

Biorremediación de metales pesados en México: técnicas y tendencias de uso para aplicación en actividades mineras

Bioremediation of heavy metals in Mexico: techniques and trends of use for application in mining activities

Karen Alejandra Cavada-Prado

Carla Sofia González-Sánchez

Eduardo Alanís-Rodríguez

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional #85, Km. 145,
Linares, Nuevo León, C.P. 67700 México.

Alejandro Luis Collantes Chávez-Costa*

Universidad de Quintana Roo, Avenida Andrés Quintana Roo s/n frente a Colonia San Gervasio, Cozumel,
Quintana Roo. C.P. 77600 México.

*Autor para correspondencia: collants@uqroo.edu.mx

Resumen

La biorremediación aplicada como técnica de recuperación de suelos contaminados por metales pesados es una herramienta con potencial en desarrollo para recobrar los suelos dañados. El objetivo de esta investigación fue compilar información relacionada a los métodos de biorremediación de metales pesados en suelos en México, que posteriormente puedan ser aplicados a suelos degradados y contaminados por actividades mineras. Para esto se realizó una búsqueda documental de artículos científicos mexicanos publicados entre los años 2000 a 2020 en distintas bases de datos, mediante el uso de palabras claves en español e inglés. Se registró un total de 52 artículos de tipo experimental realizados en 15 de las entidades federativas, entre los cuales, las técnicas de biorremediación que involucran el uso individual o en conjunto de plantas, bacterias y hongos fueron las más estudiadas. Dentro de estas, el uso de plantas, también llamado fitorremediación, fue el método de mayor interés entre los autores.

Palabras clave: Contaminación, fitorremediación, microorganismos, residuos mineros.

Abstract

Bioremediation applied as a recover technique for soils contaminated by heavy metals is a tool with potential under development to recuperate soils damaged by mining activities in Mexico. The aim of this study was to compile information related to the different methods of bioremediation of heavy metals in soils in Mexico, which can later be applied to degraded soils contaminated by mining activities. To achieve this, a documental search was carried out for mexican scientific papers published between 2000 and 2020 in several databases, using keywords in Spanish and English. A total of 52 experimental papers were registered in 15 of the states, among which bioremediation techniques that involve the individual or conjugated use of plants, bacteria and fungi were the most studied. Within these, the use of plants, also called phytoremediation, was the method of interest among authors.

Keywords: Contamination, microorganisms, mining waste, phytoremediation.

Introducción

Los metales pesados (MP) son elementos químicos que se encuentran naturalmente en el ambiente y no pueden ser degradados ni destruidos, sin embargo, pueden ser disueltos, transportados y distribuidos hasta incorporarse en la cadena trófica (Covarrubias *et al.*, 2015). Los seres vivos necesitan de algunos de estos elementos para poder desarrollar algunas funciones biológicas, no obstante, cuando exceden las concentraciones que requieren, les producen enfermedades tales como desórdenes neurológicos, afectaciones a los pulmones, riñones, huesos y sistema reproductivo, entre otras (Carranza-Álvarez *et al.*, 2016). Algunas fuentes antropogénicas de contaminación son la minería, fundición, agricultura y la refinación de combustibles, siendo la primera de estas la principal contaminante en México. Se han encontrado metales pesados en suelos, subsuelos, acuíferos, vegetación tal como plantas medicinales o en cosechas de maíz, aire en zonas urbanas y en los tejidos de peces y moluscos (Covarrubias & Peña-Cabriales, 2017). Existen diversas tecnologías y métodos para remover estos contaminantes de un determinado ambiente, pero suelen ser poco eficientes y muy costosas, tomando en cuenta que los países con menores recursos económicos son los que mayor contaminación presentan (Monachese *et al.* 2012). Por esto es que, en los últimos años, se ha centrado la atención en el uso de microorganismos que sean capaces de tolerar, acumular, metabolizar y remover estos contaminantes, a esto se le conoce como biorremediación y se distingue por ser más económica y amigable con el ambiente a comparación de la mayoría de las técnicas de remoción físico y químicas (González-Chávez, 2005). Un alto número de microorganismos y plantas han sido estudiados *in vitro* e *in situ* con el fin de determinar su potencial de acumulación o remoción de metales pesados, entre ellos plantas, bacterias u hongos o la mezcla de estos, mostrando efectividad en distintos grados (Covarrubias *et al.*, 2015). Debido a las prácticas ineficientes en actividades mineras, especialmente en relación con el manejo de sus residuos (jales mineros), es nece-

sario buscar técnicas eficaces y económicas que puedan ser aplicadas para la descontaminación de suelos con altas concentraciones de metales pesados, con el fin de evitar su dispersión y daños a la salud de la población y medio ambiente (Covarrubias *et al.*, 2017). El objetivo de esta revisión es compilar y describir la información generada en México respecto al estudio de los distintos métodos de biorremediación de metales pesados en suelos. Los datos recabados se clasificaron, ordenaron y graficaron para facilitar su comparación y consulta.

Materiales y Métodos

Se realizó una búsqueda de artículos científicos realizados en México, en las bases de datos Google Scholar, Elsevier, Researchgate, Pubmed y Scielo, publicados entre los años 2000 a 2020, mediante el uso de palabras claves en español e inglés como: biorremediación, metales pesados, México, fitorremediación, contaminación, hongos, bacterias, minería y jales mineros. Se consideraron todas las investigaciones que tuvieran como objetivo generar información cuantitativa o cualitativa acerca de las especies y/o métodos con potencial biorremediador de metales pesados en suelos contaminados. Los resultados se tabularon en una base de datos en Microsoft Excel para su posterior análisis tomando en cuenta los siguientes criterios: autor(es), año, localidad, municipio y estado, tipo de estudio (experimental o descriptivo), objetivo del estudio, variables del estudio, metodología experimental, diseño del muestreo, contaminante(s), tipo de organismo biorremediador, nombre científico de la especie y principales resultados y conclusiones. Con el fin de facilitar la búsqueda para futuros lectores, la tabla generada se resumió con la información que se consideró más relevante, y posteriormente se graficaron los datos, siendo estos los criterios finales: Estado donde fue generado, año de publicación, contaminante(s) y tipo de organismo biorremediador.

Resultados y Discusión

Número de artículos por organismo

De la investigación llevada a cabo, se registraron 52 artículos de tipo experimental, realizados en distintos estados de México, los cuales abarcaron técnicas *in situ* y *ex situ*, y condiciones variables para encontrar organismos con potencial para ser aplicados en proyectos de biorremediación de ciertos metales pesados en específico, o de una mezcla de ellos. Se encontró que 40 de los 52 artículos abarcaron el estudio de diversas especies de plantas que contuvieran algún potencial fitorremediador (Figura 1). La popularidad de la fitorremediación por encima del estudio de hongos o bacterias para usarlos de forma individual en técnicas de biorremediación, de los cuales se encontraron 4 y 2 respectivamente, puede deberse a los beneficios ecológicos que conceden las plantas además de la estabilización o descontaminación, ya que al colonizar los suelos proveen cobertura, por lo que promueven la formación del suelo y a su vez, la disminución de la erosión hídrica y eólica, evitando la propagación de los contaminantes (Duarte-Zaragoza *et al.*, 2020; González-Chávez, 2005). Además, la fitorremediación acelera el proceso de revegetación, ayuda a aumentar la biodiversidad, estabiliza el ciclo de los nutrientes, tiene gran aceptación por parte de la población, y dependiendo de la especie, se pueden obtener productos o servicios ecosistémicos al mismo tiempo que se lleva a cabo el proceso de fitorremediación, tal es el caso de *Ricinus communis*, especie exótica que tiene la capacidad de crecer en suelos con altas concentraciones de metales pesados, además de ser usada con múltiples propósitos (Cortés-Jiménez *et al.*, 2013), siendo uno de ellos la obtención de biocombustible al ser cosechada de suelos contaminados, propiedad estudiada por Ruiz-Olivares *et al.*, (2013).

La fitorremediación se puede combinar con el uso de microorganismos que otorguen algunos beneficios a las plantas en presencia de MP. Tal es el caso de las bacterias (bacterias promotoras del crecimiento o PGPB por sus siglas en inglés), estas tienen la capacidad de concederles ciertas ventajas a las plantas hospederas, tales como el aumento del crecimiento, protección contra agentes patógenos, disminución de los efectos de los MP sobre su mor-

fología, movilización de nutrientes y fertilización del suelo a través de la fijación del nitrógeno (Covarrubias *et al.*, 2017; González-Chávez, 2005; Navarro-Noya *et al.*, 2012). Al igual que las bacterias, los hongos presentes en plantas (generalmente hongos endófitos o micorrizas arbusculares) permiten que las plantas hospederas adquieran nutrimentos aun en condiciones de estrés y las protegen contra algunos agentes patógenos entre otras ventajas. A pesar de los beneficios que ambos microorganismos ofrecen, en la presente investigación únicamente se registraron tres artículos que abarcan relaciones planta-bacteria, mientras que las relaciones planta-hongo abarcan el doble (Figura 1). Esta mayoría puede deberse a que el grupo de trabajo conformado por Carrillo-González y González-Chávez (Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados) y colaboradores estuvieron presentes en gran parte de los artículos encontrados, los cuales estaban enfocados en su mayoría en el estudio de hongos micorrizas arbusculares y sus plantas hospederas.

En tres de los artículos se incluyó el estudio de varios organismos al mismo tiempo a través de distintos enfoques de biorremediación, tal es el caso de Ortega-Larrocea *et al.*, (2009), en el cual se estudiaron plantas, planta-hongo y hongos aislados de sustratos obtenidos de una mina con el fin de encontrar organismos tolerantes a MP. El estudio de Navarro-Noya *et al.*, (2012) abarca bacterias y relación planta-bacteria con el fin de encontrar bacterias fijadoras de nitrógeno que mejoren la fertilidad en suelos contaminados, mientras que González-Chávez *et al.*, (2008) estudiaron plantas y planta-hongo presentes en suelos contaminados para conocer la biodiversidad vegetal presente, así como el comportamiento de los hongos presentes en las plantas.

Número de artículos por Estado

De las 32 entidades federativas que hay en México, se registraron investigaciones en 15, lo que corresponde al 47% (Figura 2). A pesar de que Sonora y Coahuila son dos de los estados que mayor aportación tienen en la producción bruta total no petrolera a nivel nacional (INEGI, 2009), no se encontraron artículos de estos.

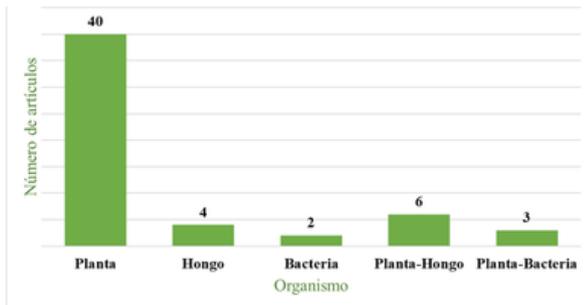


Figura 1. Número de artículos por organismo.

No es el caso de Hidalgo, estado en el cual se encontró la mayor cantidad de artículos, con un total de 14. Esto puede deberse a que el estado de Hidalgo ha sido uno de los principales productores de Au, Ag, Zn y Cu, además de contar con minas históricas o activas de Hg y Pb (Carmona-Chit *et al.*, 2016), y uno de los mayores depósitos de Mn presentes en Norteamérica (Juárez-Santillán *et al.*, 2010). Esto ha generado la acumulación de residuos en depósitos que muchas veces no cuentan con ningún tipo de restauración o rehabilitación, ejemplo de esto es el municipio de Zimapán, en el cual se encuentran, entre otros, los depósitos de San Francisco y Santa María, que representan un riesgo para la salud humana debido a la proximidad de los asentamientos humanos a estos jales mineros (González-Chávez *et al.*, 2015). Los jales mineros cerca de San Luis Potosí, el cual se repitió en siete artículos, han ocasionado a lo largo de los años una gran cantidad de derrames dando como resultado grandes cantidades de metales pesados en suelos (Franco-Hernández *et al.*, 2010), las concentraciones de Zn en sus suelos son mayores a $4000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, el Cu se encuentra por arriba de los $1500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, el As es mayor a $20,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y el Pb excede los $1500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, sobrepasando los dos últimos en creces los Límites Máximos Permisibles de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007; Franco-Hernández *et al.*, 2010). La proximidad de los residuos mineros con las poblaciones es un problema igualmente palpable en el estado de Guerrero, el cual ocupó el tercer lugar con cinco apariciones, donde los jales mineros en algunos casos se encuentran únicamente a 30 m de distancia de la población más cercana (Cortés-Jiménez *et al.*, 2013).

Le siguen los estados de Zacatecas y Estado de México con cuatro y tres apariciones respectivamente. En Durango, Nuevo León, Guanajuato, Chihuahua y Morelos se encontraron dos artículos por cada uno, mientras que en Veracruz, Tabasco, Querétaro, Michoacán y Aguascalientes, se registraron un artículo por estado. En tres de los artículos no se especificó el Estado donde fueron tomadas las muestras o llevado a cabo el experimento.

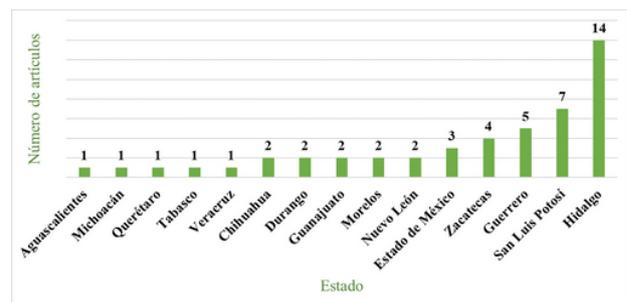


Figura 2. Número de artículos por estado.

Número de artículos por metal pesado

Dentro de la tabla periódica existen 59 elementos metálicos que pueden ser considerados “metales pesados”; los estudios analizados se enfocan en la remoción de un metal pesado en específico, o de una mezcla de ellos. El metal pesado más estudiado para su extracción o estabilización mediante técnicas de biorremediación fue el Pb con 34 apariciones seguido del Cd, Cu, Zn y As, con 28, 26, 21 y 17 apariciones, respectivamente (Figura 3). Esto concuerda con la producción minera nacional, donde México ocupa 6° lugar a nivel mundial en producción de Pb y Zn y el octavo en Cu (Armienta *et al.*, 2019). Además, los elementos potencialmente tóxicos comúnmente presentes en los jales de las minas mexicanas son el Pb, Cd, Zn, As, Se y Hg (INECC, 2007), coincidiendo con la presente investigación donde una gran parte de los estudios encontrados se realizaron a partir de sustratos presentes en jales mineros.

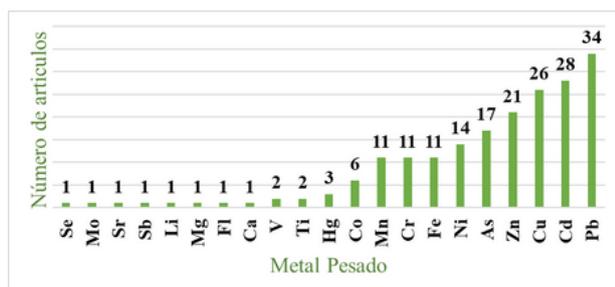


Figura 3. Número de artículos por metal pesado.

Número de artículos por periodo

En la tendencia del número de investigaciones, plasmada en una línea del tiempo, se aprecia que conforme pasan los años aumenta el número de investigaciones (Figura 4). La creación de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y la necesidad de su implementación por parte de las empresas, puede ser la razón del incremento de artículos entre el primer periodo con solo seis artículos, al segundo periodo con 14 artículos. En el siguiente periodo aumenta a 15, y finalmente se observa un pequeño incremento en el último a 17 artículos, probablemente por el gran derrame ocurrido en el Estado de Sonora en el año 2014, el cual pudo haber atraído la atención de la comunidad científica con el fin de encontrar métodos de descontaminación en suelos con metales pesados, entre ellos, la biorremediación.

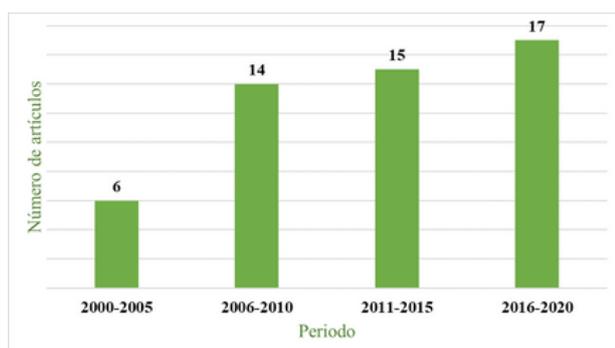


Figura 4. Número de artículos por periodo.

Conclusiones

A través de esta investigación se puede apreciar como la fitorremediación fue la técnica más estudiada debido a las ventajas que puede ofrecer a nivel ecosistema por encima de la biorremediación asistida con hongos o bacterias.

Así mismo, la literatura reporta que la interacción de las plantas con hongos o bacterias puede incrementar la tolerancia y resistencia de estas a los metales pesados. Los Estados de Hidalgo, San Luís Potosí y Guerrero tiene el mayor número de artículos probablemente debido a los grupos de trabajo que estudian esta temática, además de los derrames provocados por parte de actividades mineras y la escasa distancia que se reporta entre estas actividades y los asentamientos poblacionales. La instauración de la normatividad ambiental y los derrames en estados mineros pueden haber influido en la cantidad de artículos que se publicaron entre el 2000 y 2020, coincidiendo en los incrementos entre periodos. El Pb, Cd, Cu y Zn fueron los metales pesados más estudiados, debido a que gran parte de los artículos utilizaron sustratos obtenidos de jales mineros, en los cuales predominan estos metales. Esta información puede resultar útil si se requiere conocer cuál es el estado actual del conocimiento acerca de estas técnicas, y continuar estudiando aquellas líneas de investigación a donde se inclina la tendencia, o por el contrario, encontrar las áreas de oportunidad en los aspectos menos explorados.

Literatura citada

- Acosta-Rodríguez, I., Cárdenas-González, J. F., Rodríguez-Pérez, A. S., Oviedo, J. T., & Martínez-Juárez, V. M. (2018). Bioremoval of Different Heavy Metals by the Resistant Fungal Strain *Aspergillus niger*. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2018, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/3457196>
- Alcantara-Martinez, N., Guizar, S., Rivera-Cabrera, F., Anicacio-Acevedo, B. E., Buendia-Gonzalez, L., & Volke-Sepulveda, T. (2015). Tolerance, arsenic uptake, and oxidative stress in *Acacia farnesiana* under arsenate-stress. *International Journal of Phytoremediation*, 18(7), 671-678. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1118432>
- Amezcua-Allieri, M. A., Lead, J. R., & Rodríguez-Vázquez, R. (2005). Impact of microbial activity on copper, lead and nickel mobilization during the bioremediation of soil PAHs. *Chemosphere*, 61(4), 484-491. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.03.002>
- Angeles, M. C., Chávez, G., Scheherazada, A., López, S., & González, R. C. (2015). Arsenic Concentration in Wild Plants Growing on Two Mine Tailings. *Pharmacognosy Communications*, 5(3), 197-206. <https://doi.org/10.5530/pc.2015.3.5>
- Armienta, M. A., Beltrán, M., Martínez, S., & Labastida, I. (2019). Heavy metal assimilation in maize (*Zea mays* L.) plants growing near mine tailings. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(8), 2361-2375. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00424-1>
- Armienta, M. A., Ongley, L. K., Rodríguez, R., Cruz, O., Mango, H., & Villaseñor, G. (2008). Arsenic distribution in mesquite (*Prosopis laevigata*) and huizache (*Acacia farnesiana*) in the Zimapán mining area, México. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 8(2), 191-197. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/07-144>
- Buendía-González, L., Cruz-Sosa, F., Rodríguez-Huezo, M. E., Barrera-Díaz, C. E., Hernández-Jaimes, C., & Orozco-Villafuerte, J. (2019). In vitro SIMULTANEOUS ACCUMULATION OF MULTIPLE HEAVY METALS BY *Prosopis laevigata* SEEDLINGS CULTURES. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(3), 1167-1177. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n3/buendia>
- Buendía-González, L., Orozco-Villafuerte, J., Cruz-Sosa, F., Barrera-Díaz, C. E., & Vernon-Carter, E. J. (2010). *Prosopis laevigata* a potential chromium (VI) and cadmium (II) hyperaccumulator desert plant. *Bioresource Technology*, 101(15), 5862-5867. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.027>
- Buendía-González, L., Orozco-Villafuerte, J., Estrada-Zúñiga, M. E., Barrera Díaz, C. E., Vernon-Carter, E. J., & Cruz-Sosa, F. (2010). In vitro lead and nickel accumulation in mesquite (*Prosopis laevigata*) seedlings. *Revista mexicana de ingeniería química*, 9(1), 01-09. [publicación en línea]. Disponible en internet en <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382010000100001&lng=es&tlng=en> [Consultado 09 Febrero 2021].
- Carmona-Chit, E., Carrillo-González, R., González-Chávez, M. C. A., Vibrans, H., Yáñez-Espinosa, L., & Delgado-Alvarado, A. (2016). Riparian plants on mine runoff in Zimapán, Hidalgo, Mexico: Useful for phytoremediation? *International Journal of Phytoremediation*, 18(9), 861-868. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1156639>
- Carranza Álvarez, C., Alonso Castro, Á. J., Maldonado Miranda, J., & Hernández Morales, A. (2016). Quantitation of Cd, Pb and Fe in three medicinal plants (*Justicia spicigera*, *Arnica montana* and *Hamelia pantens*) from environmentally diverse locations of Huasteca Potosina, Mexico. *Acta Universitaria*, 26(5), 24-30. <https://doi.org/10.15174/au.2016.984>
- Contreras Pinto, L. A., Valencia Castro, C. M., De la Fuente-Salcido, N. M., Linaje Treviño, M. S., & Trejo Calzada, R. (2016). Estudio de

- absorción, acumulación y potencial para la remediación de suelo contaminado por plomo usando *Ambrosia ambrosioides*. Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos, 1(1), 244-250. [publicación en línea]. Disponible en internet en <https://www.researchgate.net/publication/309009676_ESTUDIO_DE_ABSORCION_ACUMULACION_Y_POTENCIAL_PARA_LA_REMEDIACION_DE_SUELO_CONTAMINADO_POR_PLOMO_USANDO_AMBROSIA_AMBROSIOIDES> [Consultado 07 Febrero 2021].
- Cortés-Jiménez, E. V., Mugica-Álvarez, V., González-Chávez, M. C. A., Carrillo-González, R., Gordillo, M. M., & Mier, M. V. (2013). NATURAL REVEGETATION OF ALKALINE TAILING HEAPS AT TAXCO, GUERRERO, MEXICO. International Journal of Phytoremediation, 15(2), 127-141. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.683208>
- Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. (2017). CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR METALES PESADOS EN MÉXICO: PROBLEMÁTICA Y ESTRATEGIAS DE FITORREMEDIACIÓN. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 33(esp01), 7-21. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.esp01.01>
- Covarrubias, S. A., García Berumen, J. A., & Peña Cabriales, J. J. (2015). Microorganisms role in the bioremediation of contaminated soils with heavy metals. Acta Universitaria, 25(NE-3), 40-45. <https://doi.org/10.15174/au.2015.907>
- Duarte-Zaragoza, V. M., Pérez-Hernández, V. S., Hernández-Acosta, E., & Villanueva-Morales, A., (2020). Estudio exploratorio de la acumulación de plomo y cobre en *Prosopis laevigata* en depósitos mineros. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 7(2),1-7. [publicación en línea]. Disponible en internet en <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3586/358664458010>> [Consultado 07 Febrero 2021].
- Flores-Tavizón, E., Alarcón-Herrera, M. T., González-Elizondo, S., & Olguín, E. J. (2003). Arsenic Tolerating Plants from Mine Sites and Hot Springs in the Semi-Arid Region of Chihuahua, Mexico. Acta Biotechnologica, 23(23), 113-119. <https://doi.org/10.1002/abio.200390016>
- Franco-Hernández, M. O., Vásquez-Murrieta, M. S., Patiño-Siciliano, A., & Dendooven, L. (2010). Heavy metals concentration in plants growing on mine tailings in Central Mexico. Bioresource Technology, 101(11), 3864-3869. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.013>
- Gardea-Torresdey, J. L., Peralta-Videa, J. R., Montes, M., de la Rosa, G., & Corral-Diaz, B. (2004). Bioaccumulation of cadmium, chromium and copper by *Convolvulus arvensis* L.: impact on plant growth and uptake of nutritional elements. Bioresource Technology, 92(3), 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.002>
- Gómez-Bernal, J. M., Ruiz-Huerta, E. A., Armenta-Hernández, M. A., & Luna-Pabello, V. M. (2017). Evaluation of the removal of heavy metals in a natural wetland impacted by mining activities in Mexico. Environmental Earth Sciences, 76(23), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7144-1>
- González, R. C., & González-Chávez, M. C. A. (2006). Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. Environmental Pollution, 144(1), 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.006>
- González-Chávez Ma. C. A., (2005). Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizósfericos. Terra Lationamericana, 23(1), 29-37. [publicación en línea]. Disponible desde internet en <<https://www.redalyc.org/pdf/573/57323104.pdf>> [Consultado 07 Febrero 2021].
- González-Chávez, M. C. A., & Carrillo-González, R. (2013). Tolerance of *Chrysanthemum maximum* to heavy metals: The potential for its use in the revegetation of tailings heaps. Journal of Environmental Sciences, 25(2), 367-375. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(12\)60060-6](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(12)60060-6)

- González-Chávez, M. C. A., Carrillo-González, R., Hernández Godínez, M. I., & Evangelista Lozano, S. (2016). *Jatropha curcas* and assisted phytoremediation of a mine tailing with biochar and a mycorrhizal fungus. *International Journal of Phytoremediation*, 19(2), 174-182. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1207602>
- González-Chávez, M. C., Carrillo-González, R., & Gutiérrez-Castorena, M. C. (2009). Natural attenuation in a slag heap contaminated with cadmium: The role of plants and arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 1288-1298. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.110>
- Gutiérrez, A. M., Cabriales, J. J. P., & Vega, M. M. (2010). Isolation and Characterization of Hexavalent Chromium-Reducing Rhizospheric Bacteria From a Wetland. *International Journal of Phytoremediation*, 12(4), 317-334. <https://doi.org/10.1080/15226510902968118>
- 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. [publicación en línea]. Disponible desde internet en <https://www.researchgate.net/publication/320617358_VEGETACION_RESIDUOS_DE_MINA_Y_ELEMENTOS_POTENCIALMENTE_TOXICOS_DE_UN_JAL_DE_PACHUCA_HIDALGO_MEXICO> [Consultado 07 Febrero 2021]
- INECC. (2007). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: Los residuos en la minería mexicana. [publicación en línea] Disponible en internet en <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/35/los_residuos.html#:~:text=Los%20elementos%20potencialmente%20t%C3%B3xicos%20m%C3%A1s,gastados%20y%20a%20los%20disolventes%20residuales> [Consultado 07 Febrero 2021]
- INEGI. (2009). INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA: Censos económicos 2009. [publicación en línea] Disponible en internet en <https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ce/2009/doc/minimonografias/m_mineria.pdf> [Consultado 10 Febrero 2021].
- Juárez-Santillán, L. F., Lucho-Constantino, C. A., Vázquez-Rodríguez, G. A., Cerón-Ubilla, N. M., & Beltrán-Hernández, R. I. (2010). Manganese accumulation in plants of the mining zone of Hidalgo, Mexico. *Bioresource Technology*, 101(15), 5836-5841. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.020>
- Labra-Cardón, D., Guerrero-Zúñiga, L. A., Rodríguez-Tovar, A. V., Montes-Villafán, S., Pérez-Jiménez, S., & Rodríguez-Dorantes, A. (2012). Respuesta de crecimiento y tolerancia a metales pesados de *Cyperus Elegans* Y *Echinochloa Polystachya* inoculadas con una rizobacteria aislada de un suelo contaminado con hidrocarburos derivados del petróleo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 7-16. [publicación en línea]. Disponible en internet en <https://www.researchgate.net/publication/261698099_RESPUESTA_DE_CRECIMIENTO_Y_TOLERANCIA_A_METALES_PESADOS_DE_Cyperus_elegans_Y_Echinochloa_polystachya_INOCULADAS_CON_UNA_RIZOBACTERIA_AISLADA_DE_UN_SUELO_CONTAMINADO_CON_HIDROCARBUROS_DERIVADOS_DEL_PET> [Consultado 09 Febrero 2021]
- Maldonado-Magaña, A., Favela-Torres, E., Rivera-Cabrera, F., & Volke-Sepulveda, T. L. (2010). Lead bioaccumulation in *Acacia farnesiana* and its effect on lipid peroxidation and glutathione production. *Plant and Soil*, 339(1-2), 377-389. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0589-6>
- Méndez-Hurtado, A., Rangel-Méndez, R., Yáñez-Espinosa, L., & Flores, J. (2013). Tolerance to Cadmium of *Agave lechuguilla* (Agavaceae) Seeds and Seedlings from Sites Contaminated with Heavy Metals. *The Scientific World Journal*, 2013, 1-11.

- <https://doi.org/10.1155/2013/167834>
- Mireles, A., Solís, C., Andrade, E., Lagunas-Solar, M., Piña, C., & Flocchini, R. G. (2004). Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 219-220, 187-190. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.051>
 - Monachese, M., Burton, J. P., Reid, Gregor (2012). Bioremediation and tolerance of humans to heavy metals through microbial processes: a potential role for probiotics?. *Appl Environ Microbiol*, 78(18), 6397-404. doi: 10.1128/AEM.01665-12
 - Morton-Bermea, O., Gómez-Bernal, J. M., Armienta, M. A., Lozano, R., Hernández-Álvarez, E., Romero, F., & Castro-Larragoitia, J. (2013). Metal accumulation by plant species growing on a mine contaminated site in Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 71(12), 5207-5213. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2923-9>
 - Muro-González, D. A., Mussali-Galante, P., Valencia-Cuevas, L., Flores-Trujillo, K., & Tovar-Sánchez, E. (2020). Morphological, physiological, and genotoxic effects of heavy metal bioaccumulation in *Prosopis laevigata* reveal its potential for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(32), 40187-40204. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10026-5>
 - Navarro-Noya, Y. E., Hernández-Mendoza, E., Morales-Jiménez, J., Jan-Roblero, J., Martínez-Romero, E., & Hernández-Rodríguez, C. (2012). Isolation and characterization of nitrogen fixing heterotrophic bacteria from the rhizosphere of pioneer plants growing on mine tailings. *Applied Soil Ecology*, 62, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.07.011>
 - Ortega-Aguilar, C. S., Gutiérrez-Rojas, M., & Cruz-Hernández, A. L. (2020). Tolerance and accumulation of lead by endophytic association between *Festuca arundinacea* and *Lewia* sp. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(1), 151-160. <https://doi.org/10.24275/rmiq/bio1649>
 - Ortega-Larrocea, M. P., Xoconostle-Cázares, B., Maldonado-Mendoza, I. E., Carrillo-González, R., Hernández-Hernández, J., Garduño, M. D., ... González-Chávez, M. C. A. (2009). Plant and fungal biodiversity from metal mine wastes under remediation at Zimapán, Hidalgo, Mexico. *Environmental Pollution*, 158(5), 1922-1931. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.034>
 - Ortiz-Cano, H. G., Trejo-Calzada, R., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Flores-Hernández, A., & López-Ariza, B. (2009). Phytoextraction of lead and cadmium in contaminated soils using pigweed (*Amaranthus hybridus* L.) and mycorrhiza. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XV(2), 161-168. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.15.022>
 - Osuna-Vallejo, V., Sáenz-Romero, C., Escalera-Vázquez, L., de la Barrera, E., & Lindig-Cisneros, R. (2018). Total Mercury in Plant Tissue from a Mining Landscape in Western Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 102(1), 19-24. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2488-0>
 - Perales Aguilar, L., Santos Díaz, M. S., Gómez Aguirre, Y. A., Ramos Gómez, M. S., & Perez Molphe Balch, E. (2020). Análisis in vitro de la acumulación de metales pesados en plantas de la familia Asparagaceae tolerantes a la baja disponibilidad de agua. *Nova Scientia*, 12(24), 1-22. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2081>
 - Prieto García, F., Lechuga Vargas, M. L. Á., Méndez Marzo, M. A., Barrado Esteban, E., & Ggaytán Oyarzún, J. C. (2006). Daños tóxicos en tejidos vegetales, producidos por aguas contaminadas con arsénico en Zimapán, Hidalgo, México. *Ciencia e Tecnología de Alimentos*, 26(1), 94-97. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612006000100016>
 - Rodríguez Ortiz, J. C., Rodríguez Fuentes, H., Lira Reyes, G., Martínez de la Cerda, J., & Lara Mireles, J. L. (2006). Capacidad de seis especies vegetales para acumular plomo en suelos contaminados. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(3), 239-245. [publicación en línea]. Disponible en internet en

- <<https://www.redalyc.org/pdf/610/61029308.pdf>> [Consultado 10 Febrero 2021].
- Rodríguez-Ortíz, J. C., Valdez-Cepeda, R. D., Lara-Mireles, J. L., Rodríguez-Fuentes, H., Vázquez-Alvarado, R. E., Magallanes-Quintanar, R., & García-Hernández, J. L. (2006). Soil Nitrogen Fertilization Effects on Phytoextraction of Cadmium and Lead by Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Bioremediation Journal*, 10(3), 105-114. <https://doi.org/10.1080/10889860600939815>
- Rojas-Loria, C. C., Peralta-Perez, M. D. R., Buendia-Gonzalez, L., & Volke-Sepulveda, T. L. (2012). Effect of A Saprophytic Fungus on the Growth and the Lead Uptake, Translocation and Immobilization in *Dodonaea Viscosa*. *International Journal of Phytoremediation*, 14(5), 518-529. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.604980>
- Ruiz Huerta, E. A., & Armienta Hernández, M. A. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(2), 103-117. [publicación en línea]. Disponible en internet en: <https://www.researchgate.net/publication/262617562_Acumulacion_de_arsenico_y_metales_pesados_en_maiz_en_suelos_cercanos_a_jales_o_residuos_mineros> [Consultado 06 Febrero 2021]
- Ruiz-Olivares, A., Carrillo-González, R., González-Chávez, M. C. A., & Soto-Hernández, R. M. (2013). Potential of castor bean (*Ricinus communis* L.) for phytoremediation of mine tailings and oil production. *Journal of Environmental Management*, 114, 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.023>
- Ruiz-Olivares, A., González-Chávez, M. C. A., & Carrillo-González, R. (2017). *Ricinus communis* L., y *Pseudomonas* sp. para la remediación de suelos contaminados con residuos de mina. *Agroproductividad*, 10(4), 48-56. [publicación en línea]. Disponible en internet en: <https://www.researchgate.net/publication/320237534_Ricinus_communis_L_y_Pseudomonas_sp_para_la_remediacion_de_suelos_contaminados_con_residuos_de_mina> [Consultado 09 Febrero 2021]
- Salas-Luévano, M. A., Mauricio-Castillo, J. A., González-Rivera, M. L., Vega-Carrillo, H. R., & Salas-Muñoz, S. (2017). Accumulation and phytostabilization of As, Pb and Cd in plants growing inside mine tailings reforested in Zacatecas, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76(23), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7139-y>
- Sánchez Viveros, Gabriela, & Carrillo González, Rogelio, & Martínez Garza, Angel, & González Chávez, Ma. del Carmen (2004). Tolerancia adaptativa de hongos micorrízicos arbusculares al crecer en sustratos contaminados con As y Cu. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(4), 147-158. [publicación en línea]. Disponible en internet en: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=370/37020402>> [Consultado 08 Febrero 2021]
- Sánchez-López, A. S., González-Chávez, M. C. A., Carrillo-González, R., Vangronsveld, J., & Díaz-Garduño, M. (2014). Wild Flora of Mine Tailings: Perspectives for Use in Phytoremediation of Potentially Toxic Elements in a Semi-Arid Region in Mexico. *International Journal of Phytoremediation*, 17(5), 476-484. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.922922>
- Santana-Flores, Amairani, Sánchez-Ayala, Alejandro, Romero-Ramírez, Yanet, Toledo-Hernández, Erubiel, Ortega-Acosta, Santo Ángel, & Toribio-Jiménez, Jeiry. (2020). Aislamiento e identificación de bacterias tolerantes y bioacumuladoras de metales pesados, obtenidas de los jales mineros El Fraile, México. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 6775.2020. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.430>
- Santos-Jallath, J., Castro-Rodríguez, A., Huevo-Casillas, J., & Torres-Bustillos, L. (2012). Arsenic and heavy metals in native plants at tailings impoundments in Queretaro,

- Mexico. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 37-39, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.12.002>
- Santoyo-Martínez, M., Mussali-Galante, P., Hernández-Plata, I., Valencia-Cuevas, L., Flores-Morales, A., Ortiz-Hernández, L., Tovar-Sánchez, E. (2020). Heavy metal bioaccumulation and morphological changes in *Vachellia campechiana* (Fabaceae) reveal its potential for phytoextraction of Cr, Cu, and Pb in mine tailings. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(10), 11260-11276. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07730-7>
- SEMARNAT. (2 de Marzo de 2007). PROFEPA. [publicación en línea]. Disponible en internet en: <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf> [Consultado 10 Febrero 2021].
- Zacarías Salinas, M., Beltrán Villavicencio, M., Bustillos, L. G. T., & González Aragón, A. (2012). Assessment of in situ and ex situ phytoremediation with grass mixtures in soils polluted with nickel, copper, and arsenic. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 37-39, 52-57. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.11.006>
- Zacarías, M., Beltrán, M., Gilberto Torres, L., & González, A. (2012). A feasibility study of perennial/annual plant species to restore soils contaminated with heavy metals. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 37-39, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.008>

Anexo 1

Referencia	Estado	Contaminante(s)	Tipo de organismo
Zacarias, M. et al., (2010)	Ed. <u>Mex</u>	Ni, As, Cu	Planta
Salas-Luévano et al., (2017)	Zacatecas	As, Pb, Cd	Planta
Ruiz-Huerta & Armenta-Hernández (2012)	Guerrero	As, <u>Pb</u> , Zn, Cu, Fe, Cd	Planta
Prieto-García et al., (2005)	Hidalgo	As	Planta
Santana Flores et al., (2020)	Guerrero	As, Pb, <u>Cd</u> , <u>Tl</u> , Hg, Cu, Fe, Mn, Co, Ni, Cr, V, Zn	Bacteria
Santos-Jallath et al., (2011)	Querétaro	As, <u>Cd</u> , <u>Pb</u> , Cu, Zn	Planta
González-Chávez et al., (2015)	Hidalgo	As	Planta
Armenta et al., (2008)	Hidalgo	As	Planta
Flores-Tavizón et al., (2003)	Chihuahua	As	Planta
Zacarias Salinas et al., (2012)	n/a	Ni, As, Cu	Planta
Gardea-Torresdey et al., (2003)	-	Cd, Cr, Cu	Planta
Acosta-Rodríguez et al., (2018)	SLP	Zn, <u>Pb</u> , Hg, As, <u>El</u> , Co, Cd	Hongo
Rodríguez-Ortiz et al., (2006)	NL	Pb	Planta
Rojas-Lonca et al., (2012)	n/a	Pb	Planta-Hongo
Contreras-Pinto et al., (2013)	Durango	Pb	Planta
Duarte-Zaragoza et al., (2020)	Hidalgo	Pb, Cu	Planta
Gómez-Bernal et al., (2017)	Guerrero	Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn	Planta
Ortiz-Cano et al., (2009)	Durango	Pb, Cd	Planta-Hongo
Míreles, A. et al., (2004)	Ed. <u>MEx</u>	Fe, Cr, Co, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb	Planta
Armenta et al., (2019)	Hidalgo	Zn, Fe, <u>Pb</u> , As, Cd	Planta
Santoyo-Martínez et al., (2020)	Morelos	<u>Pb</u> , Fe, Cr, Cu, Zn	Planta
Franco-Hernández et al., (2010)	SLP	As, Ca, <u>Cd</u> , <u>Co</u> , Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, <u>Mo</u> , <u>Ni</u> , <u>Pb</u> , Sb, Sr, Ti, Va, Zn	Planta
Amezcu-Alieri et al., (2005)	Tabasco	Ni, Cu, Pb	Hongo
Perales Aguilar et al., (2020)	Aguascalientes	Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Pb, Zn	Planta
Buendía-González et al., (2010)	SLP	Pb, Ni	Planta
Buendía-González et al., (2019)	SLP	Pb, Cd, Ni, Cr	Planta
Gutiérrez et al., (2010)	Guanajuato	Cr, As, Se, Cd	Planta
Navarro-Nova et al., (2012)	Zacatecas	Ni, Cu, Co, Cr, Zn	Planta-Bacteria, Bacteria
González-Chávez et al., (2017)	Hidalgo	Cu, <u>An</u> , Cd, Pb	Planta-Hongo
Maldonado Magaña et al., (2011)	n/a	Pb	Planta
Juárez-Santillán et al., (2010)	Hidalgo	Mn	Planta
Morton-Bermea et al., (2013)	Guerrero	Cu, Fe, Mn, Pb, Zn	Planta
González & González-Chávez (2006)	Zacatecas	Cd, Ni, Pb, Mn, Cu, Zn	Planta
Muro-González et al., (2020)	Morelos	Fe, Pb, Zn, Cu	Planta
González-Chávez et al., (2008)	Ed. <u>Mex</u>	Cd	Planta, Planta-Hongo
Cortés-Jiménez et al., (2013)	Guerrero	Cu, Mn, Pb, Zn	Planta
Ortega-Larrocea et al., (2009)	Hidalgo	Cd, Ni, Pb, As	Planta, Planta-Hongo, Hongo
Ruiz Olivares et al., (2013)	Hidalgo	Cu, Zn, Mn, Pb, Cd	Planta
Buendía-González et al., (2010)	SLP	Cr, Cd	Planta
Carranza Álvarez et al., (2016)	SLP	<u>Cd</u> , <u>Pb</u> , Fe	Planta
Labra Cardón et al., (2012)	Veracruz	Cd, Zn	Planta-Bacteria
Ruiz-Olivares et al., (2017)	Hidalgo	Cu, Zn, Cd, Pb	Planta-Bacteria
Carmona-Chit et al., (2016)	Hidalgo	Cu, Zn, Ni, Cd, Pb	Planta
Rodríguez-Ortiz et al., (2006)	NL	<u>Cd</u> , <u>Pb</u>	Planta
Ortega-Aguilar et al., (2020)	Zacatecas	Pb	Planta-Hongo
González-Chávez et al., (2012)	n/a	Cd, Cr, Ni, Cu	Planta
Méndez-Hurtado et al., (2013)	SLP	Cd	Planta
Alcantara Martínez et al., (2016)	Hidalgo	As	Planta
Sánchez-Viveros et al., (2004)	n/a	As, Cu	Hongo
Osuna-Vallejo et al., (2018)	Michoacán	Hg	Planta
Hérmendez-Acosta et al., (2009)	Hidalgo	Cd, Cu, Pb, Zn, Mn	Planta
Sánchez-López et al., (2014)	Hidalgo	Zn, Cd, Pb, Cu, Ni, Co	Planta