

Artículo de divulgación

Fitorremediación de suelos contaminados con metales asistida con nanopartículas

Phytoremediation of contaminated soil with metals assisted with nanoparticles

Eduardo González-Valdez ^{1,*}, Edith Lorena Arroyo-Ordaz ¹, Alejandro Alarcón ², Ronald Ferrera-Cerrato ², Rosalio Mercado-Camargo ¹, Leslie Malleli Barriga-Téllez ¹, Verónica Lizbeth González-Valdez ³, Rosa María García Martínez ¹, Diana Cecilia Maya Cortes ¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Químico Farmacobiología. Tzintzuntzan 173, Matamoros, 58240 Morelia, Michoacán, México.

² Posgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo 56264. Estado de México, México.

³ UNAM, Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8745, Sin Nombre, la Huerta, 58341. Morelia, Michoacán, México.

*Autor para correspondencia: lalogvaldez@gmail.com; eduardo.gonzalez.valdez@umich.mx

Recibido:

26/05/2026

Aceptado:

27/06/2026

Publicado:

1/07/2026

RESUMEN

La fitorremediación es una tecnología que utiliza especies vegetales vivas para remediar suelos contaminados con metales pesados (MP) como Pb, Cd, Cr, o Cu, los cuales pueden ser estabilizados, o acumulados en órganos aéreos. Sin embargo, muchas veces los MP no se encuentran biodisponibles en la solución del suelo y no pueden ser recuperados durante el proceso de fitorremediación de manera natural. No obstante, en las últimas décadas han surgido tecnologías eficaces basadas en nanopartículas menores de 100 nm (orgánicas, inorgánicas, y basadas en carbono), combinadas con la fitorremediación con el fin de hacer el proceso de remediación en el suelo más eficiente, al promover mayor crecimiento vegetal, así como mayor solubilización, estabilización o acumulación del metal en los órganos vegetales. Esta revisión analizó los efectos de la fitorremediación de suelos contaminados con MP, asistida con nanopartículas.

Palabras clave: nanomateriales; contaminación; adsorción; reacciones redox; óxidos metálicos.

ABSTRACT

Phytoremediation is a technology that utilizes living plant species to remediate contaminated soil with heavy metals (HM) such as Pb, Cd, Cr, or Cu, which can be stabilized or accumulated in above-ground plant organs. However, HM are often not bioavailable in the soil solution and cannot be naturally recovered during phytoremediation process. Nevertheless, in recent decades, effective technologies based on nanoparticles lower than 100 nm (organic, inorganic, y carbon-based), combined with phytoremediation have emerged to make the soil remediation process more efficient by promoting greater plant growth, as well as increased solubilization, stabilization, or accumulation of the metal in

plant organs. This review analyzed the effects of phytoremediation of contaminated soils with HM, assisted with nanoparticles.

Keywords: nanomaterials; contamination; adsorption; redox reactions; metal oxides.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la contaminación del suelo por metales pesados (MP), ha sido considerado como un problema grave de salud humana, debido a la asociación con el desarrollo de enfermedades y trastornos en el sistema digestivo, distintas enfermedades neurológicas, disfunción renal y cáncer (Mahmud et al., 2026); y con un enorme efecto negativo para el ambiente. Esta contaminación, es ocasionada por las actividades humanas como la minería, la producción de residuos industriales (pintura, baterías) y por la agricultura (uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas). Estos MP son tóxicos, aún en bajas concentraciones y pueden permanecer en los sitios por tiempo indefinido (Badamasi et al., 2026). Los cuales son absorbidos por las plantas en áreas de cultivos y pueden ser ingeridos por el humano al consumir estos alimentos. Por todo lo anterior, se hace necesaria la aplicación de técnicas asociadas a la recuperación y/o remediación de suelos contaminados que estas actividades generan.

Las tecnologías tradicionales de remediación de suelos contaminados, se realizan mediante tratamientos físicos y químicos tales como: lavado de suelos con ácidos fuertes o vertido de tierras, etc., suelen ser costosos, poco eficientes, y tienen un impacto destructivo en la fertilidad del suelo y pueden generar más emisiones de MP en el ambiente (Arora et al., 2024; Badamasi et al., 2026). Por ello, surge la necesidad de biotecnologías más eficientes y amigables con el ambiente, como la fitorremediación, que representa ser un método seguro, estético y más amigable con el ambiente. No obstante, la fitorremediación puede tener limitaciones relacionadas con largos tiempos de recuperación del sitio contaminado, fitotoxicidad de los MP presentes, susceptibilidad a las condiciones climáticas, baja fertilidad del suelo, etc. Para superar estos desafíos, en la fitorremediación se puede incorporar la aplicación de nanomateriales (nanopartículas, NPs) para dar una solución más efectiva y novedosa para la destoxificación y la limpieza de suelos contaminados con MP tóxicos (Ding et al., 2024).

Las NPs (tamaño menor a 100 nm) tienen fuerte afinidad a los MP (Badamasi et al., 2026). Al reducir el tamaño de un material a escala de nanométrica, aumenta el área superficial en las NPs, es decir, proporciona mayor número de sitios activos o mayor superficie de reacción, lo que mejora su reactividad para interactuar con los componentes del suelo como la materia orgánica o los MP. Esto mejora la eficiencia de la fitorremediación del contaminante, y además, promueve el crecimiento vegetal, incrementa la biodisponibilidad del contaminante, y reduce la toxicidad del metal (Gulzar y Mazumder, 2022; Badamasi et al., 2026). En este sentido, las NPs pueden remover aproximadamente hasta un 80 a 90 % de metales tales como cadmio (Cd^{2+}), cobre (Cu^{2+}), y plomo (Pb^{2+}) (Sharma et al., 2026); sin embargo, el efecto y el comportamiento de las NPs puede ser incierto en función de su concentración o el tipo de NPs utilizadas (Pérez-Hernández et al., 2024). Este artículo explora información sobre la aplicación de nanopartículas en la fitorremediación de suelos contaminados con MP.

FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación es una biotecnología que utiliza plantas y microorganismos asociados para absorber o remover MP de un suelo contaminado, ya que tienen la capacidad natural de estabilizar o acumular el contaminante en sus tejidos internos. Esta biotecnología resulta atractiva debido a su simplicidad, es ambientalmente segura, económicamente viable, y con gran aceptación pública (Arora et al., 2024).

La fitorremediación de suelos contaminados por MP comprende múltiples mecanismos de descontaminación de los MP por la planta, como la acumulación del metal en tallos y hojas (fitoextracción/fitoacumulación), así como la inmovilización del metal en la zona de la raíz (fitoestabilización), o la emisión del metal en la atmósfera en una forma menos tóxica (fitovolatilización) (Gomes, 2025) (Figura 1).

La fitorremediación presenta limitaciones como la susceptibilidad a condiciones climáticas o la presencia de elevadas concentraciones de los contaminantes en el

suelo que provocan la inhibición del crecimiento vegetal y disminuyen la eficiencia del proceso de fitorremediación (Arora et al., 2024). No obstante, para mitigar la fitotoxicidad de los contaminantes, la fitorremediación puede ser asistida con la aplicación de microorganismos (hongos o bacterias), agentes solubilizantes (tiocianato o tiourea), y la nanotecnología representada por nanomateriales (NPs), para reducir el estrés causado por los MP y mejorar la eficiencia en la restauración/destoxificación del sitio contaminado.

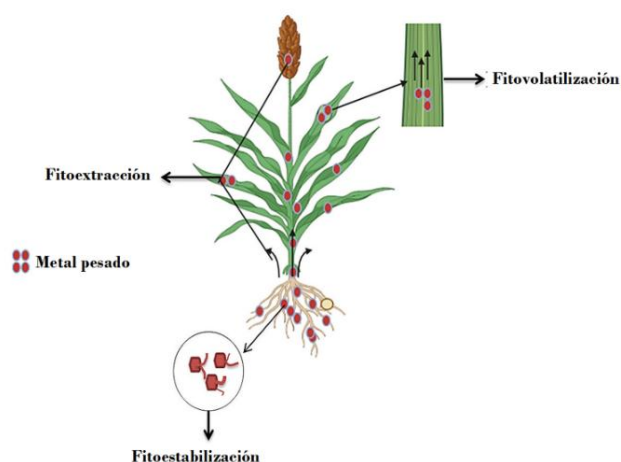


Figura 1. Clasificación de los mecanismos de la fitorremediación de MP (modificado de Badamasi et al., 2026).

NANOMATERIALES

Los nanomateriales son sustancias que poseen un diámetro de 1-100 nm en al menos una de las tres dimensiones (Badamasi et al., 2026), y son clasificados en cuatro categorías en función de su estructura o composición: i) nanomateriales orgánicos; ii) nanomateriales a base de carbono; iii) nanomateriales inorgánicos; iv) materiales compuestos formados por una mezcla de varias NPs (Eker et al., 2024; Badamasi et al., 2026) (Figura 2). Así, las NPs, se han utilizado en diversos campos como la biología, la medicina, o en el ambiente, particularmente en el sistema edáfico (Ping et al., 2024).

En el sistema suelo-planta, las NPs se han aplicado en las plantas principalmente por vía foliar (aspersión sobre la superficie de la hoja), recubrimiento de las semillas y vía radicular (aplicación directa al suelo); durante el proceso de fitorremediación se suele aplicar las NPs directamente

sobre el suelo contaminado y éstas pueden ser adsorbidas e ingresar por la raíz de la planta (fitorremediación asistida con NPs) (Wang et al., 2023).

En la fitorremediación asistida con NPs la vía más común de aplicación es mediante el suelo, poco tiempo después de haber emergido las plántulas (Pérez-Hernández et al., 2024). Los mecanismos que explican la remediación de contaminantes en el suelo se relacionan con procesos de adsorción y reacciones redox (Pérez-Hernández et al., 2024). Así, las NPs pueden convertir los MP en formas químicas menos tóxicas, pero éstos al permanecer en el suelo, pueden regresar a su forma original de toxicidad, lo cual es producido por los cambios de pH del suelo, por procesos de reacciones de oxidación o por la actividad microbiana (Gulzar y Mazumder, 2022). No obstante, los sistemas de fitorremediación asistida con nanopartículas pueden ser una solución al retenerlos en un área específica de las raíces (fitoestabilización) o acumularlos en los tejidos internos (fitoextracción) de los órganos vegetales aéreos, primordialmente.

i) Nanopartículas orgánicas ii) Nanopartículas inorgánicas iii) Nanopartículas a base de carbono



Figura 2. Clasificación de las nanopartículas en función de su composición (modificado de Eker et al., 2024).

LA FITORREMEDIACIÓN DE METALES CON NANOPARTÍCULAS

Las NPs interactúan con las plantas de diversas maneras, pueden promover el crecimiento vegetal, aumentan su capacidad para absorber y tolerar el contaminante, eliminan directamente el contaminante mediante el uso de NPs, y promueven la biodisponibilidad del contaminante, lo que en conjunto puede potenciar la efectividad de la fitorremediación (Gulzar y Mazumder, 2022; Gomes, 2025).

El tamaño de las NPs (<100 nm), su alta afinidad a los metales, su elevada área superficial específica, y su elevada concentración de sitios activos, son características fundamentales de las NPs durante el

proceso de fitorremediación de MP (Badamasi et al., 2026). Las NPs mejoran la biodisponibilidad de los MP, potencializan la solubilidad y la movilidad del metal en el suelo, y cuya absorción y acumulación por la raíz es más eficiente, lo que facilita la fitorremediación del sitio contaminado (Arora et al., 2024; Pérez-Hernández et al., 2024).

Asimismo, entre las NPs más utilizadas para la fitorremediación de suelos contaminados con MP se encuentran los nanotubos de carbono, y las NPs inorgánicas con una elevada afinidad a metales como son nZVI, TiO_2 , ZnO, CeO, MnO, los cuales pueden promover el crecimiento vegetal y la remediación del suelo (Ding et al., 2024, Sharma et al., 2026). Por ejemplo, las NPs de TiO_2 (15-40 nm) son aplicadas en el suelo para estimular una mayor solubilización, absorción y translocación de antimonio (Sb) con *Sorghum bicolor* L. durante el proceso de fitorremediación, lo que minimiza el riesgo de toxicidad al dispersarse en el ambiente (Zand y Heir, 2020).

Por otro lado, Matos et al. (2017) informaron que los nanotubos de carbono también se caracterizan por su gran superficie, y capacidad para adsorber Cu, Pb, y Zn sobre su superficie, ocasionando la inmovilización de los metales en agua y el suelo, lo que protege a las plantas de la fitotoxicidad. A su vez, los nanotubos de carbono promovieron la solubilización, acumulación y la translocación de Cd en *Boehmeria nivea* L., y disminuyeron su toxicidad al estimular el crecimiento vegetal, a partir de $500 \text{ mg Cd kg}^{-1}$, lo que permite remediar el sitio contaminado de una manera más amigable y eficiente con el ambiente (Gong et al., 2019). Las NPs modifican los estados de oxidación del metal, y hacen que los contaminantes sean absorbidos por la raíz, o bien, las NPs al unirse a los metales, reducen la fitotoxicidad, favoreciendo con ello, que las plantas sobrevivan y prosperen en ambientes contaminados con MP (Gomes, 2025).

En un estudio realizado en México, la aplicación directa de nanopartículas de ZnO en el suelo, promovió la biomasa de tallo, hojas y raíz en *Helianthus annuus* L. en un suelo contaminado con As y Pb, e incrementó su acumulación natural en órganos aéreos vegetales, favoreciendo el proceso de fitorremediación, con lo cual se puede reducir su biodisponibilidad de As y Pb en el

suelo y minimizar el riesgo de toxicidad en la cadena alimentaria (Pérez-Hernández et al., 2024).

Por otro lado, la aplicación de otros nanomateriales incorporados directamente en el suelo (Si-NPs o TiO_2 -NPs) pueden proteger a las plantas de la fitotoxicidad en *Pisum sativum* L. al modificar el estado de oxidación de Cr^{6+} a Cr^{3+} , o mejorar la absorción de Cd en *Glycine max* L., y minimizar los efectos tóxicos del metal, respectivamente (Tripathi et al., 2015; Sing y Lee, 2016).

En general, la fitorremediación asistida con nanopartículas podría ser un proceso más eficiente para eliminar, inmovilizar o reducir metales durante la remediación del suelo contaminado, al promover mayor producción de biomasa vegetal; no obstante, la capacidad para absorber y tolerar NPs puede variar entre especies vegetales, y su absorción puede tener efectos positivos como negativos, dependiendo del tipo, tamaño y concentración de las NPs (Kumar et al., 2026). Por ejemplo, en México, Medina-Pérez et al. (2018) obtuvieron mayor número de vainas, semillas y rendimiento de frijol, tras aplicar NPs de magnetita, ferrihidrita, hematita.

CONCLUSIONES

La aplicación de la fitorremediación asistida con nanopartículas se ha utilizado para hacer más efectivos los procesos de remediación de suelos contaminados con MP y en menor tiempo. Esta tecnología podría ser prometedora para su implementación en México; debido a los beneficios que esta técnica puede tener, en comparación con las técnicas tradicionales de fitorremediación. No obstante, el uso combinado de nanopartículas-fitorremediación-microorganismos (bacterias u hongos) se encuentra en fase de exploración y de prueba. Por otro lado, aún persisten vacíos de conocimiento sobre el impacto de las NPs aplicadas al suelo, a largo plazo, en relación a su comportamiento y destino, a su impacto sobre los microorganismos, e incluso a su posible efecto fitotóxico.

Por último, la fitorremediación asistida con nanopartículas es una alternativa innovadora que puede promover el crecimiento vegetal, aumentar la capacidad de la planta para absorber o mejorar la tolerancia al contaminante. El uso de NPs metálicas u óxido-metálicas, puede mejorar el rendimiento de la fitorremediación, aunque es necesario seguir

investigando para obtener conocimiento de su aplicación.

Literatura citada

- Arora, D., Arora, A., Panghal, V., Singh, A., Bala, R., Kumari, S. & Kumar, S. (2024). Unleashing the feasibility of nanotechnology in phytoremediation of heavy metal-contaminated soil: A critical review towards sustainable approach. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(57). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06874-9>
- Badamasi, H., Aliyu Abdullahi, U., Praveen Kumar, A., Durumin Iya, N.I., Varra, V., Ademola Olaleye, A. & Falalu Hamza, M. (2026). Nanotechnology-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soils: A state-of-the-art review on recent progress, challenges, and future directions. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 35(4), 565–608. <https://doi.org/10.1080/15320383.2025.2536035>.
- Ding, S., Liang, Y., Wang, M., Hu, R., Song, Z., Xu, X., Zheng, L., Shen, Z. & Chen, C. (2024). Less is more: A new strategy combining nanomaterials and PGPB to promote plant growth and phytoremediation in contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 469, 134110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134110>
- Eker, F., Duman, H., Akdasçi, E., Bolat, E., Saritas, S., Karav, S. & Witkowska, A.M. (2024). A comprehensive review of nanoparticles: From classification to application and toxicity. *Molecules*, 29(15). <https://doi.org/10.3390/molecules29153482>
- Gomes, M.P. (2025). Nanophytoremediation: advancing phytoremediation efficiency through nanotechnology integration. *Discover Plants*, 2(8). <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00090-x>
- Gong, X., Huang, D., Liu, Y., Zeng, G., Wang, R., Xu, P., Zhang, C., Cheng, M., Xue, W. & Chen, S. (2019). Roles of multiwall carbon nanotubes in phytoremediation: Cadmium uptake and oxidative burst in *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich. *Environmental Science: Nano*, 6(3), 851–62. doi: 10.1039/C8EN00723C
- Gulzar, A.B.M. & Mazumder, P.B. (2022). Helping plants to deal with heavy metal stress: the role of nanotechnology and plant growth promoting rhizobacteria in the process of phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29: 40319–40341. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19756-0>
- Kumar, N., Devi, R., Devi, S., Singh, S., Bisht, A.S., Kumar, J., Kumari, A., Neha, N., Chauhan, S., Sharma, A. & Kumar, R. (2026). A comprehensive review on recent advances in nanomaterial facilitated phytoremediation. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 32, 185–204. <https://doi.org/10.1007/s12298-025-01677-0>
- Mahmud, M.N., Al Kafi, A., Sharmin, S., Muniza, N.T., Tahara, T., Raidah, R., Batool, R. & Islam, M. (2026). Phytoremediation of contaminated soils: Current trends and future prospects. *Earth Critical Zone*. <https://doi.org/10.1016/j.ecz.2026.100072>.
- Matos, M.P.S.R., Correia, A.A.S. & Rasteiro, M.G. (2017). Application of carbon nanotubes to immobilize heavy metals in contaminated soils. *Journal of Nanoparticle Research*, 19(126): <https://doi.org/10.1007/s11051-017-3830-x>.
- Medina-Pérez, G., Fernández-Luqueño, F., Trejo-Téllez, L.I., López-Valdez, F. & Pampillón-González, L. (2018). Growth and development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) var. pinto Saltillo exposed to iron, titanium, and zinc oxide nanoparticles in an agricultural soil. *Applied Ecology & Environmental Research*, 16(2), 1883-1897. DOI: https://dx.doi.org/10.15666/aer/1602_18831897
- Pérez-Hernández, H., Pérez-Moreno, A.Y., Méndez-López, A. & Fernández-Luqueño, F.M. (2024). Effect of ZnO nanoparticles during the process of phytoremediation of soil contaminated with As and Pb cultivated with sunflower (*Helianthus annuus* L.). *International Journal of Environmental Research*, 18(7). <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00556-4>
- Ping, Y., Cao, D., Hu, J., Lin, Y., Dang, C. & Xue, D. (2024). The application, safety, and challenge of nanomaterials on plant growth and stress tolerance. *Industrial Crops and Products* 222(2), 119691. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119691>
- Sharma, S., Dadhwal, R. & Banerjee, R. (2026). Nanoparticle assisted phytoremediation: An eco-friendly approach for removal of heavy metals from the environment. *Journal of Environmental Sciences*, 159, 705–720. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2025.05.034>
- Singh, J. & Lee, B.K. (2016). Influence of nano-TiO₂ particles on the bioaccumulation of Cd in soybean



plants (*Glycine max*): A possible mechanism for the removal of Cd from the contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 170, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.015>

Tripathi, D.K., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K. & Dubey, N.K. (2015). Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.026>

Wang, X., Xie, H., Wang, P. & Yin, H. (2023). Nanoparticles in plants: Uptake, transport and physiological activity in leaf and root. *Materials*, 16(8), 3097. <https://doi.org/10.3390/ma16083097>

Zand, A.D. & Heir, A.V. (2020). Phytoremediation: Data on effects of titanium dioxide nanoparticles on phytoremediation of antimony polluted soil. *Data In Brief*, 31, 105959. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105959>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

