaño aproximado es de 5 mm (como granos de arena) y que pueden ocasionar un gran impacto ambiental (Cole *et al.* 2011), provienen de varias fuentes, como productos de higiene personal, pastas dentales, productos antiarrugas y cremas para afeitar. Además, provienen de textiles, ya que se utilizan tejidos sintéticos que durante su lavado liberan miles de fibras que permanecen suspendidas en el agua (Qaiser *et al.* 2023). Otras de las fuentes son la degradación de desechos más grandes de plástico a través de procesos físicos y químicos, como la exposición al sol y la humedad, el roce con otros materiales como piedras

^φLaboratorio de Fisiología Molecular y Transformación Genética en Plantas. Unidad de Biotecnología, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yucatán, México, CP 97205. Autor para correspondencia: lcrz@cicy.mx
DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.6183>



y arena, y la degradación ocasionada por algunos microorganismos, como bacterias y hongos (Zhou *et al.* 2022; Roy *et al.* 2023).

Una vez que los MPs llegan a los ecosistemas afectan al suelo y la salud de las plantas, ya que se mezclan con la tierra y modifican la estructura del suelo, interfieren en su funcionamiento al cambiar su composición y alteran la relación de las plantas con los microorganismos (Cole *et al.* 2011) (Fig. 1). Los MPs son como una esponja tóxica que atrapa muchos otros contaminantes. Esta condición se debe a sus cargas positivas, negativas o neutras, que ayudan a la adherencia con metales pesados, antibióticos, pesticidas y herbicidas, aumentando el daño que causa en el ecosistema (Roy *et al.* 2023).

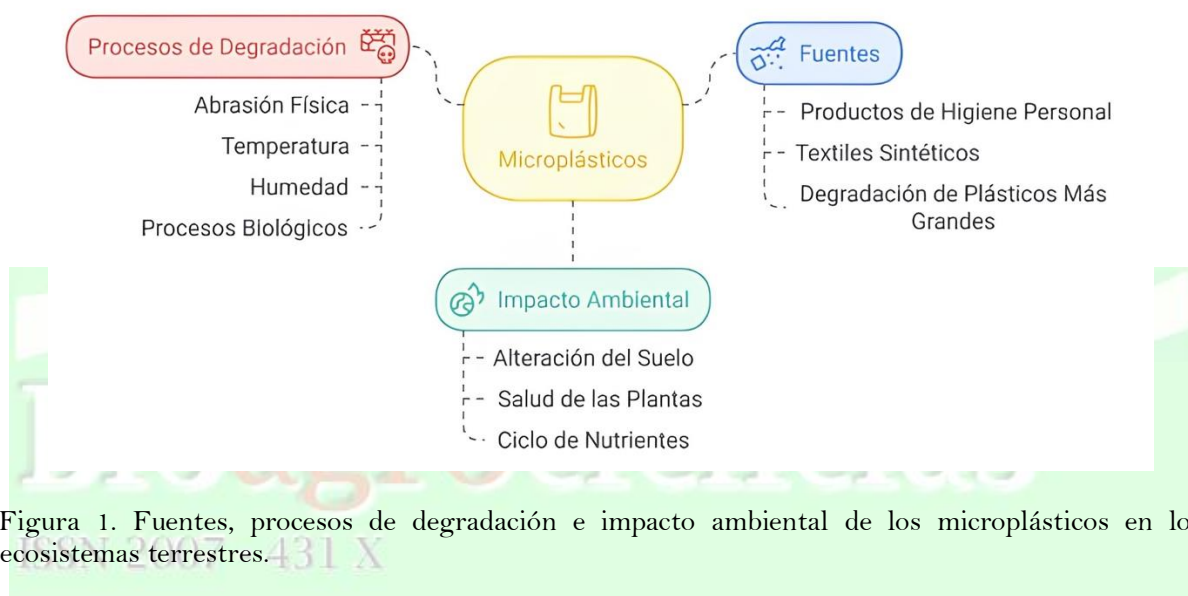


Figura 1. Fuentes, procesos de degradación e impacto ambiental de los microplásticos en los ecosistemas terrestres.

Los MPs liberan compuestos específicos, dependiendo del tipo de material del cual están elaborados. En el PET (polietileno tereftalato) se han registrado cetonas, aldehídos y grupos funcionales carboxílicos que pueden estar involucrados en los cambios de la porosidad y la capacidad de retener minerales y nutrientes en el suelo, y alterar el secuestro del carbono y nitrógeno (Giaganini *et al.* 2023) (Fig. 1).

Los MPs no permanecen únicamente en el suelo, sino que pueden integrarse a la cadena alimentaria. En las plantas, el agua y nutrientes absorbidos por las raíces son una vía de entrada que facilita su acumulación en tallos y hojas. Posteriormente, cuando los animales consumen estas plantas, los MPs se acumulan en órganos como pulmones e intestinos (Prata y Dias 2023). Esta contaminación también afecta al ser humano, ya que al consumir plantas y animales contaminados las micropartículas tienden a acumularse progresivamente en tejidos. Se han detectado MPs en el sistema digestivo, respiratorio e incluso en la placenta, lo que representa un riesgo considerable para la salud (Prata y Dias 2023; Marszałek *et al.* 2024). Entre los posibles efectos adversos se incluyen inflamación, estrés oxidativo, fibrosis tisular y, en casos más graves, efectos cancerígenos, especialmente cuando los MPs se combinan con otros contaminantes. Además, ocasionan infecciones al transportar microorganismos en su superficie (Ahmand 2023).

“Una vez que los MPs llegan a los ecosistemas afectan al suelo y la salud de las plantas, ya que se mezclan con la tierra y modifican la estructura del suelo, interfieren en su funcionamiento al cambiar su composición y alteran la relación de las plantas con los microorganismos.”

El viaje de los microplásticos en las plantas

De acuerdo con la forma en que se generan los MPs, éstos pueden introducirse en las plantas por su tamaño y carga superficial, provocando múltiples afectaciones en el desarrollo de las plantas (Ren *et al.* 2024). Las cargas positivas de MPs influyen en la adherencia en las puntas de las raíces, mientras que las cargas negativas y neutras logran penetrar membranas para acumularse en el espacio extracelular o llegar hasta el xilema (Roy *et al.* 2023). Este último es un tejido vascular que ayuda a transportar agua y nutrientes a todas las partes de la planta, lo que indicaría que los MPs se acumularían tanto en las raíces, tallos y hojas. Pero, ¿Cómo las plantas absorben y trasladan a los MPs?

Los fragmentos de plástico pueden ingresar a las plantas por diferentes vías (Fig. 2). La introducción ocurre principalmente a través del agua con MPs, la cual alcanza el espacio extracelular mediante presión osmótica y atraviesa sucesivamente la epidermis de la raíz, el córtex, la banda de Caspary y la endodermis hasta llegar al sistema vascular (Roy *et al.* 2023, Ren *et al.* 2024). Si bien la banda de Caspary funciona como una barrera selectiva que controla el ingreso de agua y nutrientes al xilema, los MPs logran atravesarla en zonas donde está poco desarrollada, o en raíces laterales donde presenta discontinuidades estructurales, comprometiendo su función de barrera (Zhou *et al.* 2022; Ranauda *et al.* 2024).

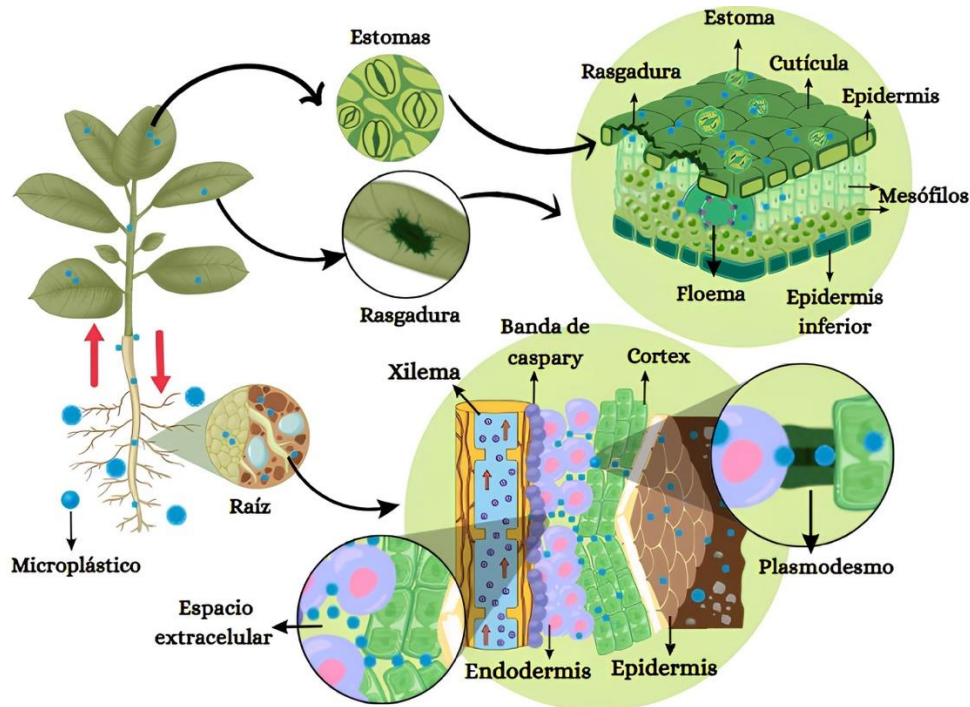


Figura 2. Vías de introducción donde los MPs se translocan en las plantas, como en los estomas, rasgaduras en tejidos y en las raíces, y toman la vía del apoplasto para viajar por el espacio extracelular y por el simplasto, donde se trasladan a través de las uniones entre las células (plasmodesmos).

El transporte de MPs hacia el sistema vascular de la planta puede ocurrir por dos vías principales (Lv *et al.* 2019). La primera es apoplástica, donde los MPs atraviesan los poros de la pared celular sin penetrar las membranas celulares y se desplazan por el espacio intercelular hasta alcanzar el xilema (Li *et al.* 2022). La segunda es simplástica, donde los MPs se transportan a través de los plasmodesmos (estructuras especializadas que conectan células adyacentes) que facilitan el movimiento de agua y nutrientes entre células. En esta última vía, los MPs atraviesan las membranas celulares y se desplazan por el citoplasma a través de los plasmodesmos hasta llegar al xilema (Zhang *et al.* 2022). El ingreso de MPs por las vías apoplástica o simplástica depende principalmente del tamaño de la partícula. Por ejemplo, los poros de la pared celular tienen un rango de 5 a 20 nm, permitiendo el paso de partículas menores a estas dimensiones (Lv *et al.* 2019). Sin embargo, la presencia de partículas mayores a 20 nm en el espacio extracelular se atribuye a la ruptura de la pared celular bajo ciertas condiciones ambientales (Roy *et al.* 2023).

Las hojas son otra vía de entrada para los MPs a través de los estomas, desde donde pueden seguir la ruta apoplástica hasta alcanzar el floema y distribuirse a otras partes de la planta (Zhou *et al.* 2022). Los MPs pueden ingresar a los estomas mediante diferentes mecanismos. Por difusión, se desplazan desde zonas de alta concentración en el exterior hacia zonas de baja concentración en el interior de la hoja, y por permeación, a través de las membranas celulares (Ren *et al.* 2024). La permeación puede ocurrir por dos vías: la lipofílica,

que permite el paso de sustancias hidrofóbicas similares a aceites o grasas, y la hidrofílica, donde los solutos afines al agua atraviesan poros acuosos polares (Li *et al.* 2022).

Los MPs pueden ingresar a través de heridas o lesiones en hojas, tallos o raíces, causadas por patógenos, estrés ambiental o daños mecánicos. Estas lesiones no solo facilitan la entrada directa de MPs, sino que también interfieren con los procesos de cicatrización y alteran la señalización celular debido a la interrupción de las conexiones entre células (Lv *et al.* 2019; Zhou *et al.* 2022; Roy *et al.* 2023).

“El transporte de MPs hacia el sistema vascular de la planta puede ocurrir por dos vías principales: la apoplástica, donde los MPs atraviesan los poros de la pared celular sin penetrar las membranas, y la simplástica, donde los MPs se transportan por los plasmodesmos que facilitan el movimiento de agua y nutrientes entre células.”

El impacto de los microplásticos en las plantas

Los MPs derivados de polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC) y otros polímeros sintéticos, obstaculizan la absorción de agua y nutrientes y provocan una reducción significativa en la biomasa de hojas y raíces (Zhang *et al.* 2022; Giaganini *et al.* 2023). Este efecto también se registra en las semillas, donde los MPs bloquean los poros de la epidermis, impidiendo la imbibición de agua y consecuentemente retrasando o inhibiendo la germinación (Zhang *et al.* 2022).

Además, los MPs, especialmente las partículas de PE y PVC, interfieren con procesos bioquímicos como la fotosíntesis e inhiben la síntesis de clorofila y la actividad de la enzima rubisco, esencial para la fijación de CO₂, así como afectan al fotosistema II (PSII) y alteran el transporte de electrones (Haibin *et al.* 2023). Estas alteraciones provocan efectos negativos en las plantas (Fig. 3), principalmente por la generación excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS). Éstas son moléculas con oxígeno que son muy reactivas y se forman de manera natural, como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), el anión superóxido (O₂⁻) y los radicales hidroxilos (OH•). Se producen principalmente en los cloroplastos durante la fotosíntesis y pueden ser alteradas por los MPs e interactuar con componentes celulares críticos oxidando proteínas, haciendo peroxidación de lípidos que desestabiliza las membranas celulares, y dañando el ADN mediante la ruptura de enlaces y modificaciones en las bases nitrogenadas.

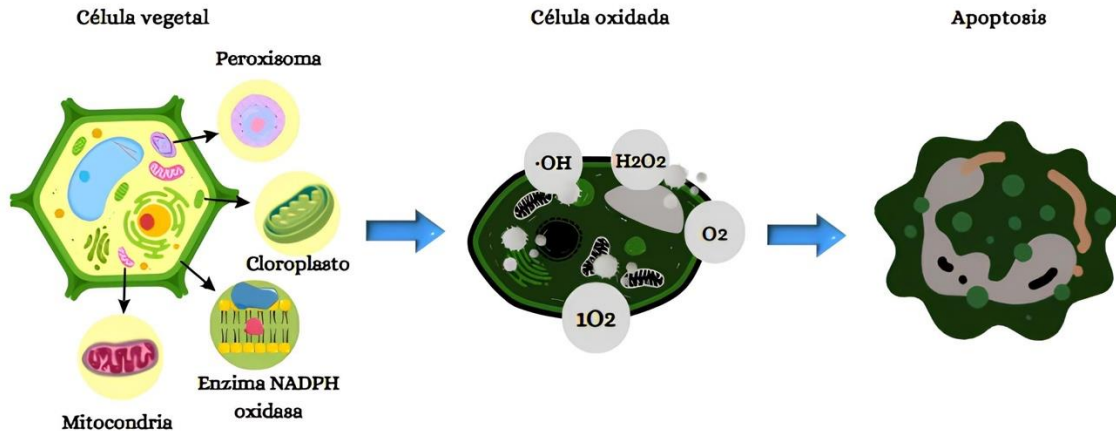


Figura 3. Las especies reactivas de oxígeno (ROS) se generan en diversos orgánulos y estructuras celulares bajo condiciones de estrés. Las ROS incluyen al anión superóxido (O_2^-) que se produce principalmente en la cadena de transporte de electrones de la mitocondria y en los cloroplastos. A partir de este anión se forma el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), un ROS altamente reactivo que se origina en los peroxisomas. Además, se encuentra el radical hidroxilo ($OH^\bullet$), considerado el ROS más reactivo causante de daños significativos en la célula, así como el oxígeno singlete (1O_2), que afecta principalmente a los fotosistemas (Huang *et al.* 2022; Ekner *et al.* 2022).

Cuando la producción de ROS supera la capacidad del sistema antioxidante de la planta, se desencadena la muerte celular programada (apoptosis) (Huang *et al.* 2022; Lee *et al.* 2023; Roy *et al.* 2023). Los MPs de PE y PVC alteran las propiedades físicas de las membranas celulares y modifican su fluidez y grosor, lo que compromete su función como barrera selectiva. También, afectan la integridad de las membranas nucleares, lo que puede resultar en daños al material genético y alterar el funcionamiento celular (Ekner *et al.* 2022; Li *et al.* 2022).

“Estas alteraciones provocan efectos negativos en las plantas, principalmente por la generación excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS).”

Alternativas para el futuro

La acumulación de PE y PVC en los ecosistemas agrícolas es una problemática que afecta severamente a las plantas. Sin embargo, las técnicas de mejoramiento genético ofrecen alternativas prometedoras para incrementar la tolerancia de las plantas a estos contaminantes (Fig. 4). La manipulación de factores de transcripción emerge como herramienta efectiva para

mejorar la resistencia vegetal frente a MPs (Nyakundi *et al.* 2023). Se puede optimizar la expresión de genes que codifican para enzimas antioxidantes clave, como el superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasa (POD), las cuales neutralizan las ROS (Ren *et al.* 2024).



Figura 4. Beneficios derivados de la mejora genética en plantas para la resistencia al estrés por MPs.

La modificación genética también permite incrementar la expresión de proteínas de choque térmico, que protegen a otras proteínas de la desnaturalización, y fortalecer las rutas metabólicas de defensa mediadas por ácido jasmónico y etileno. Estos ajustes moleculares constituyen una red integrada de respuesta al estrés por MPs (Ranauda *et al.* 2024).

La ingeniería genética puede potenciar las interacciones simbióticas entre plantas y microorganismos capaces de degradar MPs mediante la secreción de enzimas específicas que descomponen estos contaminantes (Nyakundi *et al.* 2023). Esta aproximación biotecnológica no solo promete mitigar los efectos negativos de los MPs en las plantas, sino también puede conferir resistencia a múltiples factores de estrés ambiental y contribuir a la sostenibilidad agrícola en ecosistemas contaminados (Roy *et al.* 2023).

Conclusión

Los MPs son una amenaza ambiental para los sistemas agrícolas por su capacidad de interacción con los tejidos vegetales y sus efectos deletéreos en procesos fisiológicos

fundamentales. Los MPs no solo alteran procesos críticos, como la absorción de agua y nutrientes, sino que también comprometen la integridad celular al desencadenar estrés oxidativo y modificar las propiedades de las membranas biológicas. Su ingreso a los tejidos vegetales tiene lugar a través de múltiples vías, incluyendo las rutas apoplástica y simplástica, lo que resulta en una acumulación progresiva que afecta el desarrollo y la productividad de las plantas.

Frente a la contaminación por MPs en el ambiente agrícola, las estrategias biotecnológicas, particularmente la manipulación de factores de transcripción y el fortalecimiento de sistemas antioxidantes, emergen como herramientas prometedoras para mejorar la tolerancia vegetal a estos contaminantes. El análisis de los mecanismos moleculares de respuesta ante el estrés por MPs y el desarrollo de variedades vegetales más resilientes representan áreas cruciales de investigación científica para la agricultura sostenible en ecosistemas impactados por la contaminación plástica. Este conocimiento es fundamental para el desarrollo de estrategias efectivas que permitan mantener la productividad agrícola en un contexto de creciente contaminación ambiental.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) de México, con el proyecto CF-2023-G-636.

Referencias

- Ahmand J. 2023. Effect of Microplastic on the Human Health. IntechOpen eBooks. DOI: 10.5772/intechopen.107149
- Cole M, Lindeque P, Halsband C y Galloway TS. 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin* 62(12):2588-97. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.
- Ekner A, Duka, A, Grzyb T, Lopes I y Chmielowska J. 2022. Plants oxidative response to nanoplastic. *Frontiers in Plant Science* 13:1027608. DOI: 10.3389/fpls.2022.1027608
- Giaganini G, Cifelli M, Biagini D, Ghimenti S, Corti, A, Castelvetro V, Domenici V y Lomonaco T. 2023. Multi-Analytical Approach to Characterize the Degradation of Different Types of Microplastics: Identification and Quantification of Released Organic Compounds. *Molecules* 28(3):1382-1382. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28031382>
- Haibin L, Fupeng S, Xiliang S, Kongming Z, Qun L, Jianlin Z y Guoqiang N. 2023. Single and composite damage mechanisms of soil polyethylene/polyvinyl chloride microplastics to the photosynthetic performance of soybean (*Glycine max* [L.] merr.). *Frontiers in Plant Science* 13 doi: 10.3389/fpls.2022.1100291
- Huang L, Liu Y, Wang X, Jiang C, Zhao Y, Lu M y Zhang J. 2022. Peroxisome-Mediated Reactive Oxygen Species Signals Modulate Programmed Cell Death in Plants. *International Journal of Molecular Science* 23: 10087. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms231710087>

- Lee J, Han M, Shin Y, Min J, Heo G y Lee Y. 2023. How Extracellular Reactive Oxygen Species Reach Their Intracellular Targets in Plants. *Molecules and Cells* 46(6): 329-336. DOI: <https://doi.org/10.14348/molcells.2023.2158>
- Li M, Zhang Y, Li C, Lin J, y Li X. 2022. Polyvinyl Chloride Nanoparticles Affect Cell Membrane Integrity by Disturbing the Properties of the Multicomponent Lipid Bilayer in *Arabidopsis thaliana*. *Molecules* 27:5906. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27185906>
- Lv J, Christie P y Zhang S. 2019. Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological challenges. *Environmental Science: Nano* 6(1): 41–59. DOI: 10.1039/c8en00645h.
- Marszałek A, Marzec W, Łakoma A, Marzec M, Choiński M, Wasiewicz P, Kuczyński P, Wydra A, Kutyla K, y Jan W. 2024. Impact of microplastics on human health: exposure mechanisms and potential health implications. *Quality in Sport* 19: 54024. <https://doi.org/10.12775/QS.2024.19.54024>
- Nyakundi D, Emmanuel O y Kimaro D. 2023. Genetic engineering approach to address microplastic environmental pollution – critical review. *Journal of Environmental Engineering and Science*, doi: 10.1680/jenes.22.00088
- Prata J y Dias P. 2023. Microplastics in Terrestrial Domestic Animals and Human Health: Implications for Food Security and Food Safety and Their Role as Sentinels. *Animals* 13: 661. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani13040661>
- Qaiser Z, Aqueel M, Sarfraz W, Rizvi Z, Noman A, Naeem S y Khalid N. 2023. Microplastics in wastewaters and their potential effects on aquatic and terrestrial biota. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 8 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100536>
- Ranauda M, Tartaglia M, Zuzolo D, Prigioniero A, Maisto M, Fosso E, Sciarrillo R, y Guarino C. 2024. From the rhizosphere to plant fitness: Implications of microplastics soil pollution. *Environmental and Experimental Botany* 226: 105874 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105874>
- Ren F, Huang J, y Yang Y. 2024. Unveiling the impact of microplastics and nanoplastics on vascular plants: A cellular metabolomic and transcriptomic review. *Exotoxicology and Environmental Safety* 279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116490>
- Roy T, Dey T, y Jamal M. 2023. Microplastic/nanoplastic toxicity in plants: an imminent Concern. *Environmental Monitoring and Assessment* 195:27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10654-z>
- Zhou P, Wang L, Gao J, Jiang Y, Adeel M, y Hou D. 2022. Nanoplastic–plant interaction and implications for soil health. *Soil Use and Management* 39:13–42. <https://doi.org/10.1111/sum.12868>
- Zhang S, Gao W, Cai K, Liu T, y Wang X. 2022. Effects of Microplastics on Growth and Physiological Characteristics of Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Agronomy* 12: 2692. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112692>

Sánchez-Cifuentes WA, Herrera-Alamillo MA, Rodríguez-Zapata LC. 2025. Los microplásticos: enemigo silencioso de las plantas. *Bioagrociencias* 18 (1): 63-71. DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.6183>