

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Industrial



FITORREMEDIACIÓN PARA RECUPERAR SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS: DISCUSIÓN DE REVISIÓN SISTEMÁTICA

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

Paula Andrea Goicochea Trelles
Código 20152971

Asesor

Yvan Jesus Garcia Lopez

Lima – Perú

Junio de 2023



Fitorremediación para recuperar suelos contaminados por metales pesados: discusión de revisión sistemática

Phytoremediation to recover soils contaminated by heavy metals: systematic review discussion

Paula Andrea Goicochea-Trelles¹; Yvan Jesus Garcia-Lopez^{1, *}

¹ Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Lima, Av. Javier Prado Este 4600, Santiago de Surco 15023, Lima, Perú

ORCID de los autores

P. A. Goicochea-Trelles: <https://orcid.org/0000-0002-7157-383X>

Y. J. Garcia-Lopez: <https://orcid.org/0000-0001-9577-4188>

RESUMEN

La contaminación de suelos por metales es un problema ambiental y la fitorremediación ha probado ser una técnica que promete la recuperación de estos suelos. Aun así, la selección de especies para hacer usadas en la fitorremediación son clave para obtener resultados promisorios. A continuación, a través de una revisión de literatura sistematizada se analizaron 125 investigaciones publicadas entre 2016 al 2021 de las distintas especies de plantas acumuladoras para disminuir la contaminación y recuperar los suelos, de las cuales fueron seleccionadas quince. En el inicio de la investigación se menciona sobre las consecuencias que trae consigo la contaminación del suelo y presenta a la fitorremediación como una alternativa viable para reducirla. Las investigaciones analizadas fueron obtenidas de significativas fuentes documentales como artículos de revistas indizadas en las bases de datos Scopus, Intech, IOPScience y Scielo por su relevancia a nivel internacional y de alto índice de impacto. La revisión de quince artículos más relevantes entre el 2016 y 2021 prueba que este método de la fitorremediación resulta viable y efectivo en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados.

Palabras clave: Absorción; contaminación; fitorremediación; remediación.

ABSTRACT

Soil contamination by metals is an environmental problem and phytoremediation has proven to be a technique that promises the recovery of these soils. Even so, the selection of species to be used in phytoremediation is key to obtaining promising results. Next, through a systematized literature review, 125 research published between 2016 and 2021 on the different species of accumulator plants were analyzed to reduce pollution and recover soils. At the beginning of the investigation, the consequences of soil contamination are mentioned, and phytoremediation is presented as a viable alternative to reduce it. The research analyzed was obtained from significant documentary sources such as journal articles indexed in the Scopus, Intech, IOPScience and Scielo databases due to their international relevance and high impact index. The review of the fifteen most relevant articles between 2016 and 2021 proves that this method of phytoremediation is viable and effective in the recovery of soils contaminated with heavy metals.

Keywords: Absorption; contamination; /phytoremediation; remediation.

1. Introducción

Desde el inicio de la revisión de la literatura se pudo observar que, en la actualidad, se ha vuelto de gran relevancia la búsqueda de nuevas tecnologías y métodos para reducir o eliminar la contaminación ambiental. Uno de los temas de interés radica en la contaminación de los suelos, ya que resulta perjudicial no solo para el medio ambiente, si no para todas las formas de vida que habitan en él (Tian, Kuang, Wang, Zhao, & Liang, 2021).

En gran medida los contaminantes provienen de actividades humanas tales como la industria minera, la explotación petrolera, las cuales llegan a degradar los suelos dentro de un corto plazo y por otro lado de prácticas agrícolas, que tienen un tiempo más prologando (Mendoza Escalona et al., 2021). Así mismo, la contaminación de los suelos puede dañar la salud del ser humano a través de la cadena alimentaria, dañando el sistema inmunológico, sistema esquelético, entre otros (Fang, Cui, Zhang, Song, & Jiang, 2019). Es importante mencionar que la economía también se ve afectada a la hora que se degradan los suelos.

Los suelos contaminados por distintas sustancias y/o productos cada vez se expanden más en el mundo, por lo que su determinación, minimización y tratamiento para lograr la recuperación de estos, se convierte en una necesidad, aunque, hoy en día no se le dé el nivel de importancia necesario por los muchos países afectados (Fabelo Falcón, 2017).

Dentro de los principales contaminantes de los suelos se encuentran los metales pesados, a los cuales se les da prioridad ya que no se degradan con gran facilidad como otras sustancias, tienen efectos adversos sobre la calidad y rendimiento de los cultivos, y como se mencionó anteriormente afecta la salud humana (Shanshan & Yanqing, 2020). También cabe resaltar que la contaminación por los metales pesados se ha vuelto más grave, debido al progreso y desarrollo de actividades humanas como la minería, fundición de metales, industria química del carbón, entre otras (Tian, Kuang, Wang, Zhao, & Liang, 2021). A partir de lo citado, se llega a la conclusión de que es de gran importancia encontrar una disyuntiva para tratar suelos impactados por contaminación de metales pesados a través de productos amigables con el medio ambiente, con métodos económicos, que resulte eficaz y que preserve su estructura física y sus propiedades biológicas. Además, los métodos e instrumentos

ecológicos presentan grandes oportunidades en las industrias actualmente.

Por lo tanto, se busca comprender y describir la capacidad fitorremediadora de las distintas especies para mitigar la contaminación de los suelos que beneficie tanto a las industrias como a la sociedad. Así mismo, es necesario analizar su aplicación, su eficiencia para mitigar los diferentes residuos que contaminan los suelos y describir las técnicas de fitorremediación existentes.

La fitorremediación es un método de recuperación del suelo incipiente, que hace uso de plantas las cuales son capaces de absorber, transformar y acumular contaminantes, dando soluciones in situ. Se dice que es una técnica incipiente, ya que no hay gran cantidad de resultados y antecedentes. Esto se debe, que toma un largo periodo de tiempo en que crezcan las plantas y poder visualizar los resultados, además muchas veces los resultados dependen del clima (Dadea et al., 2017). Por último, la fitorremediación se considera eficiente ya que, comparado con métodos fisicoquímicos o tradicionales, es mucho más económico. Su costo aproximado es de USD 0,73/m² y trae consigo beneficios como la creación de áreas verdes en las zonas urbanas y rurales (Dadea et al., 2017). Entre los tratamientos que actualmente existen para remediar suelos se clasifican por tratamientos biológicos, térmicos, fisicoquímicos y mixtos. Aunque la mayoría se realizan en periodos cortos de tiempo, son de costos elevados como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1
Costos de remediación de suelos

Nombre	Tipo de tratamiento	Costo aproximado
Biotransformación de metales	Tratamiento biológico ^a	Entre 25-105 USD/m ² de suelo ^a
Vitrificación	Tratamiento térmico ^a	Entre 650-1092 USD/m ² de suelo ^b
Adición de enmiendas	Tratamiento fisicoquímico ^a	Aprox. 1878.52 USD/ha ^c
Estabilización fisicoquímica	Tratamiento fisicoquímico ^a	Entre 84.34- 271 USD/m ² de suelo. ^b

^a Fundación Chile (2019). ^b Comunidad de Madrid (2018). ^c Madejón (2016).

Esta revisión tiene como propósito demostrar que la fitorremediación es un método viable y efectivo para recuperar suelos contaminados con metales pesados.

2. Material y métodos

Un enfoque cualitativo es el tipo de investigación desarrollada, debido a que los resultados de la revisión sistemática son acerca de la técnica de fitorremediación, con el objetivo de recopilar información para analizar y discutir resultados frente a otros estudios similares de la forma más ordenada, precisa y analítica (Guirao & Silamani, 2015). El estudio es de tipo no experimental, abarca aspectos de la evaluación de artículos científicos, recopilando y valorando según su importancia, además de los que tienen gran impacto. Por otro lado, la recogida de información es longitudinal, porque abarca la trazabilidad de los artículos científicos sobre la fitorremediación desde 2016 y su evolución hasta el 2021. Para este caso, se puso mayor interés en analizar la viabilidad de la fitorremediación para la recuperación de suelos contaminados, las razones por las que se recomienda aplicar la fitorremediación en lugar de los métodos convencionales y las modalidades existentes de acuerdo con las características de las plantas y el suelo.

A partir de estos intereses, se plantearon las siguientes preguntas para el desarrollo del estudio:

Pregunta principal: ¿Es viable la fitorremediación para la descontaminación y recuperación de suelos contaminados por metales?

Para responder a la pregunta principal de la investigación, se formularon las siguientes subpreguntas:

Q1: ¿Por qué se recomienda aplicar la fitorremediación?

Q2: ¿Qué tipos de fitorremediación existen?

La metodología para la revisión sistemática revisa artículos científicos publicados en revistas indexadas en las bases de datos Scopus, Intech, IOPScience y Scielo, principalmente. La metodología define el tema de investigación; luego, crea criterios de para la revisión sistemática, donde se incluye búsqueda, selección y procesamiento.

Para la selección de artículos, se usaron los siguientes criterios:

- Artículos publicados entre el 2016 y 2021
- Artículos de tipo experimental
- Artículos redactados en inglés o español
- Artículos que pertenecen a revistas de Q1, Q2 o Q3
- Palabras clave (fitorremediación, suelos degradados, remediación o absorción) presentes en el título o resumen.

De un total de 125 de artículos investigados, con estos criterios, se excluyeron aquellos que no

utilizaron suelo contaminado como material de experimentación. En total se escogieron quince artículos para la elaboración del presente trabajo. Los artículos escogidos se gestionaron en la aplicación Mendeley y se organizaron en tablas dinámicas de Excel. Se clasificó de acuerdo con las plantas que estudiaron, su clasificación por tamaño, las características del suelo y las variables estudiadas. Las categorías de estudio son mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2

Categorías y Subcategorías

Categoría	Subcategoría
Producción académica e información de los investigadores	Número de artículos publicados por año
	Número de artículos por base de datos
Contexto de la investigación	Autores y co autores de cada artículo
	Objetivo de cada artículo
Características y efectividad de la fitorremediación	Contaminantes estudiados en cada artículo
	Tipo de fitorremediación aplicada
	Resultados experimentales de cada artículo
	Beneficios de la fitorremediación presentes en los artículos.

3. Resultados y discusión

En esta sección se presenta los principales hallazgos y resultados:

Producción académica e información de los investigadores

Con respecto al número de artículos publicados por año, fueron elegidos los publicados desde el año 2016 al 2020. El 66,67% se agrupa entre el 2017 y 2019 como se observa en la Figura 1.

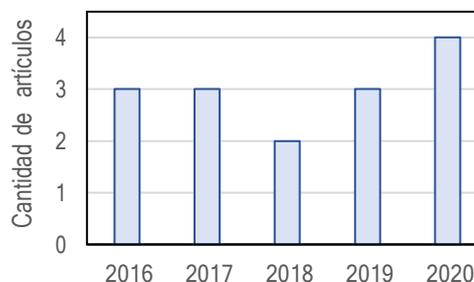


Figura 1. Cantidad de artículos seleccionados del 2016 al 2020.

La información se seleccionó a partir de las coincidencias de las palabras clave con el título o los resúmenes por base de datos (Figura 2).

El presente estudio se basa en revisar la literatura acerca de la efectividad de la fitorremediación en suelos contaminados, los quince artículos se seleccionaron por sus distintas características en cuanto a especies de plantas, contaminantes o capacidad fitorremediadora (Tabla 3).

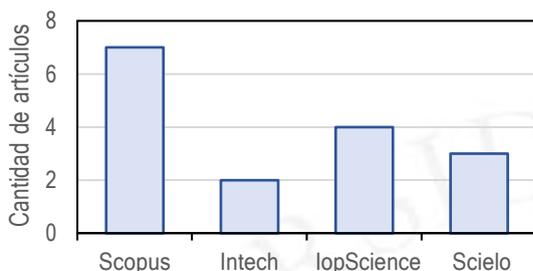


Figura 2. Cantidad de artículos seleccionados según base de datos.

En cada artículo seleccionado experimentaron con distintas plantas y utilizaron agentes para comprobar si es que éstos mejoran la eficiencia fitorremediadora de las plantas. El objetivo de cada artículo está indicado en la Tabla 4.

Cada artículo seleccionado estudió la remoción de distintos metales pesados, de los cuales los de mayor interés (para los investigadores) son el plomo, cadmio y cobre (Figura 3).

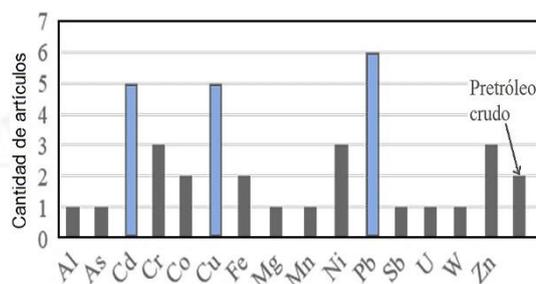


Figura 3. Contaminantes estudiados en cada artículo.

Tabla 3

Artículos seleccionados para el estudio

N° de paper	Título	Autor
P1	Heavy Metal Removal with Phytoremediation.	Adiloğlu (2018)
P2	Fitotecnología para la recuperación de agroecosistemas contaminados con metales pesados por desechos industriales	Gúzman, Oriol & Cruz (2021)
P3	Tree Species as Tools for Biomonitoring and Phytoremediation in Urban Environments: A Review with Special Regard to Heavy Metals	Dadea et al. (2017)
P4	Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (<i>Helianthus annuus</i>) plant	Alaboudi et al. (2018)
P5	Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: a review	Shaari et al. (2021)
P6	Assortment of herbaceous plants for remediation of soils contaminated with oil products and heavy metals.	Nefed'eva et al. (2019)
P7	Potential hyperaccumulator plants for sustainable environment in tropical habitats	Castañares & Bohdan (2020)
P8	Fitorremediación con Maíz (<i>Zea mays L.</i>) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados	Munive Cerrón et al. (2018)
P9	Especies forestales para la recuperación de suelos contaminados con cobre debido a actividades mineras	Pizarro et al. (2016)
P10	The pca of phytomining: principles, challenges and achievements	Heilmeier & Wiche (2020)
P11	Growing food in polluted soils: A review of risks and opportunities associated with combined phytoremediation and food production (CPFP)	Haller & Jonsson (2020)
P12	Investigation of lead and cadmium contamination in mine soil and metal accumulation in selected plants growing in a gold mining area.	Lu et al. (2019)
P13	Accumulating capacity of different varieties of rapeseed under conditions of anthropogenic pollution of soils by heavy metals.	Elizareva et al. (2019)
P14	Uptake of Cd and Pb from Aqueous Solutions Using Selected Tree Leaves Through Phytoremediation	Massadeh & Massadeh (2019)
P15	Phytoremediation and Phytomining: Status and Promise	Chaney & Baklanov (2017)

Tabla 4

Objetivos de los artículos investigados

N° de paper	Objetivo
P1	Evaluar los métodos de fitorremediación Relacionar la efectividad fitorremediadora de la canola junto con el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA).
P2	Analizar como especies rurales mitigan el suelo contaminando por diferentes metales, que fueron productos de los desechos de la empresa Cerámica Blanca.
P3	Evaluar el papel potencial de nueve especies de árboles ornamentales para la bioindicación y la fitorremediación.
P4	Determinar la capacidad de <i>Helianthus annuus</i> para remediar metales (Plomo y Cadmio) en suelos contaminados y sus efectos sobre la biomasa total del girasol.
P5	Mostrar los síntomas que presentan las plantas al verse afectadas por la toxicidad del Cadmio y las técnicas que sirven para la biorremediación del Cadmio.
P6	Evaluar que especie de planta posee la capacidad fitorremediadora para un suelo contaminado por cationes de metales pesados, productos petrolíferos y alto contenido de cloruro y sulfatos.
P7	Identificar las plantas que son hiperacumuladoras y analizar las acumulaciones de contaminantes en el suelo y las plantas.
P8	Analizar el maíz como planta fitorremediadora, para reducir la contaminación de metales pesados en el suelo.
P9	Determinar y comparar la capacidad de fitorremediación de especies vegetales nativas y exóticas en áreas contaminadas por la actividad minera en la Región de Coquimbo
P10	Describir los principios, avances, desafíos y logros obtenidos de la fitominería.
P11	Proporcionar una comprensión general de las oportunidades y los riesgos para la remediación sostenible de suelos agrícolas mediante la fitorremediación y cómo estos afectan la producción de alimentos.
P12	Evaluar el impacto del plomo y cadmio en los suelos cercanos a la minera, y ver la eficiencia de las 12 plantas típicas de la zona ante los suelos contaminados.
P13	Se evalúa como distintas variedades de la <i>Brassica Napus</i> , se comportan frente a suelos contaminados con altos contenidos de tóxicos.
P14	Demostrar que las cinco especies de plantas seleccionadas tienen la capacidad fitorremediadora para lograr reducir la contaminación de plomo y cadmio.
P15	Se busca explicar que es la fitorremediación, sobre las hiperacumuladoras y sobre que uso se le pueden dar a las plantas que fueron aplicadas para remover contaminantes.

Características y efectividad de la fitorremediación

Los resultados experimentales de cada artículo se indican en los siguientes párrafos, cada artículo presenta sus propias conclusiones y en la mayoría destacan a la fitorremediación como una tecnología viable para la remediación de suelos, además se indica en la mayoría de los casos, el tipo de fitorremediación que aplicaron o el que mejor se ajustaba a las necesidades de la experimentación.

En el artículo de Adiloğlu (2017) se estudió la fitoextracción de metales pesados con canola, se aplicaron dosis de EDTA para evaluar si es que este aumenta la cantidad de contaminantes extraídos. Como conclusión, la cantidad de metales pesados eliminados del suelo por la planta de canola aumenta cuando se agregan mayores cantidades de EDTA.

Gúzman, Oriol & Cruz (2021) indican a través de su investigación que los suelos contaminados por metales pesados traen consigo diversos efectos negativos, debido a la falta de buenas prácticas en las industrias, como es en este caso la Empresa Cerámica Blanca que contamina los suelos de los alrededores. Para ello, buscaron aplicar especies ruderales que poseen una alta capacidad de desarrollarse bajo estas condiciones. Además, se evaluaron los suelos en un inicio para analizar su grado de contaminación. Finalmente las 79 especies en estudio, se clasificaron en metal-tolerantes, acumuladoras e hiperacumuladoras.

En el estudio de Dadea et al. (2017) se estudiaron nueve especies de árboles ornamentales que se plantan comúnmente en las calles de Europa Central. El enverdecimiento urbano es una solución que se propone en este estudio ya que

trae consigo beneficios como la mejora del microclima, mitigación de la escorrentía, secuestro de carbono y la purificación del aire a través de fijación de contaminantes en hojas, tallos y raíces. En este caso, los árboles pueden reducir los contaminantes del aire tanto directamente en la absorción de compuestos gaseosos a través de hojas como indirectamente al disminuir la temperatura del aire y reducir la actividad de las reacciones químicas. De acuerdo a la experimentación, los resultados mostraron que todas las especies de árboles seleccionadas se caracterizan por rasgos de tolerancia prometedoros y muestran una alta resistencia que los hace adecuados para una amplia gama de entornos urbanos. Los árboles son considerados eficientes en la eliminación de contaminantes gracias a su sistema de raíces, su gran área foliar y la alta transpiración que poseen; por lo que gracias a estos en que los árboles tienen el potencial de mejorar la remediación de terrenos abandonados, vertederos y otros sitios contaminados al absorber, transformar y acumular contaminantes.

En el trabajo de Alaboudi et al. (2018), se realizó un experimento en macetas contaminadas con Pb^{2+} y Cd^{2+} para evaluar la eficacia del girasol en la eliminación de metales pesados. Por otro lado, evaluaciones resultantes en suelo muestran en la medida que aumenta la concentración de metales pesados, las plantas en crecimiento disminuyen de forma gradual su peso fresco y seco. Como conclusión importante es que el girasol tiene la capacidad de acumular Pb^{2+} y Cd^{2+} en sus brotes y raíces.

En la investigación de Shaari et al. (2021), se evaluó como las plantas son afectadas al absorber el cadmio, ya sea con retrasos en su crecimiento, necrosis, marchitamiento, reducción de la biomasa, entre otros. También, se observó que la biodisponibilidad del cadmio en el suelo se encuentra influenciado por el nivel de pH del suelo y contenido de la materia orgánica, a menor pH y bajo contenido de materia orgánica, mejor absorción por parte de las plantas. Por otro lado, se revisó las diferentes técnicas de la fitorremediación como la fitoextracción, fitoestabilización, rizofiltración y otras técnicas, demostrando que en sus distintas aplicaciones resulta efectiva.

El estudio de Nefed'eva et al. (2019), se lleva a cabo sobre muestras de suelo contaminado por productos petrolíferos y metales pesados. Además, el suelo en estudio posee un alto contenido de cloruro y sulfatos. Al evaluar el

suelo, se llega a la conclusión de que deben buscar plantas de la zona, resistente a los contaminantes y tolerantes a la sal. Por ello seleccionaron a partir de experiencia práctica e investigaciones científicas las siguientes especies: *Medicago x varia Martyn*, *Agropyron tenerum Vasey*, *Festuca pratensis*, *Dactylis glomerata* y *Phleum pratense*. Se recomienda combinar estas especies para un mejor rendimiento, ya que de esta forma es más resistente ante suelos con altos contenidos de sales, petrolíferos y metales pesados.

Según Castañares & Bohdan (2020) en su estudio se buscó identificar las plantas hiperacumuladoras, las cuales son las que acumulan contaminantes sin presentar estrés fisiológico. La investigación se realizó en el laboratorio, tomando muestras tanto del suelo como de plantas. Se analizó el pH del suelo para analizar su alcalinidad y acidez, además se evaluó la concentración de metales pesados con plasma de acoplamiento inductivo. Las especies de plantas mostraron capacidad fitorremediadora para distintos elementos, por ejemplo, *M. speciosa Korth* logró acumular mayor cantidad de Mn^{2+} , la *C. sumatranum* (Jack) Blume acumuló de forma significativamente el Cd^{2+} . Todas las plantas seleccionadas presentaron capacidad fitorremediadora.

En el trabajo de Munive Cerrón et al. (2018) el suelo que se usó de muestra fue del Valle del Mantaro, el cual presentaba los metales Pb^{2+} y Cd^{2+} que sobrepasaban los niveles permitidos por el ECA. Se realizaron los cálculos de la bioconcentración y la translocación factores que permiten evaluar la capacidad fitoextractora del maíz. Con ello se pudo concluir que el maíz si es potencialmente aplicable para la recuperación de suelos, pero resulta mucho más efectivo con el vermicompost de Stevia.

En la investigación de Pizarro et al. (2016), buscan determinar en especies arbustivas nativas y exóticas su capacidad fitorremediadora en áreas dañadas por la minería. Se observó la concentración del Cu^{2+} por medio de espectrometría en los dos tratamientos: A y B. Esto fue realizado para demostrar que aun así muchas de estas especies se encuentren frente a niveles altos de toxicidad, son capaces de sobrevivir y desarrollarse. Por otro lado, se hizo un análisis estadístico para seleccionar las mejores especies para la fitorremediación y se evaluó su biomasa. Se llegó a la conclusión que *A. saligna* posee mayor capacidad fitorremediadora.

El estudio de Elizareva et al. (2019), se tomó tres muestras de variedades de suelo para su evaluación y las plantas elegidas para la fitorremediación fueron tres variedades de *Brassica Napus*. Se encontraron altas concentraciones de metales pesados en el suelo, tales como Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , etc. Las variedades de la *Brassica Napus* poseen la capacidad fitorremediadora, pero se aumentaron sus niveles de azúcares en la planta. Finalmente, se pudo ver que a niveles bajos de concentraciones se acumula en la parte superior de la planta y a niveles altos permanece en la raíz.

La investigación de Massadeh & Massadeh (2019) describe que en suelos contaminados con cadmio y plomo la fitorremediación es una alternativa de uso. Se seleccionaron cinco plantas, la *Citrus limon*.

(*Rutaceae*), *Ceratonia siliqua L.*, *Olea europaea* (*Oleaceae*), *Washingtonia filifera* y *Myoporum* (*Myoporaceae*), demostrando todas ser eficientes para la remoción de metales. No obstante, dentro de esta investigación se utilizó carbón activado como muestra de control para comparar resultados. Como se pudo observar, la especie con mejor potencial fue la *Olea europaea*.

En la investigación de Chaney & Baklanov (2017) se muestra que la fitorremediación es usada en suelos contaminados por diferentes sustratos y las plantas se pueden usar posteriormente para elaborar alimento de ganado. Esto se realizaría secando las plantas, moliéndolas y generando biomasa a partir de ellas.

En el trabajo de Heilmeyer & Wiche (2020) se define a la fitominería como una tecnología basada en plantas que utiliza su capacidad y microorganismos asociados para acumular elementos comercialmente valiosos en su biomasa. Es una alternativa para obtener elementos comercialmente valiosos cuando la minería convencional no es económicamente viable, por ejemplo, debido a bajas concentraciones de metales en cuerpos minerales. Luego de cosechar las plantas, la biomasa puede ser utilizada con fines energéticos, ya sea quemando la fitomasa o generando biogás mediante fermentación microbiana. Ambas tecnologías se pueden utilizar para digerir procedimientos que preparan el material vegetal para la extracción de los elementos valiosos. Los residuos de la producción de biogás se pueden utilizar como fertilizante, cerrando así el ciclo de los materiales.

El artículo de Haller & Jonsson (2020) tiene como objetivo proporcionar una comprensión general de las oportunidades y los riesgos para la remedia-

ción sostenible de suelos agrícolas mediante la fitorremediación y cómo estos afectan la producción de alimentos. La necesidad de soluciones de remediación para suelos contaminados es cada vez más urgente ya que muchos agricultores en la actualidad operan en tierras contaminadas y la escasez de recursos del suelo a medida que la población humana aumenta continuamente obligará inevitablemente a más agricultores a cultivar en áreas contaminadas.

Según Lu et al. (2019) se tomó como especie experimental para la acumulación de metales pesados como Pb y Cd especies típicas de la zona como *Espadaña*, *Ajenjo capilar*, *Heteropappus altaicus* y *stipa* de una zona minera abandonada China para proporcionar evidencia científica para aplicar la tecnología de fitorremediación en relaves mineros. Para evaluar el nivel de contaminación del suelo se usó la fórmula de índice geoacumulativo, en este caso el que estaba ubicado a 10 m del relave tenía concentraciones moderadamente altas. El trabajo concluyó que, entre las cuatro plantas probadas, *Heteropappus altaicus*, mostró una fuerte capacidad de transferencia de Cd y Pb y puede usarse como una planta de fitorremediación, además que el suelo contaminado se restaura a un nivel de contaminación seguro en al menos cinco años.

A partir de los datos recopilados se planteó la siguiente pregunta principal: ¿Es viable para la descontaminación y recuperación de suelos contaminados la fitorremediación?

Subpreguntas:

Q1: ¿Por qué se recomienda aplicar la fitorremediación?

La fitorremediación es una tecnología que aprovecha la capacidad de las plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo. Su principal acción es la eliminación de metales tóxicos y contaminantes orgánicos (en suelo, aire, agua y sedimentos) que afectan a los seres vivos. Varias investigaciones en las plantas han sido necesarias, sobre procesos que determinan la disponibilidad de los contaminantes, su absorción, traslocación, quelación, degradación y volatilización (Adiloğlu, 2017).

Se ha demostrado que su aplicación es una alternativa eficaz, fácil de implementar, amigable con el medio ambiente y de bajo costo, que no necesita de equipos especiales durante la aplicación y proporciona un terreno reutilizable. A diferencia de otros métodos, como los físicos, químicos, tiene grandes ventajas. Esta técnica

mitiga no solo metales del suelo, sino también del aire o agua (Yang, You, & Zheng, 2019).

En base a las definiciones anteriores, se puede observar que es recomendable aplicar la fitorremediación, ya que tiene como aplicación absorber, reducir o eliminar los contaminantes que se encuentren en el suelo, para así ayudar a que los suelos se encuentren más sanos y no afecte a todos los que se encuentran en su alrededor. Además, favorece a la cadena alimentaria, a que no afecte la salud de las personas, que los suelos no se pierdan de forma irreversible y a la vida que habita en él. Esto es de suma importancia, ya que los suelos son un recurso limitado.

Q2: ¿Qué tipos de fitorremediación existen?

Siendo la fitorremediación una tecnología pasiva para la recuperación de suelos, existen diferentes modalidades que dependen de la naturaleza química, propiedades de los contaminantes y las características de la planta.

Fitoextracción (Asimilación vegetal)

Es un método que se utiliza principalmente para metales y metaloides, pero las plantas también pueden extraer contaminantes orgánicos. Las plantas apropiadas para la fitoextracción deben tener una alta producción de biomasa, tasas elevadas de absorción del compuesto objetivo y fáciles de cultivar. Idealmente todos estos rasgos deberían estar presentes en las mismas plantas, pero a menudo los fitoextractores se dividen en dos grupos funcionales: hiperacumuladores de metales y productores de biomasa (Haller & Jonsson, 2020). Según Favas et al. (2014), en una representación del proceso de fitoextracción de metales del suelo, este inicia con la absorción de los metales biodisponibles, luego hay una transferencia de raíces a brotes (tallos, hojas, frutos), para que por último se cosechen. La biomasa cosechada puede procesarse para la extracción y recuperación de metales (fitominería). El valor comercial de metales como acero inoxidable, latón o cobre puede favorecer el proceso de fitorremediación. Alternativamente, se pueden utilizar procesos térmicos, físicos, químicos o microbiológicos para transformar la relación volumen / peso de la biomasa. En el caso de la incineración de plantas, la energía producida

representa una oportunidad económica y la ceniza puede procesarse posteriormente para la extracción de metales. Sin embargo, este proceso debe ser muy cuidadoso, dados los posibles elementos químicos acumulados, para evitar la dispersión de contaminantes. Según Adiloğlu (2017) las plantas acumulan 100 veces más contaminantes que en otros métodos, que serán explicados más adelante. Para que esta técnica sea eficiente, se escogen las plantas que crecen en el ecosistema del área escogida, de preferencia, no estacionales ya que se cosecharían muy tarde.

Fitodegradación (Degradación vegetal)

Es el tipo de técnica de fitorremediación en el que los contaminantes orgánicos son degradados por los compuestos que producen las plantas a través de procesos metabólicos. Puede ser aplicado tanto en suelo, como en arcilla, sedimentos o aguas subterráneas. Por un lado, la mayor ventaja que tiene es que la reducción y degradación de los contaminantes ocurren dentro de la planta como un proceso fisiológico y no dependen de microorganismos. Por otro lado, el lado negativo es que se las enzimas vegetales pueden degradar sustancias peligrosas en sus procesos intermedios y finales, lo que dificulta la detección de estas. La eficiencia de la fitodegradación depende de la cantidad de tiempo que el contaminante está presente en el suelo, además de la forma química y física de la tierra (Adiloğlu, 2017).

Fitoestabilización (Estabilización de raíces)

Técnica que consiste en la inmovilización y biodisponibilidad de los contaminantes es decir la acumulación es la planta alrededor de sus raíces. Las raíces además de ser el anclaje de la planta en el suelo, las raíces secundarias tienen la capacidad de producir compuestos químicos que pueden absorber y/o formar complejos químicos con los contaminantes, donde se inmovilizan en la interfase suelo-raíces. Las plantas consideradas fitoestabilizadoras son capaces de tolerar altos niveles de sustancias tóxicas e inmovilizarlas.

Fitovolatilización (Evaporación vegetal)

Técnica que consiste en la transformación o liberación de los compuestos tóxicos excesivos (contenidos de Hg^{2+}) por transpiración, evaporación o volatilización al aire, es decir son liberados en forma gaseosa. Solo algunas plantas tienen la capacidad de volatizar ciertos contaminantes, como mercurio y selenio. Por ejemplo, las plantas, en asociación con los microorganismos, puede llegar a convertir el selenio en seleniuro de dimetilo, la cual es una forma menos tóxica y volátil del selenio.

Rizodegradación (Descomposición de contaminantes que rodean las raíces)

La rizodegradación revierte o detiene el daño que generan los contaminantes. La proliferación de microorganismos degradantes de la rizosfera que utilizan exudados y metabolitos de las plantas como fuentes de carbono y energía es debido al crecimiento de las raíces. Las sustancias que han sido naturalmente excretadas llegan a suministrar nutrientes para los microorganismos, lo que ayuda a mejorar su actividad biológica. Además, las plantas pueden exudar enzimas biodegradables por sí mismas. Una característica peculiar, es la mineralización completa de sus contaminantes orgánicos (Umukoro, 2020).

Rizofiltración (Uso de raíces para la filtración)

En esta técnica los contaminantes se adhieren a las raíces o son absorbidos por las mismas de acuerdo con procesos bióticos y abióticos. Básicamente, lo que se hace es hacer crecer, en cultivos hidropónicos, raíces de plantas con elevada tasa de crecimiento y área superficial con el objetivo de precipitar, absorber y concentrar contaminantes. Lo más importante es mantener la inmovilización de los contaminantes dentro o sobre las plantas, luego son extraídos por distintos medios. Generalmente es utilizado en cuencas, tanques y estanques (Favas et al., 2014).

A través de la revisión de la literatura se busca no solo comprender, si no analizar si resulta efectiva y óptima la aplicación de la fitorremediación en los suelos contaminados,

que otros métodos físicos y químicos. Esto se debe a que la fitorremediación, tiene varias características positivas como que resulta más económica, no daña al medio ambiente, es eficiente según se pudo comprobar en otras investigaciones y su aplicación resulta más sencilla para recuperar los suelos contaminados.

Considerando que el estudio se enfoca en la fitorremediación haciendo uso plantas se debe tener en cuenta que las especies que deben ser seleccionadas para la fitorremediación deben contar con características fisiológicas, morfológicas y biológicas tales como son: su gran resistencia, su rápido crecimiento, adaptación climática y alta producción de biomasa. Esto se debe a que deben resistir estar expuestas ante altos niveles de contaminación sin sufrir una gran alteración en su estructura. Por ello, en algunos artículos previamente las especies son evaluadas si es que poseen estas características, para luego ser estudiadas en los laboratorios y hacer los análisis respectivos para ver si posee o no la capacidad fitorremediadoras.

De la revisión de la literatura se pudo observar que diversas especies, que poseen las características anteriormente mencionadas, son fitorremediadoras. Siendo clasificadas según su potencial como hiperacumuladoras o tolerantes. Para ello fueron evaluados diversos factores: crecimiento, biomasa, factor de translocación, factor de bioconcentración, entre otros. Esto se realiza, ya que se busca tener una respuesta más precisa sobre las especies que evalúan.

Al no ser todas las especies hiperacumuladoras, se pudo ver que muchas de ellas requieren de un agente ayudante, el cual sirve para acelerar el proceso, acumular mayor cantidad de contaminantes y aportarles nutrientes que pueden ir perdiendo. Por ello, en caso fuera necesario se puede aplicar a las especies que lo requieran, algún sustrato que le aporte mayor eficiencia.

Otro factor importante que se pudo observar a partir de la revisión de la literatura fue que la mayor parte de plantas seleccionadas eran locales, es decir de la zona donde los suelos habían sido contaminados. Esto se debe, a que es mucho más sencillo conseguir las plantas de la localidad y que ya están adaptadas al clima, suelo, humedad y otros factores fundamentales.

En los artículos leídos, se destaca entre las especies observadas el uso de los Girasol (*Helianthus annuus*) para la descontaminación de suelos, de clasificación herbácea. Son especies

de plantas que se adaptan en distintos tipos de suelo, sean franco-arenoso, franco-aluviales, etc. Además, poseen la capacidad de crecer en suelos contaminados sin verse afectadas de manera significativa, por lo que demuestra poseer mecanismos fisiológicos de resistencia y tolerancia para sobrevivir en sustratos con altos niveles de metales.

Las plantas que fueron utilizadas para remediar suelos contaminados, absorbiendo metales pesados u otros contaminantes y posteriormente reutilizarlas para generar energía. Se les puede aplicar métodos tales como la combustión, carbonización o incineración para la obtención de energía aprovechable.

Por último, el uso de plantas para remediar los suelos contaminados por las actividades humanas, tales como minería, agricultura y otros, resulta ser exitoso en la mayoría de los casos. Las especies ayudan al suelo a restablecer sus principales funciones que están perdiendo, las biológicas, físicas y químicas. Por ello, se puede decir que es una tecnología que resulta prometedora para la rehabilitación de suelos contaminados ya que, a diferencia de otros métodos, este no altera las propiedades ni microflora del suelo.

4. Conclusiones

A partir de la revisión sistemática, se puede identificar que la fitorremediación ha sido un tema de investigación relevante durante los últimos cinco (5) años. Su importancia es no solo un método amigable y económico con el medio ambiente, sino de manera fundamental, y esto la ha convertido en un tema de numerosas investigaciones en el ámbito económico, social y ambiental que además resulta eficiente su aplicación. Algunas especies, son mucho más eficientes que otras, al poder crecer en altas concentraciones de contaminantes. A estas plantas se le conoce como hiperacumuladoras.

Existen técnicas de fitorremediación más eficientes que otras, se debe escoger la técnica de acuerdo con el suelo en el que se va a aplicar. En este caso, la investigación se centró en la remediación de tierras contaminadas por lo que las mejores técnicas aplicar son la fitoextracción y la fitoestabilización. Ambas han demostrado ser eficientes en la retención de contaminantes.

Las plantas autóctonas, endémicas y los metalofitos han demostrado ser eficientes para remediación de suelos. Esto se debe a sus características morfológicas, fisiológicas y mecanismos de tolerancia a metales pesados que

han desarrollado, por lo que se recomienda su estudio para futuras investigaciones de tipo experimental.

Después de la revisión sistemática de artículos analizados, se concluye que el impacto ambiental por suelos contaminados por metales es un tema de mucho interés en la comunidad científica, cada vez más existen múltiples tecnologías que permiten el proceso de remediación de suelos. Por otro lado, la revisión sistemática, ayuda a encontrar mucha información de procesos de remediación de suelos y que son eficaces para reducir la contaminación por metales, se requiere realizar más experimentos, e involucrar a las universidades e instituciones privadas, para brindar soluciones en los lugares donde se presentan problemas de contaminación de suelos por metales.

Agradecimientos

Agradecimiento a la carrera de ingeniería industrial de la Universidad de Lima por la formación académica de calidad en sus aulas y desarrollo en la investigación.

Referencias bibliográficas

- Adiloğlu, S. (2018). Heavy Metal Removal with Phytoremediation. En N. Shiomi (Ed.) *Advances in Bioremediation and Phytoremediation*. IntechOpen.
- Alaboudi, K., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(1), 123-127.
- Avila González, D. A. (2017). Fitoextracción de suelos contaminados por elementos potencialmente tóxicos en la región de Atlixco, Puebla. Tesis de maestría. *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*.
- Castañares, E., & Bohdan, L. (2020). Potential hyperaccumulator plants for sustainable environment in tropical habitats. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 528, 012045.
- Chaney, R. L., & Baklanov, I. A. (2017). Phytoremediation and Phytomining [Fitorremediación y Fitominería]. En A. Cuypers & J. Vangronsveld (Eds.), *Phytoremediation*, 83(1), 189-221.
- Comunidad de Madrid. (2018). Tecnologías de confinamiento. Capítulo 8. *Residuos de construcción*. 4 p.
- Dadea, C., Russo, A., Tagliavini, M., Mimmo, T., & Zerbe, S. (2017). Tree Species as Tools for Biomonitoring and Phytoremediation in Urban Environments: A Review with Special Regard to Heavy Metals. *Arboriculture & Urban Forestry*, 43(4), 155-167.
- Elizareva, E., Yanbaev, Y., Redkina, N., Kudashkina, N., Elizaryev, A., & Khamidullin, I. (2019). Accumulating capacity of different varieties of rapeseed under conditions of anthropogenic pollution of soils by heavy metals. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 403, 012182
- Fang, F., Cui, S., Zhang, Q. K., Song, J. H., & Jiang, C. J. (2019). Research on Leaching Rehabilitation of Heavy metal Contaminated Soil. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 358, 022037.
- Fundación Chile. (2019). *Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados*. Fundación Chile. 116 p.
- Gonzales Chavez, M., Carrillo Gonzales, R., & Sanchez Lopez, A. (2017). Definiciones y problemática en la investigación científica en aspectos de fitorremediación de suelos. *Agroproductividad*, 10(4), 3-7.
- Guzmán, R., Oriol, P., & Cruz, O. (2021). Fitotecnología para la recuperación de agroecosistemas contaminados con metales pesados por desechos industriales. *Centro Agrícola*, 48(3), 43-52.

- Haller, H., & Jonsson, A. (2020). Growing food in polluted soils: A review of risks and opportunities associated with combined phytoremediation and food production (CPFP). *Chemosphere*, 254(1), 126826.
- Heilmeyer, H., & Wiche, O. (2020). The PCA of phytomining: Principles, challenges and achievements. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 15(1), 37-42.
- Lu, N., Li, G., Han, J. C., Wang, H. Y., Yang, W., & Sun, Y. Y. (2019). Investigation of lead and cadmium contamination in mine soil and metal accumulation in selected plants growing in a gold mining area. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5), 10587-10597.
- Madejón, P. (2016). *Adición de enmiendas a suelos contaminados*. Sevilla: CSIC - Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS). España. 6 p.
- Massadeh, A. M., & Massadeh, H. A. (2019). Uptake of Cd and Pb from Aqueous Solutions Using Selected Tree Leaves Through Phytoremediation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230, 216.
- Mendoza Escalona, B., Torres Rodríguez, D., Marcó, L. M., Carlos, G., Estanga Barrios, M., & Garcia Orellana, Y. (2021). Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *Tecnológicas*, 24(51), e1738.
- Munive Cerrón, R., Loli Figueroa, O., Azabache Leyton, A., & Gamarra Sánchez, G. (2018). Fitorremediación con Maíz (*Zea mays L.*) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551-560.
- Nefed'eva, E. E., Seviukova, G. A., Zheltobryukhova, V. F., Gracheva, N. V., & Abdulabbas, A. Y. (2019). Assortment of herbaceous plants for remediation of soils contaminated with oil products and heavy metals. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 421, 062008.
- Pizarro, R. P., Flores, J., Tapia, J., Valdés-Pineda, R., González, D., Morales, C., . . . Balocchi, F. (2016). Forest species in the recovery of soils contaminated with copper due to mining activities. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(1), 29-43.
- Shanshan, J., & Yanqing, Z. (2020). Ecological compensation method for soil polluted by heavy metals based on internet of things. *Earth Sci. Res. J.*, 24(2), 153-161.
- Shaari, N., Tajudin, M., Khandaker, M., Majrashi, A., Alenazi, M. M., Abdullahi, U., & Mohd, K. (2021). Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: A review. *Braz J Biol.*, 7(84), e252143
- Tian, R., Kuang, Y., Wang, Z., Zhao, P., & Liang, P. (2021). Research on remediation technology of heavy metal contaminated soil. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 859, 012075.
- Umukoro, A. G. (2020). Rhizodegradation as a bioremediation technique: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) decontamination reviews. *Centre For Oilfield Chemicals Research*. 37 p.
- Yang, J., You, S., & Zheng, J. (2019). Metals, review in strengthening technology for phytoremediation of soil contaminated by heavy. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 242, 052003.

Paper

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1%

2

ri.uaemex.mx

Fuente de Internet

<1%

3

Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD

Trabajo del estudiante

<1%

4

asesoresvirtualesalala.revistaespacios.com

Fuente de Internet

<1%

5

Submitted to Universidad Continental

Trabajo del estudiante

<1%

6

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

7

repositorio.lamolina.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

8

Submitted to Universidad de Cundinamarca

Trabajo del estudiante

<1%

9

docplayer.es

Fuente de Internet