

La fitorremediación como alternativa natural para recuperar suelos contaminados con metales pesados^φ

María del Pilar Herrera-Mendoza¹, Laura Sánchez-Castillo^{2*},
Edmar Meléndez-Jaramillo²

Introducción

La contaminación del suelo por metales pesados representa una problemática ambiental importante debido a que, a diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales no se degradan y pueden permanecer en el medio por largos periodos (Aburto-Gutiérrez *et al.* 2026). Dependiendo de las características del suelo, los metales pueden acumularse, cambiar de forma química, movilizarse hacia el agua o ser absorbidos por las plantas, lo que representa un riesgo para los ecosistemas y la salud humana (Jiao *et al.* 2022).

Existen diversos métodos fisicoquímicos para remover metales del suelo, como la reposición de la capa superficial, la eliminación electrocinética y el tratamiento térmico (lavado del suelo) (Atuchin *et al.* 2023). Si bien estos métodos pueden ser rápidos y efectivos, presentan ciertas limitaciones, como costos elevados, complejidad técnica y dificultades para aplicarse en grandes extensiones de suelo, por lo que se requieren alternativas eficientes, fiables y ambientalmente responsables para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados (Abdel-Rahman 2022).

^φ ¹División de estudios de posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, C.P. 87000, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, ² Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario, CP 87120, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. * laura.sanchez@uat.edu.mx
DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.7148>



Ante limitaciones técnicas para el estudio de metales pesados en suelo, se ha dispuesto de alternativas como la biorremediación, la cual utiliza organismos como agentes biológicos para disminuir la presencia, movilidad o el riesgo de contaminantes (Kumar *et al.* 2024). Como parte de estas alternativas, la fitorremediación ha adquirido un papel estratégico ya que dispone de plantas para la descontaminación de suelo y aguas superficiales (Tahir *et al.* 2016). Además, la fitorremediación es una tecnología viable, rentable y efectiva para suelos contaminados por metales pesados (Thakur *et al.* 2022). El objetivo de este artículo es describir la importancia de la fitorremediación como alternativa natural para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados.

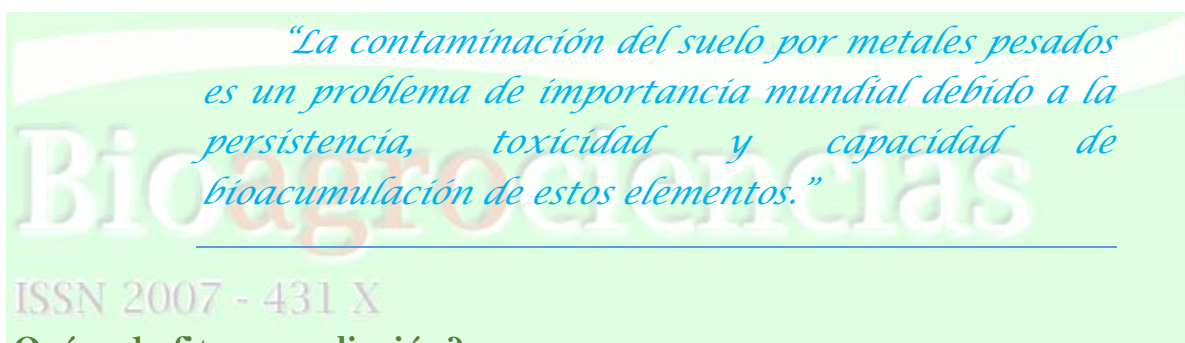
Metales pesados en suelos: un problema invisible

La contaminación del suelo por metales pesados es un problema de importancia mundial debido a la persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación de estos elementos (Aburto-Gutiérrez *et al.* 2026). Pero ¿Cómo llegan los metales al suelo? A pesar de que estos metales pueden originarse por procesos naturales, como la fragmentación del material parental durante la formación del suelo, los incendios forestales y las erupciones volcánicas, su aporte principal proviene de actividades antropogénicas como la minería, la industrialización, la quema de combustibles fósiles, el vertido en rellenos sanitarios y la aplicación de sustancias agroquímicas al medio (Bhat *et al.* 2022).

Dado que los metales no se biodegradan, pueden permanecer en el suelo hasta acumularse de manera gradual y afectar la calidad del suelo, el crecimiento de las plantas y el equilibrio de los ecosistemas (Wei *et al.* 2023). Sin embargo, su presencia no es visible, por lo que pueden pasar desapercibidos durante largos periodos. En este sentido, son un problema invisible porque sus efectos pueden residir ocultos mientras lentamente alteran el equilibrio del suelo y del ecosistema (Fig. 1).



Figura .1 Contaminación del suelo por metales pesados.



¿Qué es la fitorremediación?

La fitorremediación (del griego *phyto*, planta, y del latín *remedium*, remediar) es una técnica biotecnológica que dispone de plantas para extraer, estabilizar, o transformar, contaminantes del medio y aprovechar sus capacidades metabólicas y fisiológicas naturales (Geeta y Choudhary 2024). Es una de las tecnologías más efectivas, viables y rentables para la descontaminación de suelos impactados por contaminantes como los metales pesados (Thakur *et al.* 2022), y es una alternativa de bajo costo y útil para tratar grandes superficies. No obstante, su aplicación puede ser lenta ya que depende de la disponibilidad de los metales y una gestión adecuada de la biomasa vegetal contaminada (Karnwal *et al.* 2024). En los suelos contaminados, el uso de especies vegetales para su remediación puede contribuir a su recuperación menos invasiva y con un impacto ambiental menor (Aburto-Gutiérrez *et al.* 2026).

Existen mecanismos donde las plantas ayudan a recuperar ambientes contaminados y estos mecanismos se conocen como fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización, fitodegradación, rizofiltración, rizodegradación y fitoevaporación (Awa y Hadibarata 2020) (Fig. 2). Sin embargo, no todos estos mecanismos funcionan de la misma manera ni son

adecuados para todos los sitios. Entonces, ¿Cuál funciona mejor? ¿Cómo elegir el mecanismo más adecuado? La selección no depende de qué planta absorbe más contaminantes sino de varios factores, como las propiedades del suelo, la naturaleza química y propiedades del contaminante, las características de las plantas y las condiciones ambientales del sitio (Goicochea-Trelles y García-López 2022).

En suelos con metales pesados, los mecanismos de fitorremediación son la fitoextracción, la fitoestabilización y la fitovolatilización (Awa y Hadibarata 2020). La fitoextracción dispone de plantas que absorben grandes cantidades de metales por sus raíces, los transportan a sus tejidos aéreos y los acumulan en el tallo y hojas para posteriormente ser retirados por la cosecha de la biomasa vegetal (Thakur *et al.* 2022). La cosecha de estas plantas puede usarse para diversos fines, como la producción de biocombustibles o alimento para el ganado, siempre y cuando los contaminantes acumulados se mantengan a concentraciones seguras (Priya *et al.* 2023).

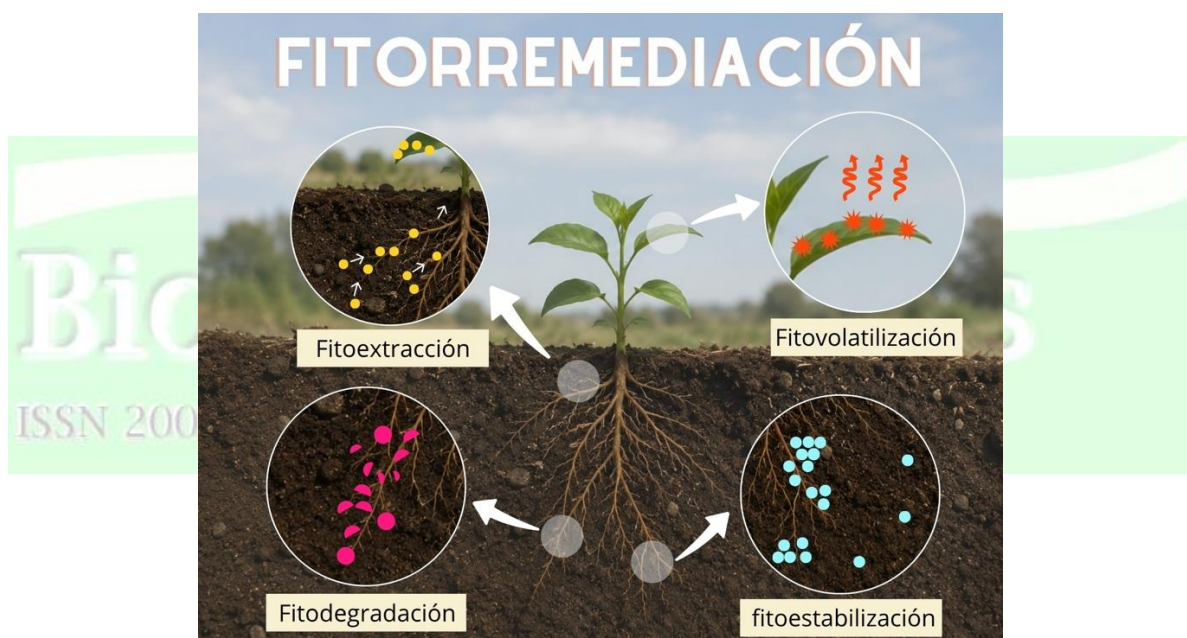


Figura 2. Mecanismos de fitorremediación.

La fitoestabilización retiene los metales en las raíces por la formación de complejos que limitan su movilidad en el suelo (Kumar *et al.* 2024). Para ello, se emplean plantas con un sistema radicular desarrollado y capaz de reducir la movilidad y biodisponibilidad de los metales en el suelo. Esto reduce el riesgo de lixiviación (arrastre de sustancias a través del suelo por acción del agua) hacia aguas subterráneas y limita su incorporación a la cadena trófica (Azizi *et al.* 2023).

La fitovolatilización consiste en que las plantas absorben los metales en el suelo y los transforman en compuestos menos tóxicos, y posteriormente los liberan a la atmósfera en formas gaseosas y menos tóxicas por transpiración de las hojas (Kumar *et al.* 2024). Este mecanismo se ha utilizado para el mercurio y selenio debido a que tienen una alta volatilidad;

sin embargo, no elimina los contaminantes completamente, sino que los trasfiere hacia formas menos tóxicas que se transfieren del suelo hacia la atmósfera (Awa y Hadibarata 2020).

“La fitorremediación (del griego phyto, planta, y del latín remedium, remediar) es una técnica biotecnológica que dispone de plantas para extraer, estabilizar, o transformar, contaminantes del medio y aprovechar sus capacidades metabólicas y fisiológicas naturales.”

¿Qué atributos tiene una planta fitorremediadora?

Las plantas fitorremediadoras presentan rasgos morfológicos, fisiológicos y ecológicos específicos que les permiten sobrevivir y recuperar ambientes contaminados sin daños severos (Goicochea-Trelles y Garcia-Lopez 2022). Sus rasgos morfológicos, como la producción de biomasa, el desarrollo radicular y el crecimiento rápido, son importantes porque favorecen la estructura física de la planta para absorber sustancias contaminantes (Geeta y Choudhary 2024).

Los rasgos fisiológicos, como la tolerancia a los metales pesados y la capacidad de absorber, transportar, acumular y retener estos contaminantes, permiten que la planta los tolere. Los rasgos ecológicos, como la adaptación a las condiciones ambientales locales, favorecen la supervivencia y establecimiento de la planta (Geeta y Choudhary 2024). De manera general, las plantas fitorremediadoras absorben metales desde sus raíces, toleran diferentes concentraciones de contaminantes y se adaptan a las condiciones ambientales del sitio afectado (Bhat *et al.* 2022).

Plantas nativas: aliadas locales

El uso de plantas nativas para fitorremediación es una estrategia eficaz para la recuperación de ecosistemas por la adaptabilidad de las plantas a las condiciones del área y presenta mejores tasas de supervivencia, adaptación, crecimiento y reproducción (Wong-Argüelles *et al.* 2021). Estas plantas son aliadas para la fitorremediación al ofrecer ventajas, como mejor establecimiento y menor riesgo de alterar el equilibrio ecológico (Geeta y Choudhary 2024). Sin embargo, a pesar de sus beneficios, su uso conlleva desafíos por el escaso conocimiento sobre la identificación de especies con potencial fitorremediador en sitios contaminados y la necesidad de fortalecer criterios normativos para su implementación (López-Hernández y Morales-Hernández 2022).

En México, algunas de las plantas nativas con potencial fitorremediador para metales pesados son girasol *Helianthus annuus*, romerillo *Bidens pilosa* L., hierba mora *Solanum americanum* Mill., hierba de la golondrina *Euphorbia prostrata* Aiton, flaveria amarilla *Flaveria angustifolia* y escobilla *Buddleja scordioides* Kunth (Wong-Argüelles *et al.* 2021; Aburto-Gutiérrez *et al.* 2026). No obstante, la investigación científica en México sobre las plantas nativas con potencial fitorremediador todavía es limitada en comparación con otras regiones del mundo (Fig. 3).

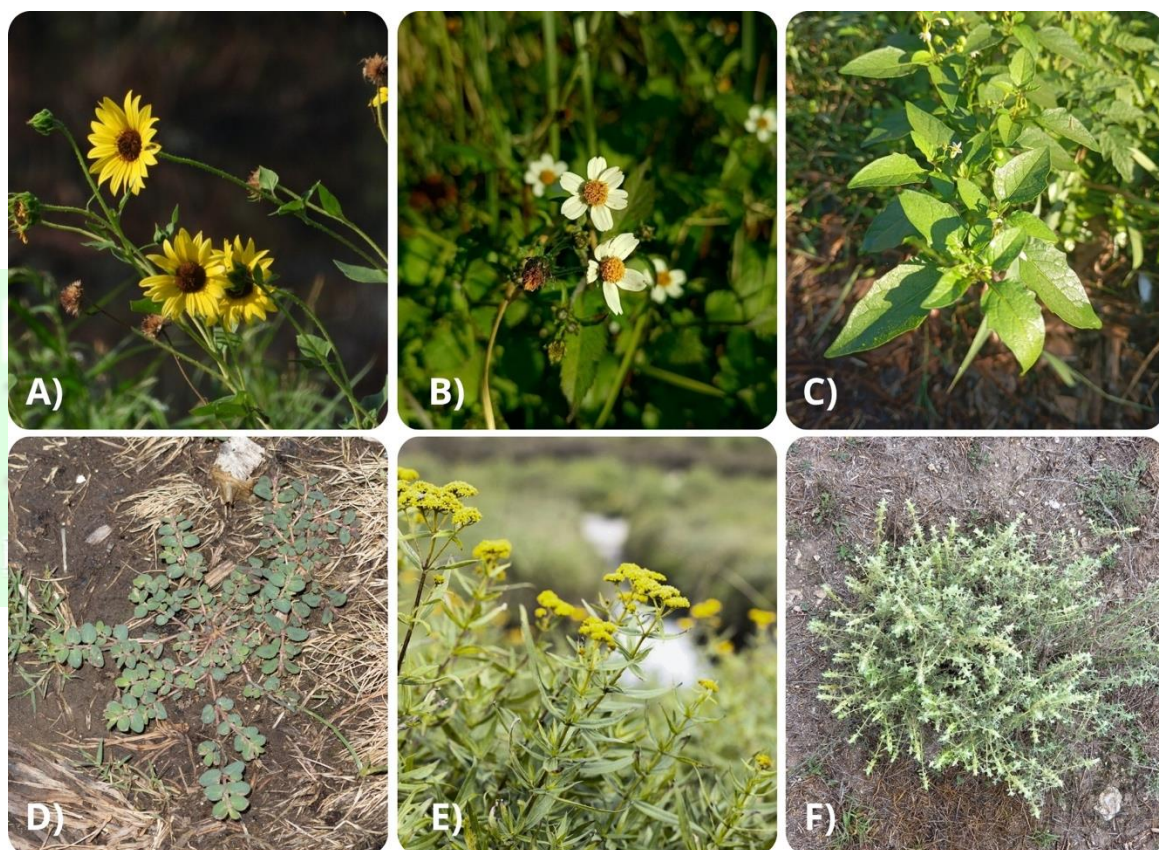


Figura 3. Plantas nativas fitorremediadoras para metales pesados en suelos: A) girasol *Helianthus annuus*, B) romerillo *Bidens pilosa* L., C) hierba mora *Solanum americanum* Mill., D) hierba de la golondrina *Euphorbia prostrata* Aiton, E) flaveria amarilla *Flaveria angustifolia*, F) escobilla *Buddleja scordioides* Kunth.

“Las plantas fitorremediadoras presentan rasgos morfológicos, fisiológicos y ecológicos específicos que

les permiten sobrevivir y recuperar ambientes contaminados sin daños severos.”

Conclusión

La fitorremediación es una alternativa natural importante, versátil y de bajo impacto para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados. A través de diferentes mecanismos, las plantas pueden absorber, disminuir, inmovilizar o transformar estos contaminantes. El uso de estas plantas requiere de una selección de especies adecuadas y considerar las características del suelo, los contaminantes presentes y las condiciones ambientales. En este sentido, las plantas nativas son una opción para la fitorremediación debido a su adaptación a las condiciones ambientales locales, ya que pueden tolerar, acumular o estabilizar metales pesados. Por esto, identificar especies nativas vegetales con potencial fitorremediador es fundamental para diseñar estrategias de recuperación para suelos afectados por metales pesados.

Referencias

- Abdel-Rahman GN. 2022. Heavy metals, definition, sources of food contamination, incidence, impacts and remediation: a literature review with recent updates. *Egyptian Journal of Chemistry* 65(1):419-437. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.80825.4004>.
- Aburto-Gutiérrez YA, Amaro-Espejo IA, Corona-López SL y Megchún-García JV. 2026. Plantas acumuladoras de metales pesados en México. *Investigación y Ciencia Aplicada a la Ingeniería* 9(54):35-40.
- Atuchin VV, Asyakina LK, Serazetdinova YR, Frolova AS, Velichkovich NS y Prosekov AY. 2023. Microorganisms for bioremediation of soils contaminated with heavy metals. *Microorganisms* 11(4):864. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040864>.
- Awa SH y Hadibarata T. 2020. Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: a review. *Water, Air & Soil Pollution* 231:47 <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4426-0>.
- Azizi M, Faz A, Zornoza R, Martinez-Martinez S y Acosta JA. 2023. Phytoremediation potential of native plant species in mine soils polluted by metal(loid)s and rare earth elements. *Plants* 12(6):1219. <https://doi.org/10.3390/plants12061219>.
- Bhat SA, Bashir O, Ul Haq SA, Amin T, Rafiq A, Ali M, Pinê Américo-Pinheiro JH y Sher F. 2022. Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere* 303(1):134788. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>.
- Geeta y Choudhary S. 2024. A comprehensive study on native plant species for phytoremediation of heavy metals contamination in soil. *Journal of Science Innovations and Nature of Earth* 4(4):15-19. <https://doi.org/10.59436/jsiane.274.2583-2093>.

- Goicochea-Trelles PA y Garcia-Lopez YJ. 2022. Fitorremediación para recuperar suelos contaminados por metales pesados: discusión de revisión sistemática. *Agroindustrial Science* 12(3):293-303. <http://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.03.08>.
- Jiao W, Niu Y, Zhou J, Zhang H, Song H y Li K. 2022. Source apportionment of bioavailable trace metals in soil based on chemical fractionation and its environmental implications. *Environmental Science and Pollution Research* 29:17062-17071. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16987-5>.
- Karnwal A, Martolia S, Dohroo A, Al-Tawaha ARMS y Malik T. 2024. Exploring bioremediation strategies for heavy metals and POPs pollution: the role of microbes, plants, and nanotechnology. *Frontiers in Environmental Science* 12:1397850. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1397850>.
- Kumar A, Dadhwal M, Mukherjee G, Srivastava A, Gupta S y Ahuja V. 2024. Phytoremediation: Sustainable Approach for Heavy Metal Pollution. *Scientifica* 2024(1): 3909400. <https://doi.org/10.1155/2024/3909400>.
- López-Hernández ME y Morales-Hernández OE. 2022. Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: una revisión. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo* 12(2):15-28 <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15197>.
- Priya AK, Muruganandam M, Ali SS y Kornaros M. 2023. Clean-up of heavy metals from contaminated soil by phytoremediation: a multidisciplinary and eco-friendly approach. *Toxics* 11(5):422. <https://doi.org/10.3390/toxics11050422>.
- Tahir U, Yasmin A y Khan UH. 2016. Phytoremediation: potential flora for synthetic dyestuff metabolism. *Journal of King Saud University-Science* 28(2):119-130. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.05.009>.
- Thakur R, Sarvade S y Dwivedi BS. 2022. Heavy metals: soil contamination and its remediation. *AATCC Review* 10:59-76. <https://doi.org/10.58321/AATCCReview.2022.10.02.59>.
- Wei M, Pan A, Ma R y Wang H. 2023. Distribution characteristics, source analysis and health risk assessment of heavy metals in farmland soil in Shiquan County, Shaanxi Province. *Process Safety and Environmental Protection* 171:225-237. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.089>.
- Wong-Argüelles C, Carranza-Álvarez C, Alonso-Castro AJ y Ilizaliturri-Hernández CA. 2021. *In situ* phytoremediation in México: a review. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44(2):133-142. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.133>.

Herrera-Mendoza MP, Sánchez-Castillo L, Meléndez-Jaramillo E. 2026. La fitorremediación como alternativa natural para recuperar suelos contaminados con metales pesados. *Bioagrociencias* 19 (2): 44-51.
DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.7148>