

FITORREMIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS: UNA REVISIÓN

PHYTOREMEDIATION OF CONTAMINATED SOIL BY HEAVY METALS: A REVIEW

Maybis Eugenia López Hernández¹
Osman Enrique Morales Hernández²

(Recibido/received: 09-agosto-2022; aceptado/accepted: 03-septiembre-2022)

RESUMEN: El presente artículo tiene como objetivo proporcionar una descripción de los conceptos básicos de la fitorremediación como una tecnología amigable y viable para la remediación de los suelos por metales pesados. Mediante la recopilación de documentación en base de datos confiables y una revisión de literatura disponible, se incluyeron publicaciones vinculados a la fitorremediación de sitios contaminados. Dentro de la fitorremediación existen diferentes estrategias como la fitoextracción, fitoestabilización y fitovolatilización, que poseen ventajas como la remoción permanentemente de los metales del suelo sin alterar la calidad del suelo, contribuye a restaurar la vegetación del sitio y reducir la erosión del suelo, además, se puede aplicar de manera *in situ* o *e x situ*. Sin embargo, entre sus desventajas se encuentra el periodo de tiempo prolongado, la fitotoxicidad de las plantas y biodisponibilidad del metal, y el tratamiento de la biomasa contaminada cuyas alternativas de manejo incluyen su deposición en vertederos para desechos peligrosos o incineración para la purificación y recuperación de los metales pesados. Otra alternativa es la utilización de la biomasa como bioenergía, no obstante, existe poco conocimiento sobre las emisiones que se podrían generar durante este proceso. Entre los desafíos de la fitorremediación se encuentran la baja tasa de crecimiento de las plantas, raíces poco profundas y poca producción de biomasa, así como las plagas y enfermedades que pueden reducir la eficiencia en la remoción de los contaminantes. La fitorremediación ha tenido un gran auge en los últimos años, sin embargo, aún hay desafíos que enfrentar para lograr una fitorremediación sostenible.

¹ Licenciada en Química, responsable de Laboratorio del Centro de Investigación en Biotecnología de la UNAN-Managua y Maestranda Activa del XVI Ciclo de Maestrías Ambientales del Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA-UNI). Managua, Nicaragua. Correo electrónico: mlopezh@unan.edu.ni. <https://orcid.org/0000-0002-4523-3129>

² Ingeniero Industrial y de Sistemas, Especialista Ambiental del Instituto Nicaragüense de Energía-INE y Maestrando Activo del XVI Ciclo de Maestrías Ambientales del Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA-UNI). Managua, Nicaragua. Correo electrónico: osmanmoher@gmail.com

PALABRAS CLAVES: Fitorremediación de suelos contaminados; Metales Pesados; biodisponibilidad; desafíos; disposición de la biomasa.

ABSTRACT: The objective of this article is to provide a description of the basic concepts of phytoremediation as a friendly and viable technology for the remediation of soils by heavy metals. Through the compilation of documentation in reliable databases and a review of the available literature, publications related to the phytoremediation of contaminated sites were included. Within phytoremediation there are different strategies such as phytoextraction, phytostabilization and phytovolatilization, which have advantages such as the permanent removal of metals from the soil without altering the quality of soils, it contributes to restoring the vegetation of the site and reducing soil erosion, in addition, it can be applied on-site or off-site. However, among its disadvantages are the prolonged period of time, the phytotoxicity of plants and bioavailability of the metal, and the treatment of contaminated biomass whose management alternatives include its disposal in landfills for hazardous waste or incineration for purification and recovery of heavy metals. Another alternative is the use of biomass as bioenergy, however, there is little knowledge about the emissions that could be generated during this process. Among the challenges of phytoremediation are the low growth rate of plants, shallow roots and low biomass production, as well as pests and diseases that can reduce the efficiency in the removal of pollutants. Phytoremediation has had a great boom in recent years, however, there are still challenges to face to achieve sustainable phytoremediation.

KEYWORDS: Phytoremediation of contaminated soils; heavy metals; bioavailability; challenges; biomass disposal.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los suelos por metales pesados es una problemática ambiental que causa estrés abiótico debido a las altas concentraciones de contaminantes que, aunque en muchos casos los metales pesados se encuentran de manera natural en el suelo, las actividades antropogénicas contribuyen al aumento de las concentraciones de estos contaminantes (Shehata S., Badawy R. & Aboulsoud Y., 2019).

Las principales fuentes de contaminación del suelo se asocian a las actividades industriales, domésticas, agrícolas y ganaderas las cuales provocan una disminución de los servicios ecosistémicos que brinda el suelo (FAO, 2019). Los metales pesados pueden ser tóxicos para las plantas ya que son acumulados y trasladados hacia sus partes aéreas provocando una baja tasa de crecimiento y además puede representar una amenaza potencial ya que pueden entrar fácilmente en la cadena trófica y afectar a la salud humana (Shehata S., Badawy R. & Aboulsoud Y., 2019).

La fitorremediación es una técnica biotecnológica utilizada para tratar suelos y aguas contaminadas mediante la adsorción o degradación de contaminantes. La fitorremediación es considerada una metodología amigable con el ambiente debido a que reduce la movilidad y lixiviación de los metales pesados. (Hui Awa S. & Hadibarata T., 2020), es conocida como remediación verde, remediación botánica y remediación vegetal, donde ocurren diferentes procesos según las condiciones del sitio, tipo de contaminante y potencial fitorremediador de la planta (Pivetz B., 2001).

Se proporciona una revisión bibliográfica de los conceptos, las técnicas de fitorremediación y sus aplicaciones para la remediación de suelos contaminados por metales pesados, ventajas y desventajas de la fitorremediación, así como la estrategia que utilizan las plantas para remover los contaminantes del suelo. La fitorremediación es una alternativa viable para un desarrollo sostenible y para mitigar los problemas ambientales de contaminación del suelo (Shah V. & Daverey A., 2020).

METODOLOGÍA

Se hizo recopilación y revisión de documentación bibliográfica constituido principalmente de artículos científicos publicados entre el año 1999 a 2020 basados la aplicación de la fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados. Se realizó una búsqueda sistemática de la literatura en las bases de datos de ScienceDirect, Elsevier, Springer, Researchgate, Redalyc, EPA, FAO, para ello se escogieron aproximadamente 60 artículos científicos relacionados con técnicas de biorremediación de sitios contaminados.

Se excluyeron publicaciones que utilizaban bacterias y hongos para biorremediar aguas contaminadas por metales pesados e hidrocarburos. Se incluyeron artículos científicos cuyo contenido fueran adecuados a la temática y vinculados a la contaminación de suelos por metales pesados, así como aquellos donde utilizaron una simbiosis entre la planta y hongos para el tratamiento de suelos. Cada publicación fue analizada para evaluar la importancia del uso de plantas con potencial fitorremediador como una técnica viable para la remediación de suelos contaminados por metales pesados

DESARROLLO

Contaminación de suelos por metales pesados

Nicaragua según datos proporcionados por en el informe anual 2021 del Banco central de Nicaragua tuvo un crecimiento de 37,9 % en el sector minero y canteras, (37.9%), construcción (33.4%), comercio (16.2%), industria manufacturera (14.3%), pesca y acuicultura (12.2%), electricidad (10.9%) y hoteles y restaurantes (10.5%). Muchas de las industrias han venido

creciendo de forma artesanal como es el caso del sector minero el cual ha registrado un crecimiento exponencial (Centro Humboldt, 2017), lo que implica un mayor uso de los recursos naturales como el suelo dando como consecuencia la contaminación del mismo por metales pesados.

Los metales propios del suelo pueden incluir el silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg), y algunos metales pesados como el plomo, cadmio, cromo, mercurio, zinc, cobre, planta, entre otros, constituyen gran importancia debido que son esenciales para las células, sin embargo, a altas concentraciones resultan tóxicos para los seres vivos, plantas, animales y organismos del suelo. Algunos de estos metales son indispensables para las plantas en la activación del metabolismo vegetal como es el caso del manganeso (Mn) (Prieto et al., 2009).

La contaminación de los suelos por metales pesados se debe a las actividades geogénicas y antropogénicas (McIntyre, T. , 2003). Los metales pesados son liberados a la atmósfera mediante la descarga de gases y polvos provenientes de vehículos de transporte, materiales de construcción y producción de energía provocando contaminación atmosférica (Ashraf S., Ali Q., Ahmad Zahir Z., Ashraf S. & Naeem Asghar H., 2019).

Wuana R. & Okieimen F. (2011) menciona que la toxicidad de los metales en el ambiente se debe a que la obtención de metales pesados de manera artificial es mayor en comparación a la generación de manera natural. La actividad minera contribuye a la contaminación de zonas aledañas provocando una exposición directa de los metales pesados, las concentraciones de los metales pesados que son descargados a los cuerpos receptores son relativamente más altas en comparación al medio donde se depositan y el estado químico en que se encuentra el metal en el ambiente permite que se encuentre disponible o no disponible.

Por otro lado, la aplicación de fertilizantes principalmente los que son a base de fosfatos contienen pequeñas cantidades de metales pesados y su aplicación frecuente aumenta la concentración de los contaminantes en el suelo (Ashraf S., Ali Q., Ahmad Zahir Z., Ashraf S. & Naeem Asghar H., 2019).

La lixiviación de los metales pesados contribuye a la contaminación ambiental debido a que muchos metales no son degradables. Por otro lado, el uso de aguas residuales para la irrigación de cultivos, contribuye al aumento de las concentraciones de metales pesados en el suelo, provocando daños en los organismos vivos a través de procesos de bioacumulación y biomagnificación. La mayor concentración de metales pesados generalmente se encuentra en la capa superficial del suelo provocando una baja adsorción de los nutrientes del suelo. (Ashraf S., Ali Q., Ahmad Zahir Z., Ashraf S. & Naeem Asghar H., 2019).

Los metales pueden fijarse en el suelo mediante mecanismos de adsorción, precipitación y complejación dependiendo de las propiedades del suelo, los metales también pueden eliminarse del suelo mediante absorción, lixiviación y volatilización cuando es fitovolatilizado por las plantas, algunos metales como arsénico, mercurio y selenio tienden a formar compuestos volátiles. (Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Kumpiene J., Park J., Makino T., Beth Kirkham M & Scheckel K., 2014).

Las opciones de remediación de suelos contaminados según FAO *et al.*, (2019) se clasifican en tratamientos físicos, químicos y biológicos, con potencial para la mayoría de los contaminantes del suelo y la selección de las mejores técnicas disponibles y su efectividad se encuentra ligado a aspectos físicos, económicos, reguladores y técnicos.

Sin embargo, una de las debilidades que se presenta como país es que actualmente no se cuenta con una normativa que establezca límites recomendables y máximos permisibles para metales en el suelo, esto hace que se tenga que acudir a guías internacionales como Normas Mexicanas, Guías Canadienses para la calidad del suelo, entre otros, lo que a la vez se convierte en un desafío a nivel nacional para establecer criterios para estimar la calidad de los suelos según sea su uso. Esto facilitaría evaluar técnicas apropiadas para la remediación de suelos contaminados por metales pesados.

Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados

La contaminación de suelos por metales pesados y la aplicación de la fitorremediación en sitios contaminados es un tema poco abordado en Nicaragua, sin embargo, esta técnica podría considerarse una alternativa viable y amigable con el medio ambiente ya que la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados se basa en el uso de plantas con potencial fitorremediador para la acumulación de metales pesados (Méndez *et al.*, 2019). El uso de especies vegetales tolerantes a metales del suelo y agua, permite que las actividades de restauración sean llevadas con un menor impacto ambiental sobre los sitios contaminados en comparación a técnicas más invasivas (Robinson *et al.*, 1997).

Para la remediación de suelos contaminados por metales pesados, Singh *et al.*, (2003), Prasad y Freitas (2003) mencionan que los mecanismos aplicados a la contaminación inorgánica de los suelos se basan en tres estrategias de la fitorremediación: fitoextracción o fitoacumulación, la fitoestabilización y la fitovolatilización. Estos procesos se representan en la figura 1 (Shah & Daverey, 2020).

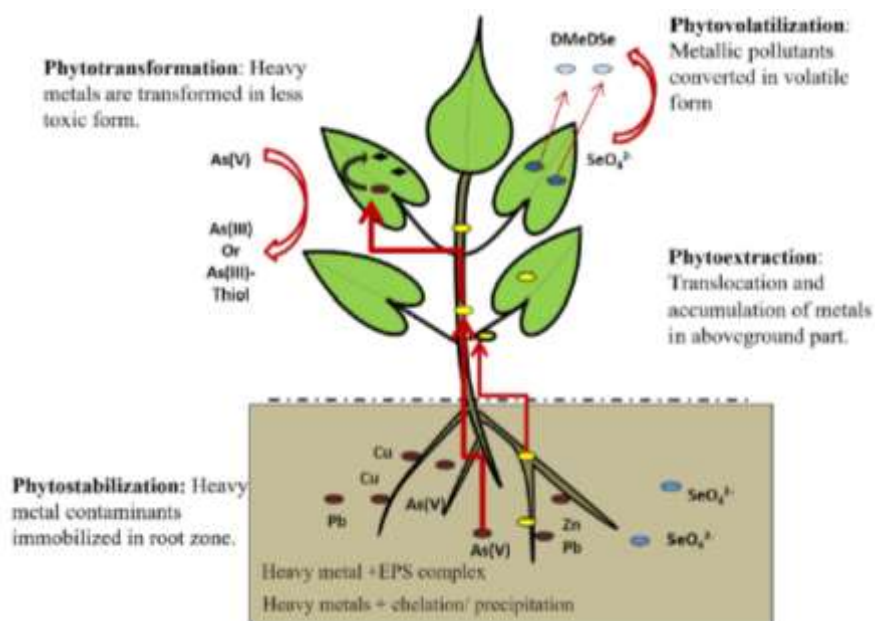


Figura 1. Representación esquemática de los procesos de fitorremediación. Fuente: Shah & Daverey (2020).

Fitoextracción

En la fitoextracción los contaminantes son absorbidos por las raíces, transportadas y acumuladas en los tallos y hojas. Las plantas que se involucran en este proceso deben idealmente poseer la habilidad de acumular contaminantes y producir biomasa. Las especies hiperacumuladoras son capaces de acumular contaminantes, pero producen poca biomasa, por lo que es posible el uso de especies que acumulen menos metales y produzcan más biomasa (Cristaldi *et al.*, 2017).

Fitoestabilización

El proceso de fitoestabilización reduce la movilidad del contaminante y previene la migración al agua subterránea y reduciendo la biodisponibilidad en la cadena trófica. Entre los usos de la fitoestabilización se encuentran para contaminantes de Pb, As, Cd, Cr, Cu y Zn (Cristaldi *et al.*, 2017).

Fitovolatilización

Cristaldi *et al.*, (2017) lo define como el proceso en que los contaminantes son absorbidos a nivel de las raíces, transportados a través del xilema y liberados a la atmósfera desde las partes aéreas de las plantas, en una forma menos tóxica como resultado de la modificación metabólica. Los contaminantes no son removidos sino transferidos de un estado a otro. La

fitovolatilización puede ser aplicada a los contaminantes presentes en el suelo, sedimentos y agua, especialmente para contaminantes orgánicos como los tetracloroetano, triclorometano y tetraclorometano y únicamente para ciertos metales como el Hg y Se, que tienen una volatilidad relativamente alta (Cristaldi *et al.*, 2017).

La respuesta fisiológica de las plantas a los metales pesados del suelo varía de la especie de la planta, los metales presentes y las concentraciones en el suelo (Prieto *et al.*, 2009). Según Prieto *et al.*, (2009) estas respuestas fisiológicas se clasifican en excluyentes, indicadoras y acumuladoras. Las plantas excluyentes presentan menor acumulación de metales en la parte aérea de la planta en comparación a las concentraciones del suelo; las plantas indicadoras muestran una relación lineal de concentraciones del metal en la parte aérea y en el suelo; y las plantas acumuladoras presentan una mayor acumulación en la parte aérea en concentraciones superiores a las presentes en el suelo.

Para los procesos de fitorremediación por estrategias de fitoestabilización, se buscan especies de plantas excluyentes que acumulen mayor concentración de metales en las raíces, lo que limita el traslado a partes aéreas y evitando el ingreso en la cadena trófica por medio de otros seres vivos. La fitoextracción por el contrario busca especies acumuladoras que transfieran los metales pesados a las partes aéreas de la planta, lo que facilita el uso de técnicas para su confinamiento (Prieto *et al.*, 2009).

De acuerdo a Hooda (2010) la medida relativa de transferencia de elementos traza del suelo a la planta es expresado como el factor de transferencia (FT), también referido como índice de acumulación o factor de bioconcentración, el que también puede ser empleado como una medida de la eficiencia de acumulación del elemento:

$$\text{Ec. 1} \quad FT = \frac{\text{concentracion en la planta}}{\text{concentracion en el suelo}}$$

El índice de tolerancia (IT) también puede ser determinado y representa la relación de la biomasa para plantas que crecen en suelos con elevados niveles de elementos en comparación a plantas crecidas en suelos de control con contenidos elementales de línea base (Hooda, 2010):

$$\text{Ec. 2} \quad IT = \frac{\text{biomasa}_{\text{suelo contaminado}}}{\text{biomasa}_{\text{suelo de referencia}}}$$

Los valores de IT menores a 1 indican un decremento neto de la biomasa, sugiriendo que las plantas sufren de estrés, los valores iguales a 1 no indican diferencias relativas a las condiciones de control no contaminadas.

Los factores que limitan la solubilidad y movilidad de los elementos en la solución del suelo también limitan su consumo por la planta. El pH del suelo es uno de los factores más significantes que influyen los elementos traza en solución, y por ende influencia en gran medida el consumo de la planta (Hooda, 2010). Los metales del suelo deben estar en sus formas químicas y solubles, que las plantas puedan absorber y translocar a los brotes de lo contrario la opción de fitoextracción sería nula.

Es por ello que el Cr (III), Pb, Sn, entre otros elementos, tienen una absorción limitada. Las plantas únicamente pueden absorber metales del volumen de suelo que las raíces exploran, lo que significa que la absorción de los metales en capas de suelo más profundas es limitada (Hooda, 2010). Las plantas hiperacumuladoras y árboles con raíces de mayor profundidad (10 m) proveen acceso para la remoción de contaminantes del agua subterránea y suelos contaminados de profundidades de más de 30 cm (Hooda, 2010).

Con base a lo anterior, se podrían utilizar plantas autóctonas de los sitios contaminados por metales pesados, que logran sobrevivir aun en condiciones de estrés extremo, es posible que estas plantas posean potencial fitorremediador, es decir, plantas hiperacumuladoras, acumuladoras o estabilizadoras de metales pesados. Las diferentes estrategias de fitorremediación pueden ser utilizadas según los objetivos del estudio. Por otro lado, es de vital importancia conocer las plantas con potencial fitorremediador existentes en el país que podrían ser adaptadas a diferentes condiciones edáficas en las regiones, y ser utilizadas para remediar suelos que han sido contaminados por metales pesados e inutilizados en los diferentes usos.

Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Laghlimi M., et al., (2015) señala algunas ventajas y desventajas de la fitorremediación:

Ventajas:

1. Es una técnica de bajo costo y eso hace que sea más rentable para ser utilizada. Según Shah V. & Daverey A (2020), el costo de la fitorremediación puede ser aproximadamente entre \$10/m³ a \$440/m³ más factible en comparación con otras tecnologías de remediación como la solidificación, extracción, remediación exsitu, biopila y lavado de suelo.
2. La fitorremediación es amigable con el ambiente ya que no tiene impactos negativos sobre la calidad del suelo.
3. La biomasa vegetal cosechada después la fitoextracción en algunos casos se puede utilizar para la producción de bioenergía (Ashraf S., Ali Q., Ahmad Zahir Z., Ashraf S. & Naeem Asghar H., 2019).

4. La presencia de la planta en los suelos contaminados contribuye a la disminución de la erosión del suelo, estabiliza los metales y contribuye a transformar los contaminantes a sustancias menos tóxicas (Laghlimi M., Baghdad B., El Hadi H. & Bouabdli A., 2015).
5. Se puede aplicar para remediar suelos contaminados por una variedad de metales tóxicos.
6. Se puede aplicar *in situ* o *ex situ* (Pivetz B., 2001).

Desventajas:

1. Es un proceso que requiere de un período de tiempo largo desde meses hasta años ya que depende de los ciclos biológicos de cada planta con potencial fitorremediador para remover el contaminante del suelo (Shah V. & Daverey A., 2020).
2. La fitotoxicidad de las plantas provoca una disminución de la tasa de crecimiento de la planta lo cual influye en la eficacia de la fitorremediación causando limitación de profundidad de las raíces de las plantas, por esta razón se requiere que los contaminantes del suelo a remediar se encuentren en las zonas cercanas a las raíces de las plantas. Una tasa de crecimiento baja de las plantas podría prolongar el tiempo de remediación del suelo (Pivetz B., 2001; Shah V & Daverey A., 2020).
3. Una de las limitantes de la fitorremediación es el almacenamiento, tratamiento y eliminación de la biomasa después de haber cumplido su función de remediación.
4. Cuando los metales tóxicos se encuentran fuertemente ligados al suelo son más difíciles de remover esto hace menos efectiva la fitorremediación

A pesar de las desventajas que posee la fitorremediación, es considerada una de las técnicas más favorables para la remediación de suelos contaminados por metales pesados, por utilizar plantas que favorezcan a la restauración del suelo sin provocar alteraciones a las características naturales del mismo.

Factores que afectan la fitorremediación

La fitorremediación de suelos contaminados depende mucho de la biodisponibilidad del metal en el suelo, la unión de los metales en suelo hace que estos sean insolubles y por tal razón poco disponible para las plantas, sin embargo muchas plantas han creado mecanismos para solubilizar los metales creando sustancias solubilizadoras de metales pesados llamadas fitosideróforos, así mismo ciertos microorganismos rizosféricos mediante consorcios pueden contribuir a la solubilidad del metal (Ali H., Khan E. & Anwar Sajad M., 2013; Laghlimi M., Baghdad B., El Hadi H. & Bouabdli A., 2015). La fitodisponibilidad de los metales depende de las propiedades del suelo como pH, textura del suelo, materia orgánica, potencial redox entre otros. (Singh Kanwar V., Sharma A., Lal Srivastav A. & Rani L., 2020)

Otros factores que afectan a la fitorremediación del metal en el suelo son las especies de plantas, la tasa de crecimiento y la capacidad de sus raíces para remover el contaminante, así como los indicadores geográficos de la zona tales como la altitud, condiciones climáticas, temperatura, humedad entre otros. En la figura 2, se muestran los factores más comunes que afectan a la fitorremediación. (Singh Kanwar V., Sharma A., Lal Srivastav A. & Rani L., 2020)

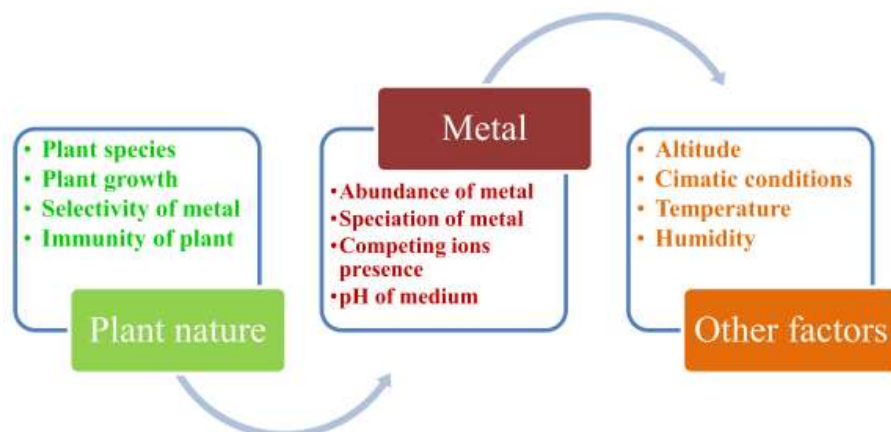


Figura 2. Factor de influencia para la fitorremediación de metales pesados. Fuente: Singh Kanwar V., Sharma A., Lal Srivastav A. & Rani L. (2020).

Disposición de biomasa

La disposición de la biomasa después de ser utilizada para la remediación de suelos contaminados es una de las mayores preocupaciones de la fitorremediación por lo que es considerado una desventaja de esta tecnología, sin embargo, (Hui Awa S. & Hadibarata T., 2020, McIntyre, T. , 2003; Lasat, M. M, 1999) mencionan que la biomasa debe ser manejada y darle una disposición adecuada de acuerdo a las regulaciones del país, puede ser depositada en un vertedero para desechos peligrosos ya que estas plantas poseen altas concentraciones de metales tóxicos que fueron removidos del suelo.

Asimismo, los autores antes citados señalan que otra alternativa para la disposición de la biomasa, es la incineración y extracción de los metales. El valor de los metales puede compensar los costos de remediación del suelo, lo que se considera como un incentivo adicional para la fitorremediación. Por otro lado, Gomes H. (2012) menciona que la biomasa puede ser utilizada como bioenergía o energía renovable, principalmente las plantas bioenergéticas, es decir, plantas que poseen un período de crecimiento corto, sin embargo, esta alternativa tiene la limitante que hay poco conocimiento sobre las emanaciones que se pueden generar durante el uso de esta tecnología.

Desafíos de la fitorremediación

La fitorremediación a pesar que es una alternativa viable para la remediación de suelos contaminados por metales pesados, tiene algunos desafíos. La mayoría de las plantas que son hiperacumuladoras poseen la restricción de una tasa lenta de crecimiento, raíces poco profundas y baja biomasa, así como la susceptibilidad de ataques de plagas y enfermedades que son propias de la zona que se está remediando por tal razón es apropiado el uso de plantas autóctonas de la región, debido a que la fitorremediación depende de las condiciones climáticas de la región. (Mahar A., Wang P., Ali A., Kumar Awasthi M., Hussain Lahori A., Wang Q., Li R. & Zhang Z., 2016).

Por otro lado, la biodisponibilidad de los metales que están fuertemente ligados al suelo permite una fitorremediación poco eficiente lo cual se podrían utilizar quelantes sintéticos tales como ácido cítrico, EDTA, EGTA, CDTA, DTPA, entre otros, sin embargo, estos son no degradables, tóxicos y persistentes (Shah V. & Daverey A., 2020). La actividad agrícola y la utilización de enmiendas en el suelo afectan negativamente la movilidad de los metales. (Mahar A., Wang P., Ali A., Kumar Awasthi M., Hussain Lahori A., Wang Q., Li R. & Zhang Z., 2016).

Otro desafío importante para la fitorremediación es la disposición de la biomasa, la compactación y compostaje es una alternativa, sin embargo, aumenta la lixiviación de compuestos metálicos por tal razón la eliminación de la biomasa se debe realizar de manera sostenible. (Shah V. & Daverey A., 2020).

Uno de los mayores desafíos de la fitorremediación es el poco conocimiento en la clasificación de plantas autóctonas con potencial fitorremediador que crecen en sitios contaminados. Por otro lado, la legislación y la practica en la remediación actual del suelo se basan en las concentraciones totales de los contaminantes y no en la funcionalidad del suelo o el manejo del suelo basado en el riesgo, lo que puede ser una barrera para el uso de la fitorremediación por ser un proceso de remediación (Gomes H., 2012). Debido a que en Nicaragua no se cuenta con una normativa que establezca parámetros calidad de los suelos contaminados por metales pesados, no se llevan a cabo acciones para su remediación, y muchas industrias del país no se enfocan en la gestión de la calidad de los suelos, conllevando al desconociendo las características físico-química de suelos contaminados por metales pesados.

CONCLUSIONES

La fitorremediación es una técnica prometedora y viable para remediar suelos contaminados por metales pesados sin dañar sus propiedades físico-químicas, además es de bajo costo y con beneficios ecológicos. Según los objetivos de remediación, se pueden emplear plantas con características de acumulación en raíces y parte aérea de las plantas mediante mecanismos de fitoextracción, fitoestabilización y fitovolatilización, sin embargo, esta técnica posee ventajas y

desventajas que además se convierten en un desafío para su implementación, de los cuales uno el mayor desafío es la disposición final de la biomasa una vez que ya ha sido utilizada, así como la falta de una normativa en el país que establezca la calidad del suelo para sus diferentes usos y la falta de conocimiento sobre los tipos de plantas con potencial fitorremediador que pueden ser utilizadas en la remediación de sitios contaminados por metales pesados.

La biodisponibilidad del metal para ser tomado por la planta representa un aspecto de vital importancia para valorar la eficiencia de la remoción de metales del suelo por lo que se debe garantizar, entre otros aspectos, que las formas de metales confieran estas características para hacer de la fitorremediación una tecnología factible.

REFERENCIAS

- Ali H., Khan E. & Anwar Sajad M. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Elsevier*, 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>.
- Ashraf S., Ali Q., Ahmad Zahir Z., Ashraf S. & Naeem Asghar H. (2019). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Elsevier*, 714-727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>.
- Banco Central de Nicaragua. (2021). Informe anual 2021. Obtenido de: https://www.bcn.gob.ni/sites/default/files/documentos/Informe_Anual_2021.pdf
- Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Kumpiene J., Park J., Makino T., Beth Kirkham M & Scheckel K. (2014). Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize? *Elsevier*, 141-166. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>.
- Centro Humboldt. (2017). La pequeña minería y minería artesanal en Nicaragua. Obtenido de: <https://humboldt.org.ni/la-pequena-mineria-y-mineria-artesanal-en-nicaragua/>
- Cristaldi, A., Conti, G. O., Jho, E. H., Zuccarello, P., Grasso, A., Copat, C., & Ferrante, M. (2017). Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology and Innovation*, 8, 309–326. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.08.002>
- FAO (Organización de las naciones Unidas para la Agricultura), Rodriguez, N., Michael, & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. In *Organizacion de las Naciones Unidas para la alimentacion y la agricultura FAO*. <http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>
- Gomes H. (2012). Phytoremediation for bioenergy: challenges and opportunities. *Environmental Technology Reviews*, 59-66. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2012.696715>.

- Hooda P. (2010). Trace elements in soil. *General Soil Chemistry, Principles and Processes*, 9-37. School of Geography, Geology and the Environment, Kingston University London, UK. A John Wiley and Sons, Ltd, Publication. DOI:10.1002/9781444319477
- Hui Awa S. & Hadibarata T. (2020). Removal of Heavy Metals in Contaminated Soil by Phytoremediation Mechanism: a Review. *Springer Nature Switzerland AG*, 231:47. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4426-0>.
- Laghlimi M., Baghdad B., El Hadi H. & Bouabdli A. (2015). Phytoremediation Mechanisms of Heavy Metal Contaminated Soils: A Review. *Open Journal of Ecology*, 75-388. <http://dx.doi.org/10.4236/oje.2015.58031>.
- Lasat, M. M. (1999). Phytoextraction of Metals from Contaminated Soil: A Review of Plant/Soil/Metal Interaction and Assessment of Pertinent Agronomic Issues. *Journal of Hazardous Substance Research*., 1-25. <https://doi.org/10.4148/1090-7025.1015>.
- Mahar A., Wang P., Ali A., Kumar Awasthi M., Hussain Lahori A., Wang Q., Li R. & Zhang Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Elsevier*, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>.
- McIntyre, T. . (2003). Phytoremediation of Heavy Metals from Soils. In: Tsao, D.T. (eds) *Phytoremediation. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, vol 78. En P. T. P.K., *Chapter 18. Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils* (págs. 417-418). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Naidu, R., Channey, R., McConnell, S., Johnston, N., Semple, K.T., McGrath, S., Dries, V., Nathanail, P., Harmsen, J., Pruszinski, A., MacMillan, J. & Palanisami, T. 2015. Towards bioavailability-based soil criteria: past, present and future perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(12): 8779–8785. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1617-x>
- Pivetz B. (2001). *Ground Water Issue*. Obtenido de EPA ORD: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa_540_s01_500.pdf
- Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., & Prieto García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29–44. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>

Singh Kanwar V., Sharma A., Lal Srivastav A. & Rani L. (2020). Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review. Springer, 44835–44860. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10713-3>.

Shah, V., & Daverey, A. (2020). Environmental Technology & Innovation Phytoremediation : A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100774. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>

Shehata S., Badawy R. & Aboulsoud Y. (2019). Phytoremediation of some heavy metals in contaminated soil. *Springer Open*, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0214-7>.

Wuana R. & Okieimen F. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *International Scholarly Research Network ISRN Ecology*, 1-21. DOI:10.5402/2011/402647.

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Maybis Eugenia López Hernández: Licenciada Química, estudiante de Maestría en Ciencias Ambientales con Mención en Gestión Ambiental del Programa de Investigación de Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA) de la UNI. Responsable de laboratorio de Fisicoquímica en el Centro de Investigación en Biotecnología de UNAN-Managua.



Osman Enrique Morales Hernández: Ingeniero Industrial y de Sistemas (UNAN-Managua); Posgrado en Gerencia de Operaciones Centrado en la Calidad (UNI); Estudiante de Maestría en Ciencias Ambientales con Mención en Gestión Ambiental del Programa de Investigación de Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA) de la UNI. Especialista Ambiental del Instituto Nicaragüense de Energía-INE.