









Artículo de divulgación

## La minería y sus residuos: Uso de plantas y hongos filamentosos para mitigar elementos tóxicos como técnica de fitorremediación asistida

Mining and mine tailings: Use of plants and filamentous fungi for mitigating toxic elements as an assisted phytoremediation technique

Eduardo González-Valdez <sup>1,\*</sup>, Verónica Lizbeth González-Valdez <sup>2</sup>, Alejandro Alarcón <sup>4</sup>,  
Edith Lorena Arroyo-Ordaz <sup>1</sup>, Leslie Malleli Barriga-Téllez <sup>1</sup>, Diana Cecilia Maya Cortes <sup>1</sup>,  
Rosa María García-Martínez <sup>1</sup>, Ofelia Pérez Arvizu <sup>3</sup>

<sup>1</sup> UMSNH. Facultad de Químico Farmacobiología. Tzintzuntzan 173, Matamoros, 58240 Morelia, Michoacán, México.

<sup>2</sup> UNAM, Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8745, Sin Nombre, la Huerta, 58341. Morelia, Michoacán, México.

<sup>3</sup> UNAM, Campus Juriquilla, Boulevard Juriquilla 3001, 76230. Querétaro, México.

<sup>4</sup> Posgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo 56264. Estado de México, México.

<sup>5</sup> UMSNH. Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF). km 9.5 de la carretera Morelia-Zinapécuaro, Michoacán, México.

\* Autor para correspondencia: [lalogvaldez@gmail.com](mailto:lalogvaldez@gmail.com); [eduardo.gonzalez.valdez@umich.mx](mailto:eduardo.gonzalez.valdez@umich.mx)

**Recibido:**

7/05/2026

**Aceptado:**

26/05/2026

**Publicado:**

28/05/2026

**RESUMEN**

La minería es considerada como una actividad económica sumamente importante a nivel mundial, de la cual México es uno de los líderes mundiales dentro del sector minero. Sin embargo, esto ha conllevado a problemas graves en el ambiente, debido a la generación de residuos de mina, los cuales son usualmente depositados al aire libre, y que contienen Ni, Cd, Pb, As, Cr, etc. Estos elementos potencialmente tóxicos (EPT) provocan contaminación en agua y en suelo, además de que permanecen indefinidamente en el sitio. En las últimas décadas, se han desarrollado tecnologías biológicas con especies vegetales en combinación con hongos filamentosos, las cuales buscan mitigar la toxicidad y restaurar sitios contaminados con EPT, como es el caso de los residuos de mina. El presente trabajo integra el conocimiento sobre especies vegetales tolerantes al estrés en combinación con hongos filamentosos, para evaluar sus características y sus efectos con fines de uso en la rehabilitación y/o restauración de suelos contaminados con residuos mineros.

**Palabras clave:** residuos de mina; microorganismos; biolixiviación; contaminación del suelo; hongos filamentosos.

**ABSTRACT**

Mining is an important global economic activity, where Mexico is among the world's largest metal producers in the mining sector. However, this has led to serious environmental problems due to the generation of mine waste, which is usually deposited in open land areas and contains potentially toxic elements (PTEs) such as Ni, Cd, Pb, As, Cr, etc. These PTEs provoke the water and soil contamination, and remain indefinitely at the site. In recent decades, biological technologies have been developed using plant species in combination

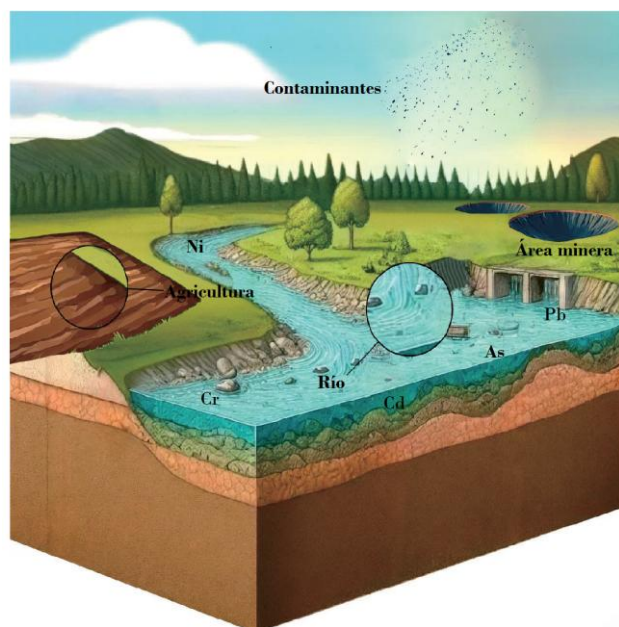


with filamentous fungi to mitigate and restore sites contaminated with PTEs, such as mine tailings. This work integrates the knowledge about plant species with filamentous fungi to evaluate their characteristics and effects for potential application in the rehabilitation and/or restoration of soils contaminated with toxic mining tailings.

Keywords: Mine tailings; microorganisms; bioleaching; soil contamination; filamentous fungi.

## INTRODUCCIÓN

México es considerado una potencia mundial en el sector minero. Durante la explotación económica de la actividad minera, se pueden recuperar metales preciosos como el oro (Au), y plata (Ag), etc., lo cual genera una abundante cantidad de residuos de mina, comúnmente conocidos como “jales de mina”. Estos residuos son usualmente depositados al aire libre, creando un problema global, al contener elementos potencialmente tóxicos (EPT) como mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo (Cr), o plomo (Pb), lo que puede provocar una contaminación permanente en agua o suelo (Figura 1).

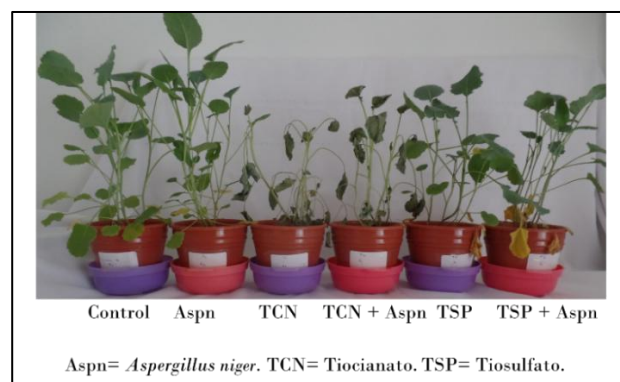


**Figura 1.** Representación de la actividad minera y acumulación de EPT (modificado de Zhang et al., 2025).

Lo anterior, es debido a que los EPT no son biodegradables y pueden permanecer indefinidamente en el sitio. No obstante, han surgido biotecnologías como la fitorremediación (empleo de plantas y sus microorganismos asociados para remediar un suelo

contaminado), la cual es considerada una tecnología amigable con el ambiente, ecológica, y sostenible a largo plazo cuyo fin es reducir la contaminación de EPT en sitios con residuos de mina.

Por otro lado, en la Figura 2 se observa que la inoculación de *Aspergillus niger* o la aplicación de agentes químicos sintéticos como tiocianato o tiosulfato de amonio (para solubilizar EPT), es una estrategia para facilitar los procesos de fitorremediación de residuos de mina con EPT, lo cual mejora la producción de biomasa seca, la biolixiviación de metales en la solución del suelo, facilitando la biodisponibilidad, la solubilidad y la eficiencia de la recuperación del metal por la planta (González-Valdez et al., 2018).



**Figura 2.** Inoculación de *Aspergillus niger* con *Brassica napus* en un residuo de mina de Zacatecas, México, después de 65 días de crecimiento en invernadero. Fuente: Elaboración propia de los autores.

## EL PROBLEMA CON LA MINERÍA

En México, la minería es una actividad que se realiza en los estados del norte del país, predominando un clima árido, y con menor proporción en la zona centro del país (Hernández-Acosta et al., 2009).

Los métodos tradicionales mineros se fundamentan en procesos de cianuración o lixiviación para la

solubilización de Au o Ag, y su recuperación a partir de los minerales; y consiste en utilizar soluciones acuosas como cianuro de sodio (NaCN) y formar complejos (Au-CN), lo cual favorece la solubilidad y biodisponibilidad de este metal. Sin embargo, la minería se ha caracterizado por ser uno de los mayores generadores de desechos que se depositan en áreas abiertas (Figura 3), que se caracterizan por tener pH extremos (ácidos o básicos), contienen concentraciones de EPT como Pb, Cd, etc., sus partículas son de granulometría muy fina (textura arenosa) y la ausencia de materia orgánica, lo que impiden la retención de agua. Estas características pueden tener un efecto directo en la pérdida de tierras de cultivo y bosques, y de manera indirecta representa un problema de contaminación en agua o suelo y en la salud humana (Wong, 2003).



**Figura 3.** Aspecto general de un residuo de mina acumulado y expuesto a la intemperie, en Zacatecas, México. Fuente: Elaboración propia de los autores.

En México se estima que la cantidad de residuos de mina producidos es  $\sim 100 \times 10^6$  t/año en promedio, los cuales pueden permanecer en el sitio por tiempo indefinido, debido a su estabilidad química, ya que los metales no se pueden descomponer en elementos más simples, solo cambian de un estado de oxidación a otro (González-Valdez et al., 2016). La estabilidad indefinida de los metales presentes en el suelo y la restauración del sitio por métodos físicos y químicos (lavado de suelos con ácidos fuertes, vertido de tierras, etc.), suelen ser métodos costosos, destructivos para el suelo y pueden generar más emisiones de partículas tóxicas en el ambiente (Santana-Flores et al., 2020) (Tabla 1).

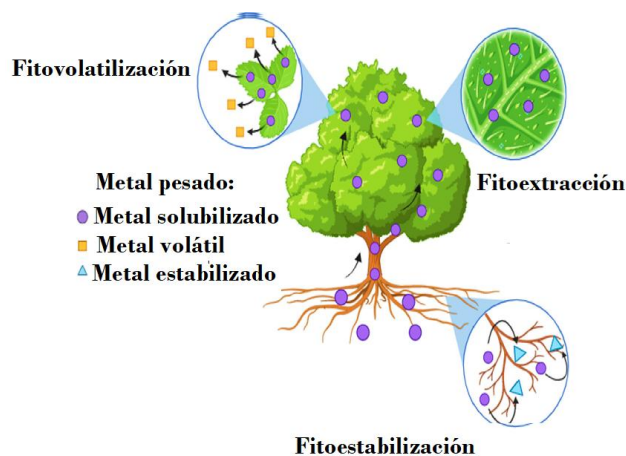
Así mismo, los residuos de mina generados durante la extracción de metales preciosos, continúa aumentando exponencialmente, sin recibir ningún tratamiento de remediación o de confinamiento para evitar mayor dispersión de los EPT en agua o suelo, lo que puede constituir una amenaza para los residentes locales al ingerir el agua, para la producción de cultivos o de ganado (Bruneel et al., 2019). Ante ello, la selección adecuada de especies vegetales puede ayudar en la remediación de los sitios contaminados con EPT.

**Tabla 1.** Cifras comparativas de costos de técnicas para la recuperación de suelos contaminados con EPT (Meier et al., 2012).

Tratamiento	Costo (dólares/t)	Desventaja
Vertido de tierras	100-500	Transporte/excavación/vigilancia
Tratamiento químico	100-500	Reciclado de contaminantes
Fitorremediación	5-40	Vigilancia
Biorremediación	15-200	Vigilancia

## PLANTAS FITORREMEIADORAS USADAS EN LA MINERÍA PARA EPT

Las plantas se han utilizado para absorber contaminantes orgánicos e inorgánicos; por ejemplo, los EPT, son absorbidos por la raíz, transportados y acumulados en sus órganos vegetales aéreos con la finalidad de limpiar o detoxificar un suelo contaminado (fitorremediación). Algunas especies vegetales (*Brassica napus* L., *B. rapa* L., y *Helianthus annuus* L.) se han seleccionado por su tolerancia al estrés por múltiples EPT y por su potencial para crecer en residuos de mina. La fitorremediación es considerada una biotecnología amigable con el ambiente, ecológica, y sostenible a largo plazo para remediar desechos de mina que contienen EPT. Las plantas utilizan diferentes mecanismos para la remediación de contaminantes inorgánicos (Figura 4), como la fitoextracción (absorción del metal en los órganos aéreos), fitoestabilización (inmovilización del metal en la raíz), o fitovolatilización (volatilización del metal a la atmósfera en una forma menos tóxica).



**Figura 4.** Representación de los mecanismos que utilizan las plantas en la fitorremediación de metales (modificado de Montreemuk et al., 2024).

Así, la fitorremediación tiene la ventaja sobre los tratamientos físicos y químicos al preservar las propiedades del suelo (fertilidad) y las interacciones planta-microorganismo en la rizosfera (interacción de la raíz de la planta y suelo). Los microorganismos como los hongos son actores fundamentales en la rizosfera del suelo durante los procesos de fitorremediación ya que pueden actuar promoviendo una mayor biomasa vegetal, inmovilizando o solubilizando el metal en el suelo, lo cual puede ser aprovechado por la raíz de la planta para estabilizar el metal o ser translocado hacia los órganos vegetales aéreos, cuyo efecto combinado es conocido como fitorremediación asistida, la cual podría ser más eficiente durante la remediación biológica a partir de suelos contaminados con EPT (Bruneel et al., 2019).

La selección adecuada de las especies vegetales es determinante para crecer en un sustrato contaminado con metales, lo cual resulta fundamental para la remediación ambiental (Afonso et al., 2020). En este sentido, Acosta et al. (2018) realizaron un experimento con desechos de mina, y analizaron la concentración de Pb y Cd en raíces, tallo y hojas en *Atriplex halimus* (arbusto forrajero); sus resultados indican que la aplicación de  $\text{CaCO}_3$  como enmienda, incrementó la acumulación de Pb en hojas 2.5 veces más y 55 % más en Cd, en comparación con el control; lo anterior, es indicativo que el *A. halimus* predominó el mecanismo de fitoextracción. Por otra parte, Afonso et al. (2020) evaluaron el potencial de fitorremediación de plantas

autóctonas para crecer en un residuo de mina con Cu, y encontraron que *Solanum viarum* Dunal y *Baccharis trimera* Less presentaron tolerancia a elevadas concentraciones de Cr ( $586 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Cu ( $440 \text{ mg kg}^{-1}$ ), respectivamente; cuyos autores concluyen que dichas especies han desarrollado mecanismos de tolerancia a Cu, Pb y Cr en su biomasa, lo cual es fundamental para recuperar zonas contaminadas con EPT.

## LOS HONGOS EN LA FITORREMEDIACIÓN DE RESIDUOS DE MINA

Los hongos filamentosos como *Trichoderma atroviride*, *T. harzianum*, y *Aspergillus niger*, pueden ser considerados especies potenciales en la eliminación, inmovilización o transformación de iones metálicos como Cd, Cu y Pb, etc., a partir de suelos contaminados (biorremediación) (Martins et al., 2016). Particularmente, *A. niger* es uno de los hongos más utilizados en procesos de lixiviación de metales en suelos contaminados o en residuos de mina (Zeng et al., 2015; González-Valdez et al., 2018).

En este sentido, se ha buscado hacer los procesos de remediación más eficientes, y esto ha generado la fitorremediación asistida con hongos para extraer metales a partir de residuos de mina, lo que podría ser una biotecnología prometedora y más amigable con el ambiente. Los hongos filamentosos, se han caracterizado por promover el crecimiento vegetal, por su tolerancia al crecer en pH extremos (ácidos o básicos), y de desarrollarse en sustratos con elevadas concentraciones de EPT en residuos de mina, esta propiedad les ha permitido ser utilizados en procesos de biolixiviación de metales, donde ocurre una interacción entre el hongo y el metal, para su posterior recuperación (Aung y Ting, 2005; Amiri et al., 2011; Argumedo-Delira et al., 2022). La disolución del metal por el hongo se logra a través de los mecanismos como: 1) Acidólisis (solubilización de la matriz); 2) Complejación (formación de complejos metálicos por los aminoácidos o ácidos orgánicos secretados); 3) Redoxolisis (reducción del hierro férrico mediada por el ácido oxálico); y 4) Bioacumulación de metales por el micelio del organismo (Le et al., 2006).

Esta capacidad de disolución de los minerales se ha logrado por la producción de metabolitos (por ejemplo, ácido oxálico, ácido cítrico, y ácido málico) que pueden favorecer la formación de complejos con los metales y hacerlos menos tóxicos, o provocar la disolución del

metal para posteriormente ser absorbido por la raíz (Zeng et al., 2015). Lynch y Moffat (2005) describen que la asociación *Pteris vittata* + *Trichoderma harzianum* T22 puede ser viable para eliminar cianuro de potasio (KCN) y promover el crecimiento radical de una especie vegetal. Esto denota el potencial de la interacción planta-hongo, para promover la remediación de sitios contaminados. Asimismo, Babu et al. (2014) aislaron *Penicillium aculeatum* PDR-4 y *Trichoderma* sp. PDR-16 a partir de la rizosfera de *Pinus koraiensis* establecida en un residuo de mina; posteriormente, los inocularon en un híbrido de (*Sorghum bicolor* Moench × *Sorghum sudanense*), obteniendo mayor producción de biomasa seca aérea (37-95%) con respecto al control. Por otro lado, Palanivel et al. (2023) evaluaron la eficiencia de recuperación de Cu, por los hongos *A. hiratsukae* LF1 y *A. terreus* LF2, previamente aislados de un residuo de mina; ambas especies fúngicas toleraron y acumularon Cu en sus tejidos (4.63 y 5.95 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente). Estos estudios, indican que el uso de hongos filamentosos podría aumentar la biomasa vegetal, e incrementar la solubilización y acumulación de metales y EPTs durante el proceso de fitoremediación.

## CONCLUSIÓN

La selección adecuada de especies vegetales tolerantes al estrés por múltiples EPT, es fundamental para la fitorremediación de un residuo de mina. El efecto combinado de la fitorremediación con la inoculación de los hongos filamentosos podría favorecer la producción de biomasa vegetal e inducir la biolixiviación y la biodisponibilidad del metal, para hacer más eficiente la estabilización o acumulación del metal en la planta durante la recuperación/restauración del sitio contaminado. Todo ello vislumbra a la interacción planta-hongo filamentosos como una opción biotecnológica viable para su implementación en la fitorremediación de metales.

## Literatura citada

- Acosta, J.A., Abbaspour, A., Martínez, G.R., Martínez-Martínez, S., Zornoza, R., Gabarrón, M. & Faz, A. (2018). Phytoremediation of mine tailings with *Atriplex halimus* and organic/inorganic amendments: A five-year field case study. *Chemosphere*, 204, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.027>
- Afonso, T.F., Demarco, C.F., Pieniz, S., Quadro, M.S., Camargo, F.A.O. & Andreazza, R. (2020). Bioprospection of indigenous flora grown in copper mining tailing area for phytoremediation of metals. *Journal of Environmental Management*, 256, 109953. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109953>
- Amiri, F., Mousavi, S.M. & Yaghmaei, S. (2011). Enhancement of bioleaching of a spent Ni/Mo hydroprocessing catalyst by *Penicillium simplicissimum*. *Separation and Purification Technology*, 80, 566-576. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.06.012>
- Argumedo-Delira, R., Gómez-Martínez, M.J., & Mora-Delgado, J. (2022). Plant growth promoting filamentous fungi and their application in the fertilization of pastures for animal consumption. *Agronomy*, 12(12), 3033. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123033>
- Aung, K.M.M. & Ting, Y.P. (2005). Bioleaching of spent fluid catalytic cracking catalysts using *Aspergillus niger*. *Journal of Biotechnology*, 116, 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.10.008>
- Babu, A.G., Shim, J., Bang, K.S., Shea, P.J. & Oh, B.T. (2014). *Trichoderma virens* PDR-28: A heavy metal-tolerant and plant growth-promoting fungus for remediation and bioenergy crop production on mine tailing soil. *Journal of Environmental Management*, 132, 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.10.009>
- Bruneel, O., Mghazli, N., Sbabou, L., Héry, M., Casiot, C. & Filali-Maltouf, A. (2019). Role of microorganisms in rehabilitation of mining sites, focus on Sub Saharan African countries. *Journal of Geochemical Exploration*, 205, 106327. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.06.009>
- González-Valdez, E., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., Vega-Carrillo, H.R., Maldonado-Vega, M. & Salas-Luévano, M.A. (2016). Seed germination and seedling growth of five plant species for assessing potential strategies to stabilizing or recovering metals from mine tailings. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(24), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2724-8>
- González-Valdez, E., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., Vega-Carrillo, H.R., Maldonado-Vega, M., Salas-Luévano, M.A. & Argumedo-Delira, R. (2018). Induced accumulation of Au, Ag and Cu in *Brassica napus* grown in a mine tailings with the inoculation of *Aspergillus niger* and the application of two chemical compounds. *Ecotoxicology and*



- Environmental Safety*, 154, 180–186.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.055>
- Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J.E. & Robledo-Santoyo, E. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(2), 109-114. Recuperado en 19 de marzo de 2026, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_artt\\_ext&pid=S2007-40182009000200004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_artt_ext&pid=S2007-40182009000200004&lng=es&tlng=es)
- Le, L., Tang, J., Ryan, D. & Valix, M. (2006). Bioleaching nickel laterite ores using multi-metal tolerant *Aspergillus foetidus* organism. *Minerals Engineering*, 19(12), 1259–1265.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.02.006>
- Lynch, J.M. & Moffat, A.J. (2005) Bioremediation – prospects for the future application of innovative applied biological research. *Annals of Applied Biology*, 146, 217–221. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.040115.x>
- Martins, L.R., Lyra, F.H., Rugani, M.M.H. & Takahashi, J.A. (2016). Bioremediation of metallic ions by eight *Penicillium* species. *Journal of Environmental Engineering*, 142, C4015007.  
<https://hero.epa.gov/reference/4685485/>
- Montreemuk, J., Stewart, T.N. & Prapagdee, B. (2024). Bacterial-assisted phytoremediation of heavy metals: Concepts, current knowledge, and future directions. *Environmental Technology & Innovation*, 33, 103488. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103488>
- Meier, S., Borie, F., Bolan, N. & Cornejo, P. (2012). Phytoremediation of metal-polluted soils by arbuscular mycorrhizal fungi. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(7), 741-775. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.528518>
- Palanivel, T.M., Pracejus, B. & Novo, L.A.B. (2023). Bioremediation of copper using indigenous fungi *Aspergillus* species isolated from an abandoned copper mine soil. *Chemosphere*, 314, 137688.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137688>
- Santana-Flores, A., Sánchez-Ayala, A., Romero-Ramírez, Y., Toledo-Hernández, E., Ortega-Acosta, S.A. & Toribio-Jiménez, J. (2020). Aislamiento e identificación de bacterias tolerantes y bioacumuladoras de metales pesados, obtenidas de los jales mineros El Fraile, México. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 67-75.  
<https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.430>
- Wong, M.H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50, 775–780.  
[https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00232-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00232-1)
- Zeng, X., Wei, S., Sun, L., Jacques, D.A., Tang, J., Lian, M., Ji, Z., Wang, J., Zhu, J. & Xu, Z. (2015). Bioleaching of heavy metals from contaminated sediments by the *Aspergillus niger* strain SY1. *Journal of Soils and Sediments*, 15, 1029–1038.  
<https://doi.org/10.1007/s11368-015-1076-8>
- Zhang, X.T., Hu, J.J., Shen, B., Huang, M.D., Lan, S.H. & Xin, X.H. (2025). Multi-compartmental migration and ecological-health risks of trace metals in Dexing mining concentration areas: A holistic quantitative assessment. *China Geology*, 8(3), 500-513.  
<https://doi.org/10.31035/cg20250074>

**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.

