

# **Procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio: Revisión de Literatura**

**Nayesli Leticia Méndez Gómez**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano  
Honduras**

Noviembre, 2020

ZAMORANO  
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

# **Procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio: Revisión de Literatura**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el  
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Nayesli Leticia Méndez Gómez**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2020

## Procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio: Revisión de Literatura

Nayesli Leticia Méndez Gómez

**Resumen.** Los metales pesados son elementos químicos que, mediante procesos antrópicos o geogénicos, se convierten en los contaminantes más comunes en suelos y aguas. Por lo tanto, la fitoextracción y fitoestabilización son los procesos que contribuyen a la remediación de suelos contaminados por metales pesados. El objetivo de la revisión fue evaluar el avance y tendencias de investigación en procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio y describir los mecanismos más eficientes de aplicación. Las publicaciones de fitorremediación de Cadmio (Cd), compiladas en las dos principales bases de datos a nivel mundial (Science Direct y Web of Science), muestran el continuo avance de la investigación desde el 2000 (incremento del 737%). La revisión determinó que las especies regularmente utilizadas para fitoestabilización son *Pluchea dioscoridis*, *Festuca arundinacea* y *Tradescantia fluminensis*. Estas presentan un Factor de Bioconcentración mayor a 1 ( $BCF > 1$ ) y un Factor de Translocación menor a 1 ( $TF < 1$ ). Por el contrario, las plantas más utilizadas en fitoextracción son *Ambrosia ambrosioides*, *Pennisetum setaceum* y *Tradescantia pallida* por sus TF y BCF mayores a 1. En general, las especies de las familias Asteraceae y Poaceae son más efectivas en procesos de fitorremediación y las más estudiadas. Estas familias incluyen plantas hiperacumuladoras como *Ambrosia ambrosioides* ( $BCF = 2,227.80$ ) y *Festuca arundinacea* ( $BCF = 196$ ) con su máxima acumulación en la raíz. La eficacia de la fitorremediación de Cd se puede mejorar añadiendo ácido cítrico e inoculando rizobacterias (ambas aplicadas al suelo).

**Palabras clave:** Contaminación, fitoestabilización, fitoextracción, hiperacumulación, metales pesados.

**Abstract.** Heavy metals are chemical elements that, through anthropic or geogenic processes, become the most common contaminants in soil and water. Therefore, phytoextraction and phytostabilization are the processes that contribute to the remediation of soils contaminated by heavy metals. The objective of the review was to evaluate progress, research trends in phytoremediation of cadmium-contaminated soil, and describe the most efficient enforcement mechanisms. Cadmium (Cd) phytoremediation publications, compiled in the two main databases worldwide (Science Direct and Web of Science), show the continuous advance of research since 2000 (increase of 737%). The review determined that the species regularly used for phytostabilization are *Pluchea dioscoridis*, *Festuca arundinacea*, and *Tradescantia fluminensis*. They present a Bioconcentration Factor greater than 1 ( $BCF > 1$ ) and a Translocation Factor less than 1 ( $TF < 1$ ). On the other hand, the most used plants in phytoextraction are *Ambrosia ambrosioides*, *Pennisetum setaceum*, and *Tradescantia pallida* due to having TF and BCF greater than 1. In general, species from the Asteraceae and Poaceae families are effective in phytoremediation processes and the most studied. These families include hyperaccumulating plants such as *Ambrosia ambrosioides* ( $BCF = 2,227.80$ ) and *Festuca arundinacea* ( $BCF = 196$ ) which present their maximum accumulation in the roots. Efficiency of phytoremediation of Cd can be improved by adding citric acid and inoculation with rhizobacteria (both applied to the ground).

**Key words:** Contamination, heavy metals, hyperaccumulation, phytoextraction, phytostabilization.

# ÍNDICE GENERAL

Portadilla .....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Índice General.....	iv
Índice de Cuadros y Figuras .....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>3</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>12</b>
<b>5. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>13</b>

## ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadros	Página
1. Factor de bioconcentración y translocación de cadmio en las plantas.....	6
2. Concentración de cadmio según familia y especie de plantas.....	9

Figuras	Página
1. Reporte de publicaciones en la fitorremediación de suelos contaminados con Cd en “Science Direct” y “Web of Science”.....	4
2. Agrupación de investigaciones por familias de plantas utilizadas en remediación de Cd en suelos. ....	11

# 1. INTRODUCCIÓN

Los metales pesados son los contaminantes más comunes en suelos y aguas. Su impacto está relacionado con actividades geogénicas o por descargas de residuos industriales. La concentración en cualquiera de los compartimentos ambientales depende de su movilidad y biodisponibilidad (Grifoni, Petruzzelli, Barbafieri, Rosellini y Pedron, 2017). El mayor riesgo está relacionado con su fácil movilidad en diferentes medios, así como con características fisicoquímicas de los suelos, especialmente el pH y la textura que proporcionan condiciones favorables para su dispersión. El cadmio (Cd) se encuentra en la corteza terrestre y proviene de la meteorización de la roca madre. Además, tiene la tendencia de ligarse a compuestos como el sulfuro de zinc y mantenerse en los perfiles superiores del suelo. Por esta razón, es común encontrarlo de manera natural en diferentes tipos de suelos, aunque en menor concentración en suelos formados a partir de rocas ígneas (Alloway, 1995; Fergusson y Kim, 1991; Morrow, 2001). En la industria, el Cd se utiliza en la elaboración de gran variedad de bienes de consumo y productos. Estos incluyen electrodos de batería de níquel-cadmio (Ni-Cd), pigmentos utilizados en la producción de plástico, cerámica, vidrios, estabilizadores de cloruro de polivinilo (PVC). Además, en revestimientos de acero y metales no ferrosos, células de energía solar, dispositivos portátiles electrónicos y en componentes de formulaciones de fungicidas y fertilizantes (Yazdi, Kolahi, Kazemi y Goldson, 2019). Por esta razón, su demanda es constante, a su vez los procesos geogénicos que lo disponen en la superficie de los suelos, incrementan y generan riesgos para el ambiente. El Cd es un metal pesado muy tóxico incluso en pequeñas cantidades, puede acumularse en organismos y causar peligro para el funcionamiento del ecosistema y en última instancia, en la salud humana (Londoño-Franco, Luis, Londoño-Muñoz y Muñoz-García, 2016). Debido a esto, el interés en el desarrollo de técnicas que permitan la mitigación o eliminación de los impactos ligados a su uso y la remediación de su contaminación es constante.

La eliminación o mitigación de los impactos del Cd en suelo provenientes de prácticas antrópicas requiere de diferentes técnicas. No obstante, es necesario elegir aquellas que sean económicas y eficientes en remoción y de esta manera, recuperar su actividad y funcionalidad para múltiples usos. Una de las técnicas que se practica con mayor frecuencia para la recuperación de suelos contaminados por compuestos inorgánicos es la biorremediación (Mohammadian et al., 2015). Esta tecnología se caracteriza por ser económica y con alta capacidad de remoción de metales pesados en suelos y aguas. Dentro de las estrategias de biorremediación se puede utilizar plantas, hongos y bacterias e incluso enmiendas orgánicas como el compost. En el estudio de Mishra, Pandey, Singh, Singh y Singh (2017), encontraron que realizar combinaciones o asociaciones de agentes biológicos con enmiendas orgánicas muestra una mejor extracción de los contaminantes.

Los microorganismos promueven la remediación de contaminación de variedad de metales pesados, incluido el Cd. Estos organismos hacen parte de la comunidad microbiana activa en el suelo y, por tanto, requieren nutrientes para reproducirse. Las enmiendas orgánicas proporcionan los requerimientos y soporte para el desarrollo de sus funciones metabólicas que conllevan a la remediación. Así, su función en biorremediación está determinada por el incremento de la biodisponibilidad de los contaminantes a través de los procesos metabólicos y de esta manera, aportar a la acumulación de los metales en las plantas del complejo fitorremediador de forma eficiente (Sentil y Gunasundari, 2018).

La fitorremediación tiene como objetivo la restauración de las características del suelo y agua a través de la capacidad de las plantas de contrarrestar contaminantes orgánicos e inorgánicos. Por medio de bioacumulación, translocación y degradación, las plantas mantienen su capacidad inherente de neutralizar los contaminantes, actuando como sumideros vitales de residuos biológicamente peligrosos (Schwitzguébel, 2000). Sin embargo, el desarrollo de esta técnica sobre suelos o aguas requiere de una buena selección de especies de plantas ya que las funciones ecológicas suelen ser decisivas en estos procedimientos. El uso de cada especie conduce procesos diferenciales en el destino de los metales, ya que pueden ser acumulados en raíces y tejidos aéreos o excretados por las hojas (Idaszkin, Lancelotti, Pollicelli, Marcovecchio y Bouza, 2017). De esta manera, se considera que la fitorremediación se desarrolla bajo aspectos de fitoextracción, fitoestabilización, rizofiltración, fitodegradación y fitovolatilización (Pandey y Bajpai, 2019). La fitoextracción y la fitoestabilización son las estrategias más utilizadas en ecosistemas terrestres. El primer proceso se basa en la absorción, translocación y acumulación de los metales en la parte superior de la planta (tallo, hojas y brotes). Mientras, la fitoestabilización, es usada a menudo en suelos ya que disminuye la biodisponibilidad y movilidad del contaminante (Shah y Daverey, 2020). No obstante, cualquiera de los procedimientos a utilizar parten de la selección de especies.

Los factores que influyen en la selección de las especies son la genética de la planta, el clima y la concentración de los contaminantes (Pandey y Bajpai, 2019). Estos elementos intervienen en el crecimiento de la planta, su mantenimiento y, sobre todo, en su capacidad para acumular o distribuir los metales contaminantes en su estructura (Idaszkin et al., 2017). Las plantas que realizan procesos de absorción y translocación de Cd, pueden afectar su metabolismo. El contaminante que se asimila como nutriente, disminuye a su vez la absorción de nutrientes esenciales para la producción de biomasa. Además, el proceso de translocación de Cd a la parte aérea de la planta hace que la actividad fotosintética también se reduzca (Ramírez, García, Álvarez, González y Hernández, 2019). Por ejemplo, las plantas de maíz en suelos contaminados con Cd y plomo (Pb) presentan disminución en la materia seca de hojas, tallos y raíces. También, su crecimiento es más lento, comparado con plantas sembradas en suelos donde no hay presencia de este metal. No obstante, es utilizada regularmente para fitoestabilización, ya que su Factor de Translocación (TF) es menor a uno (Munive, Loli, Azabache y Gamarra, 2018). Aunque en general, diferentes plantas cultivadas en suelos metalíferos tienen la capacidad de acumular altas concentraciones de metales pesados en sus diferentes partes sin efectos negativos sobre el crecimiento, como algunas especies de la familia Brassicaceae, Poaceae, Fabaceae o Asteraceae (Pandey y Bajpai, 2019).

En general, diferentes autores concuerdan en sus evidencias sobre la importancia de especies de las familias Poaceae y Asteraceae para desarrollar procesos de fitorremediación. Asimismo, coinciden sobre el mayor potencial de especies nativas en contraste con especies introducidas. Aspectos que en conjunto muestran la necesidad de avanzar en el conocimiento de los estudios desarrollados y las necesidades de nueva investigación. En este contexto, los objetivos de esta investigación documental fueron:

- Evaluar el avance y tendencias de la investigación en procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio.
- Describir los mecanismos más eficientes que permitan plantear alternativas de aplicación en suelos de países en vía de desarrollo.

## 2. METODOLOGÍA

### **Búsqueda de literatura**

Se desarrolló una búsqueda sistemática de artículos sobre estrategias de fitorremediación de suelos contaminados con cadmio, en las bases de datos disponibles en la Biblioteca virtual Wilson Popenoe de la Universidad Zamorano. Mediante el uso de las nueve palabras en inglés y español, y sus interacciones para lograr una captura mayor, con el uso de los conectores booleanos “OR/AND” y O/Y, se seleccionaron publicaciones en revistas científicas en el período comprendido entre 2000 y 2020. Las palabras de búsqueda fueron “Phytoremediation, bioremediation, cadmium, microorganisms, bioconcentration, soil contamination by heavy metals”. Estos términos en español fueron utilizados para la búsqueda en las bases de datos con entradas en este idioma. Las bases de datos utilizadas a través de la Biblioteca Virtual fueron SpringerLink, Jstor, CABI, AGORA, OARE y ARDI. Además, se realizó una búsqueda en bases de datos de suscripción como “Science Direct, Scopus y Web of Science”, analizando el número de publicaciones en el tema por los años de estudio.

### **Criterios de selección de artículos**

Las publicaciones seleccionadas para el estudio fueron artículos de investigación revisados por pares que se encontraran en el período comprendido entre el 2000 y 2020. El punto de partida del enfoque de análisis fue evaluar los estudios que permitieran comprender el avance y tendencias de la investigación en procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio. Así como también, sus enfoques en procesos metodológicos, su eficiencia y viabilidad de implementación. Se seleccionaron 34 documentos bajo estas características en inglés y español.

### **Construcción de base de datos**

Para la revisión y análisis de los artículos se creó una base de datos en Excel incluyendo información clave de cada estudio como: año de publicación, título, revista, objetivo, pregunta o preguntas de investigación y resumen. Además, se incluyeron aspectos como procedencia de contaminación, género y especie de las plantas fitorremediadoras y tipo de metal analizado. Estos parámetros determinaron la inclusión en la revisión y análisis. Este proceso facilitó la evaluación y construcción del documento de síntesis, así como su discusión mediante la creación de códigos de entrada para evaluar diferencias y similitudes metodológicas y resultados entre las investigaciones.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La contaminación de los suelos por Cd tiene orígenes antrópicos o geogénicos y es un fenómeno regular en diferentes lugares del mundo. Este problema que ocasiona impactos sobre los ecosistemas y la sociedad genera interés particular para el desarrollo y evaluación de herramientas que permitan su mitigación. Los resultados de la revisión determinan que los métodos de biorremediación son una alternativa con un interés creciente. En el período comprendido en la revisión (2000-2020) se encontró que la investigación en biorremediación de suelos está en permanente incremento, con un alto número de artículos científicos especialmente, en “Science Direct y Web of Science” (Figura 1). Estas son dos de los repositorios científicos más importantes a nivel mundial ya que compilan las revistas más importantes. Las investigaciones revelan que, entre las técnicas de remediación, la fitorremediación para Cd es una de las más comunes y utilizadas para mitigar los impactos de diferentes actividades agrícolas e industriales. Mediante la revisión se determinó que la fitorremediación, no solo es efectiva, sino que además es más económica en comparación con técnicas convencionales, e.g. la excavación, la instalación de barreras laterales, el lavado y la extracción de suelos, el tratamiento térmico o la electrorremediación (Meuser, 2013).

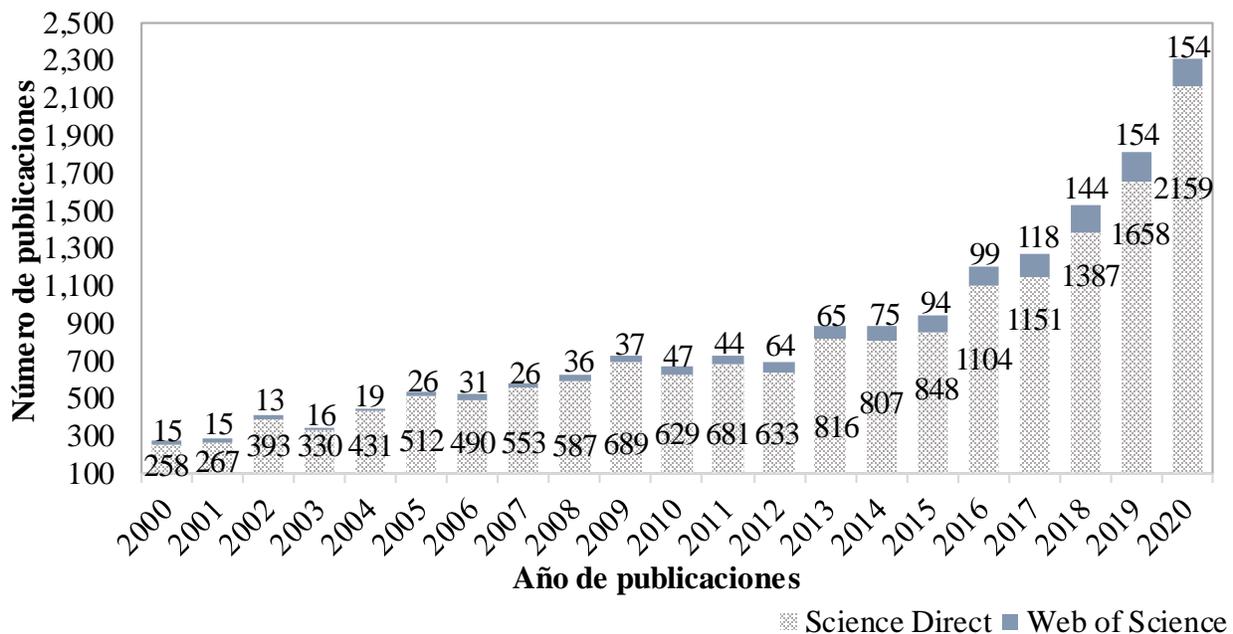


Figura 1. Reporte de publicaciones en la fitorremediación de suelos contaminados con Cd en “Science Direct y Web of Science”.

En el Cuadro 1 se presenta el resumen de los estudios relacionados con la fitorremediación, con los respectivos valores de los factores de Bioconcentración (BCF) y Translocación (TF) de las diferentes especies de plantas. Estos factores determinan su eficiencia en el proceso de remediación. El TF muestra el potencial de las plantas para transportar metales desde sus raíces

hasta la parte aérea (hojas y tallos) (Fiorentino et al., 2013). Los valores determinan que cuando una planta tiene un  $TF > 1$  se considera una especie idónea para la fitoextracción. Por el contrario, cuando este valor es  $< 1$  indica que se puede utilizar en técnicas de fitoestabilización (Pandey, Chand, Pandey, Rajkumari y Patra, 2015; Yang et al., 2014). En tanto que, el factor de bioconcentración determina la relación de la concentración de los metales pesados entre la planta y el suelo (Esringü, Turan, Güneş y Rüştü, 2014). Por lo tanto, cuando el valor del BCF es  $> 1$  indica una mayor capacidad de la planta para absorber metales pesados contenidos en el suelo (Pandey et al., 2015), pero si el valor del BCF es  $< 1$  el mecanismo de esta la planta se denomina de exclusión y son importantes para desarrollar procesos de fitoestabilización en relaves de minas (Yang et al., 2014). Por esta razón, conocer los mecanismos más eficientes de remoción del Cd en los suelos por parte de las especies vegetales, es de suma importancia ya que determina las mejores acciones de fitorremediación en las actividades productivas que generan contaminación.

La eficiencia de las plantas para desarrollar mecanismos en la fitorremediación del Cd ha sido evaluada en zonas agrícolas, industriales y urbanas. Por ejemplo, en zonas residenciales de Egipto, Eltaher, Ahmed, El-Beheiry y El-Din (2019), encontraron que la extracción de este metal se puede desarrollar de manera eficiente con la especie *Pluchea dioscoridis* de la familia Asteraceae. La acumulación de Cd en raíces correspondió a un BCF de 258.5 y presentó un TF de 0.85 (Cuadro 1). Por lo tanto, se determina que esta planta cuenta con potencial muy superior al de otras especies para técnicas de fitoestabilización de suelos urbanos contaminados con Cd procedente de la disposición de residuos de industria y de baterías con Cd. También, la especie *Ambrosia ambrosioides* de la misma familia de *P. dioscoridis*, presenta características apropiadas para la fitorremediación, un BCF y TF más alto que la especie evaluada en suelos urbanos. Ramírez et al. (2019), analizaron el comportamiento de esta planta en maceteros con sustrato compuesto de perlita y arena y concentraciones de Cd 20, 40 y 60 mg L<sup>-1</sup>. Los resultados mostraron su potencial para la fitoextracción de Cd con valores de BCF y TF (142.33 y 9.74, respectivamente). La eficiencia de especies de la familia Asteraceae ha sido reportada desde la década de los 80s (Pandey et al., 2015). Además, se considera una de las familias más adecuadas en fitoextracción. Estos procesos biológicos realizado por estas plantas, no sólo eliminan el Cd de los sitios contaminados sin ningún efecto adverso sobre las propiedades del suelo, sino que además presentan una ventaja ya que pertenecen a una familia que presenta alrededor de 40 especies originarias, la mayor parte, de Norteamérica y Sudamérica (Ramírez et al., 2019). Lo cual indica un potencial importante para su evaluación y aplicación en los países latinoamericanos.

Los mecanismos de acumulación como se mencionó con anterioridad son diferentes entre especies e incluso las que pertenecen a una misma familia y esto determina su potencial de fitorremediación. Por esta razón, es necesario comprender que las plantas que tienden a acumular altas concentraciones de metales pesados pueden utilizar este mecanismo como defensa. Esta acción les sirve como barreras de protección contra patógenos y animales herbívoros, aunque puede ocasionar daños metabólicos. Además, las altas acumulaciones se ven influenciadas por la genética de la especie y su adaptación al sitio (Pandey y Bajpai, 2019). En este contexto, Gill et al. (2013) y Wu et al. (2017), determinan que altas concentraciones de glutatión y S-transferasa en las raíces de plantas utilizadas para la fitorremediación de suelos contaminados con Cd, están asociados a procesos de desintoxicación de los suelos. Su incremento se debe a que el Cd tiene el potencial de

suprimir las actividades de las enzimas antioxidantes, principalmente glutatión reductasa (Wu et al., 2017), lo cual puede ocasionar trastornos en el desarrollo de las plantas. No obstante, lo más importante es determinar el potencial de remediación de los suelos contaminados y el efecto sobre la salud de los ecosistemas y la sociedad. La selección de las especies, además, debe estar asociada con su posterior disposición y manejo de la biomasa y si estas son transitorias o perennes.

Cuadro 1. Factor de bioconcentración y translocación de cadmio en las plantas.

<b>Especie</b>	<b>Factor de Bioconcentración</b>	<b>Factor de Translocación</b>	<b>Fuentes</b>
<i>Pennisetum setaceum</i> (raíz)	12.60	1.00	(Pajoy, 2017)
<i>Zea mays</i> L. (Compost)		0.30	(Munive et al., 2018)
<i>Zea mays</i> y <i>Oryza sativa</i>	1.10		(Liu et al., 2016)
<i>Zea mays</i>		0.10	(Ramos, Vieira, Muniz y Araújo, 2017)
<i>Arundo donax</i>	0.50	0.28	(Cristaldi et al., 2020)
<i>Arundo donax</i> micorrizada con <i>Trichoderma harzianum</i>	0.44	0.70	
<i>Festuca arundinacea</i> (raíz)	12.50		(Steliga y Kluk, 2020)
<i>Festuca arundinacea</i> (brote)	3.78	0.28	
Avena		< 1.00	(Boros-Lajszner, Wyszowska y Kucharski, 2019)
<i>Saccharum bengalense</i> Retz		1.75	(Mishra et al., 2017)
<i>Tradescantia pallida</i> (raíz)	25.50	1.00	(Pajoy, 2017)
<i>Ambrosia ambrosioides</i>	142.33	9.74	(Ramírez et al., 2019)
<i>Erigeron annuus</i> (hojas)	0.16		(Pliszko, Klimek y Kostrakiewicz-Gierałt, 2020)
<i>Pluchea dioscoridis</i>	258.50	0.85	(Eltaher et al., 2019)
<i>Hieracium pilosella</i> L.	0.35	0.76	(Stefanowicz, Stanek, Woch y Kapusta, 2016)
<i>Achillea collina</i> Becker ex Rchb.	0.15	1.03	
<i>Thlaspi arvense</i>	2.85	0.32	(Drozdova et al., 2019)
<i>Ulmus laevis</i> Pall.		0.76	(Mleczek et al., 2017)
<i>Quercus robur</i> L.	0.28		
<i>Sinapis alba</i>		<1.00	(Boros-Lajszner et al., 2019)
<i>Ziziphus lotus</i> (L.) Lam	2.18	1.48	(Midhat, Ouazzani, Hejjaj, Ouhammou y Mandi, 2019)

Especie	Factor de Bioconcentración	Factor de Translocación	Fuentes
<i>Ricinus communis</i>		0.03	(Ramos et al., 2017)
<i>Euphorbia condylocarpa</i>	0.11	3.28	(Hesami, Salimi y Ghaderian, 2018)
<i>Tradescantia fluminensis</i>	11.24	0.91	(Cay, Engin, Uyanik, Cay y Guney, 2019)
<i>Helianthus annuus</i>	2.96	0.42	(Reategui y Reátegui, 2018)
<i>Thlaspi praecox</i> Wulf. (brote)		5.60	(Vogel-Mikuš, Drobne y Regvar, 2005)
<i>Thlaspi arvense</i>	2.85	0.32	(Drozdova et al., 2019)

Las especies *Tradescantia pallida* (familia Commelinaceae) y *Pennisetum setaceum* (familia Poaceae), también cuentan con potencial de acumulación de Cd con valores de BCF en la raíz correspondientes a 25.5 y 12.6, respectivamente y un TF de 1.00 (Cuadro 1). Por esta razón las investigaciones determinan su eficiencia en técnicas de fitoextracción de Cd. Tanto *T. pallida* planta conocida comúnmente como purpurina y originaria de México, como *P. setaceum* (pasto elefante) originaria de África, presentan diferentes mecanismos para soportar la alta cantidad de cadmio que absorben. Dentro de las estrategias que presentan se encuentran la producción de etileno ante el estrés y el no transportar metal a los tejidos sensibles y de síntesis de proteína, ya que estos son los que garantizan la supervivencia de la planta (Pajoy, 2017; Steliga y Kluk, 2020). En tanto que, la especie *Tradescantia fluminensis* (variegata o amor de hombre), también de la familia Commelinaceae, presenta su mayor capacidad de almacenar Cd en las raíces y su factor de bioconcentración es 11.24 y el de translocación de 0.9. Aunque los metales pesados en general, ingresan a la planta por la raíz, algunas especies los retienen en esta estructura, mientras otras los translocan a diferentes partes.

En las raíces son retenidos por las células madre, estructuras que desarrollan y protegen los tejidos de la planta, entre ellos el tejido foliar (Cay et al., 2019). De esta manera, las células madre no permiten que la planta transporte grandes cantidades de metales a sus partes aéreas (tallos y hojas) y, por tanto, no asimilan la toxicidad del cadmio y su efecto en el desarrollo fisiológico y los procesos metabólicos es menor. Esto explica que *T. fluminensis* se considere parte de las plantas que actúan bajo mecanismos de fitoestabilización de Cd. También, la especie *Ricinus communis*, conocida como higuera o ricino y originaria de África, se considera una planta fitoestabilizadora de Cd. La higuera puede contener altas concentraciones de Cd en sus raíces, alrededor de 474 mg kg<sup>-1</sup> de masa seca. Por el contrario, su TF de 0.03 es bajo, por lo tanto, su capacidad de transportar el metal a sus partes aéreas es mínima (Ramos et al., 2017). Asimismo, los autores encontraron que la higuera puede acumular mayor cantidad de Cd en la raíz, cuando se conjuga con ácido cítrico y ácido nitrilotriacético (NTA). El efecto principal del ácido cítrico es incrementar en aproximadamente 7.8 veces la remoción de Cd en comparación con el NTA. Estas acciones de

las plantas fitoestabilizadoras están relacionadas con sus estrategias de crear mecanismos de defensas mediante la inmovilización de iones metálicos, limitando el proceso de translocación de los contaminantes.

En el Cuadro 2, se presenta un resumen de los estudios relacionados con el potencial de acumulación de metales pesados en las plantas, con los respectivos valores de la concentración de Cd según familia y especie. Dentro de esta clasificación se encuentran las plantas hiperacumuladoras, las cuales se caracterizan por extraer metales pesados a un nivel más alto que el de la contaminación del suelo, donde la concentración mínima para estas plantas debe ser de 100 µg/g de Cd. Sin embargo, esto no las excluye de presentar desventajas como reducción de biomasa y crecimiento más lento (Pandey y Bajpai, 2019). Dentro de la familia Poaceae, la especie *Zea mays* es una de las plantas utilizadas con mayor frecuencia en procesos unitarios de fitorremediación de suelos contaminados con Cd (Cuadro 2). Sin embargo, Konkolewska et al. (2020), demostraron que la co-plantación de maíz con mostaza de la India (*Brassica juncea* L. Czern), alfalfa (*Medicago sativa* L.) y la inoculación de bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR) mejoran el proceso de fitoextracción. Esto se debe a que la co-plantación y las rizobacterias aumentan la tasa de supervivencia de la planta y el rendimiento de biomasa seca. Por otro lado, *Festuca arundinacea* se determina como una planta con alto potencial de acumulación de Cd en sus raíces (196 mg kg<sup>-1</sup>), de igual forma la especie *Ambrosia ambrosioides* acumula mayor cantidad de Cd en sus raíces (2,227.80 mg kg<sup>-1</sup>), por lo cual se denominan especies hiperacumuladoras, ya que sobrepasan el valor mínimo establecido para la absorción de Cd (100 mg kg<sup>-1</sup>) y lo concentran siempre en sus raíces.

La acumulación de Cd en las raíces de las plantas está relacionada con el pH de los suelos. En pH ácido hay mayor movilidad de los metales pesados, ya que la cantidad de H<sup>+</sup> en el medio determina la biodisponibilidad del metal para ingresar a la planta (Bruemmer, Gerth y Herms, 1986). Por el contrario, en suelos con pH básico se dan procesos de liberación de ácidos de bajo peso molecular, lo cual provoca alteración del pH de áreas cercanas a los pelos radicales, incrementando a su vez la absorción de los metales pesados en las raíces (Tandy et al., 2004). Adicionalmente, la mayor cantidad de pectinas de la pared celular en las raíces de las plantas, así como la producción de carbohidratos extracelulares como mucílago y calosa, interfieren en la inmovilización del Cd y como consecuencia, el metal se inmoviliza en esta zona (Benavides, Gallego y Tomaro, 2005). Las especies *F. arundinacea* y *A. ambrosioides* obtuvieron una reducción en los valores de concentración de Cd en sus partes aéreas. Esto se debe a que las plantas restringen la translocación de metales pesados a sus hojas, brotes y tallo para evitar su toxicidad, que se puede ocasionar por el exceso de metales en el suelo (Kidd, Becerra, García y Monterroso, 2007).

La especie *Pluchea dioscoridis* (salvia de playa), también presenta características como hiperacumuladora, donde la concentración de Cd en la raíz puede alcanzar valores de 359.2 mg kg<sup>-1</sup>, en tanto que, en los brotes la concentración puede alcanzar 491.8 mg kg<sup>-1</sup> (Cuadro 2). Como se evidencia la planta acumula mayor cantidad de Cd en los brotes, lo cual está relacionado con los procesos de floración de la planta. En momentos de floración la planta traslada sus reservas subterráneas a las estructuras aéreas para el crecimiento de los brotes, ya que se encuentra en su mayor actividad de floración y fructificación, lo que a su vez incrementa las concentraciones de Cd en estos componentes (Eltaher et al., 2019).

Cuadro 2. Concentración máxima de cadmio según familia y especie de plantas.

Familia	Especie	Cadmio (mg kg <sup>-1</sup> )	Tiempo (meses)	Fuentes
Poaceae	<i>Pennisetum setaceum</i> (raíz)	9.70	12.0	(Pajoy, 2017)
	<i>Zea mays</i> L. (Vermicompost)	7.71	4.2	(Munive et al., 2018)
	<i>Zea mays</i> (tallo)	1.71	11.0	(Liu et al., 2016)
	<i>Zea mays</i> (hoja)	2.51	11.0	
	<i>Oryza sativa</i> (tallo)	2.28	11.0	
	<i>Oryza sativa</i> (hoja)	2.32	11.0	
	<i>Arundo donax</i>	12.30	7.0	(Cristaldi et al., 2020)
	<i>Arundo donax</i> micorrizada con <i>Trichoderma harzianum</i>	11.90	7.0	
	<i>Festuca arundinacea</i> (raíz)	196.00	6.0	(Steliga y Kluk, 2020)
	<i>Festuca arundinacea</i> (brote)	59.00	6.0	
Commelinaceae	<i>Tradescantia pallida</i> (raíz)	19.60	10.0	(Pajoy, 2017)
	<i>Tradescantia pallida</i> (parte aérea)	6.29	5.0	
Asteraceae	<i>Ambrosia ambrosioides</i> (raíz)	2,227.80	0.7	(Ramírez et al., 2019)
	<i>Ambrosia ambrosioides</i> (hoja)	420.10	0.7	
	<i>Ambrosia ambrosioides</i> (tallo)	243.70	0.7	
	<i>Erigeron annuus</i> (hojas y capítulos)	3.87		(Pliszko et al., 2020)
	<i>Pluchea dioscoridis</i> (raíz)	359.20	8.0	(Eltaher et al., 2019)
	<i>Pluchea dioscoridis</i> (brote)	491.80	8.0	

Cuadro 2. Concentración de cadmio según familia y especie de plantas (continuación).

Familia	Especie	Cadmio (mg kg <sup>-1</sup> )	Fuentes
Fagaceae	<i>Quercus robur</i> L. (raíz)	68.00	(Mleczek et al., 2017)
Ulmaceae	<i>Ulmus laevis</i> Pall. (tallo)	27.40	
	<i>Ulmus laevis</i> Pall. (hoja)	34.20	
Rosaceae	<i>Potentilla arenaria</i> (raíz)	52.00	(Stefanowicz et al., 2016)
Portulacaceae	<i>Portulaca oleracea</i> L. (raíz)	15.99	(Midhat et al., 2019)
Cucurbitaceae	<i>Citrullus vulgaris</i> L.	10.37	
	<i>Schrader</i> (brote)		
Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i> (raíz)	474.00	(Ramos et al., 2017)
	<i>Euphorbia condylocarpa</i> (raíz)	1.80	(Hesami et al., 2018)
	<i>Euphorbia condylocarpa</i> (brote)	5.70	
Asteraceae	<i>Crepis</i> sp. (brotes)	13.00	
	<i>Scorzonera phaeopappa</i> (Boiss.) Boiss. (raíz)	5.30	
	<i>Helianthus annuus</i> (hojas)	36.80	(Reategui y Reátegui, 2018)
	<i>Helianthus annuus</i> (tallos)	24.07	
Poaceae	<i>Bromus squarrosus</i> L. (brote)	16.20	(Hesami et al., 2018)
	<i>Cynosurus cristatus</i> (raíz)	9.90	(Quezada-Hinojosa, Föllmi, Gillet y Matera, 2015)
	<i>Cynosurus cristatus</i> (brote)	9.40	
Brassicaceae	<i>Descurainia sophia</i> (L.) <i>Webb ex Prantl</i> (brote)	24.20	(Hesami et al., 2018)
	<i>Erysimum crassicaule</i> (raíz)	3.40	
	<i>Arabidopsis thaliana</i> (hoja)	0.89	(Drozdova et al., 2019)
	<i>Thlaspi arvense</i> (raíz)	0.57	

Las diferentes familias de plantas que son utilizadas para mejorar la eficiencia de extracción del cadmio se muestran en la (Figura 2). Los resultados de la revisión determinan que la familia más utilizada en la fitorremediación es la Poaceae debido a su potencial de bioconcentración y translocación. Sin embargo, ya que estas plantas son utilizadas en dietas animales y humanas sus estudios se hacen con mayor frecuencia para conocer si presentan altas acumulaciones de Cd en las partes de consumo como pasa con el arroz (*Oryza sativa*). El ser humano consume su semilla y al acumular Cd puede ser que perjudique su salud. Por ejemplo, en el estudio de Liu et al. (2016) las especies *Oryza sativa* y *Zea mays* que tienen potencial para eliminar Cd de suelos agrícolas, encontraron que la acumulación en la parte comestible es muy una baja. En BCF en sus semillas se encuentra en un rango entre 0.04 y 0.07, lo cual determina su bajo riesgo en el consumo. En segundo lugar, se encuentra la familia Asteraceae, especies de esta familia también regularmente comestibles o que se utilizan para la elaboración de productos de consumo humano, como *Lactuca sativa* (Tapia, 2010), pueden generar riesgos en su uso y disposición. En esta revisión se evidenció que las especies con usos productivos y potencial para fitorremediación de suelos contaminados con Cd fueron *Helianthus annuus* (aceite vegetal), *Ambrosia ambrosioides* (remedios naturales) y *Erigeron annuus* (consumida por mamíferos), que mostraron que no hay riesgo ya que su acumulación se concentra en las raíces.

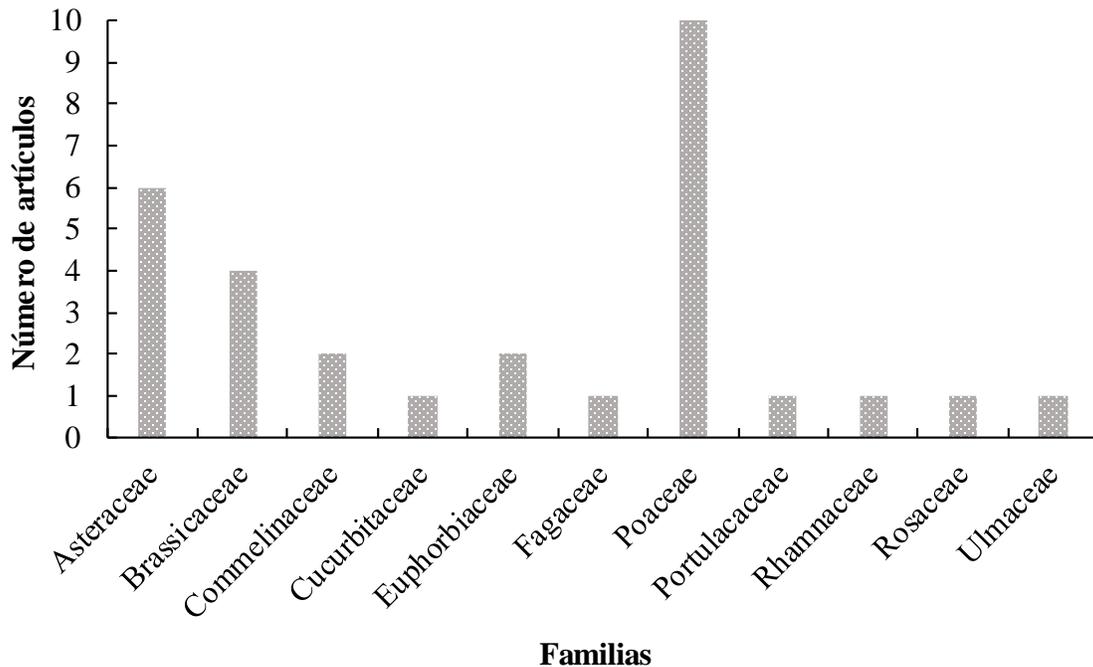


Figura 2. Agrupación de investigaciones por familias de plantas utilizadas en remediación de Cd en suelos.

## 4. CONCLUSIONES

- La fitorremediación de suelos contaminados con Cd es una técnica en crecimiento debido a su efectividad, operación simple y remediación *in situ*. Además, el avance en esta investigación contribuye a la identificación de especies nativas con potencial de fitoextracción o fitoestabilización.
- La revisión determina que la combinación de especies potenciales para fitorremediación de suelos contaminados con Cd con aditivos como ácido cítrico o la inoculación de bacterias promotoras de crecimiento mejoran la eficiencia en los sistemas de extracción de este contaminante.

## 5. LITERATURA CITADA

- Alloway, B. (1995). Procesos del suelo y el comportamiento de los metales. En *Metales pesados en suelos* (pp. 11-37). Londres: Blackie Academic and Professional.
- Benavides, M., Gallego, S. y Tomaro, M. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian journal of plant physiology*, 17(1). doi:10.1590/S1677-04202005000100003
- Boros-Lajszner, E., Wyzkowska, J. y Kucharski, J. (2019). Application of white mustard and oats in the phytostabilisation of soil contaminated with cadmium with the addition of cellulose and urea. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 931-942. doi:10.1007/s11368-019-02473-6
- Bruemmer, G., Gerth, J. y Herms, U. (1986). Heavy metal species, mobility and availability in soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 149(4), 382-398. doi:10.1002/jpln.19861490404
- Cay, S., Engin, M., Uyanik, A., Cay, C. y Guney, S. (2019). Phytoremediation of cadmium in soil and hydroponics by *Tradescantia fluminensis*. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 14(2), 269-274. doi:10.26471/cjees/2019/014/078
- Cristaldi, A., Oliveri, G., Cosentino, S., Mauromicale, G., Copat, C., Grasso, A., . . . Ferrante, M. (2020). Phytoremediation potential of *Arundo donax* (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals. *Environmental Research*, 185. doi:10.1016/j.envres.2020.109427
- Drozdova, I., Alekseeva-Popova, N., Dorofeyev, V., Bech, J., Belyaeva, A. y Roca, N. (2019). A comparative study of the accumulation of trace elements in Brassicaceae plant species with phytoremediation potential. *Applied Geochemistry*, 108. doi:10.1016/j.apgeochem.2019.104377
- Eltaher, G., Ahmed, D., El-Beheiry, M. y El-Din, A. (2019). Biomass estimation and heavy metal accumulation by *Pluchea dioscoridis* (L.) DC. in the Middle Nile Delta, (Egypt): Perspectives for phytoremediation. *South African Journal of Botany*, 153-166. doi:10.1016/j.sajb.2019.08.053
- Esringü, A., Turan, M., Güneş, A. y Rüstü, M. (2014). Roles of *Bacillus megaterium* in remediation of boron, Lead, and cadmium from contaminated soil. *Communications in soil science and plant analysis*, 45(13), 1741-1759. doi:10.1080/00103624.2013.875194
- Fergusson, J. y Kim, N. (1991). Oligoelementos en el polvo de la calle y la casa: fuentes y especiación. *Ciencia del medio ambiente total*, 100, 125-150.
- Fiorentino, N., Fagnano, M., Adamo, P., Impagliazzo, A., Mori, M., Pepe, O., . . . Zoina, A. (2013). Assisted phytoextraction of heavy metals: compost and *Trichoderma* effects on giant reed (*Arundo donax* L.) uptake and soil N-cycle microflora. *Italian Journal of Agronomy*, 8(4). doi:10.4081/ija.2013.e29
- Grifoni, M., Petruzzelli, G., Barbaferri, M., Rosellini, I. y Pedron, F. (2017). Protección de la calidad del suelo en sitios de plantas de gas manufacturadas contaminadas con metales pesados: papel de remediación biológica. En N. Anjum, S. Gill y N. Tuteja (Edits.), *Mejora de la limpieza de contaminantes ambientales* (pp. 231-260). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-55426-6\_11

- Hesami, R., Salimi, A. y Ghaderian, S. (2018). Lead, zinc, and cadmium uptake, accumulation, and phytoremediation by plants growing around Tang-e Douzan lead–zinc mine, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 8701-8714. doi:10.1007/s11356-017-1156-y
- Idaszkin, Y., Lancelotti, J., Pollicelli, M., Marcovecchio, J. y Bouza, P. (2017). Comparison of phytoremediation potential capacity of *Spartina densiflora* and *Sarcocornia perennis* for metal polluted soils. *Marine Pollution Bulletin*, 118(1-2), 297-306. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.03.007
- Kidd, P., Becerra, C., García, M. y Monterroso, C. (2007). Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum* L. *Revista científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 16(2), 26-43.
- Konkolewska, A., Piechalak, A., Ciszewska, L., Antos-Krzemińska, N., Skrzypczak, T., Hanć, A., . . . Małecka, A. (2020). Combined use of companion planting and PGPR for the assisted phytoextraction of trace metals (Zn, Pb, Cd). *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 13809-13825. doi:10.1007/s11356-020-07885-3
- Liu, Y., Liu, K., Li, Y., Yang, W., Wu, F., Zhu, P., . . . Zhang, L. (2016). Cadmium contamination of soil and crops is affected by intercropping and rotation systems in the lower reaches of the Minjiang River in south-western China. *Environmental Geochemistry and Health*, 811-820. doi:10.1007/s10653-015-9762-4
- Londoño-Franco, Luis, Londoño-Muñoz y Muñoz-García, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. doi:10.18684/BSAA(14)145-153
- Meuser, H. (2013). Introduction. In *Soil remediation and rehabilitation treatment of contaminated and disturbed land* (Vol. 23, pp. 1-3). Springer Science+Business Media Dordrecht. doi:10.1007/978-94-007-5751-6\_1
- Midhat, L., Ouazzani, N., Hejjaj, A., Ouhammou, A. y Mandi, L. (2019). Accumulation of heavy metals in metallophytes from three mining sites (Southern Centre Morocco) and evaluation of their phytoremediation potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169, 150-160. doi:10.1016/j.ecoenv.2018.11.009
- Mishra, T., Pandey, V., Singh, P., Singh, N. y Singh, N. (2017). Assessment of phytoremediation potential of native grass species growing on red mud deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 206-209. doi:10.1016/j.gexplo.2016.12.015
- Mleczek, M., Goliński, P., Krzesłowska, M., Gąsecka, M., Magdziak, Z., Rutkowski, P., . . . Niedzielski, P. (2017). Phytoextraction of potentially toxic elements by six tree species growing on hazardous mining sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 22183-22195. doi:10.1007/s11356-017-9842-3
- Mohammadian, M., Soleimani, N., Mehrasbi, M., Darabian, S., Mohammadi, J. y Ramadan, A. (2015). Highly cadmium tolerant fungi: their tolerance and removal potential. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13. doi:10.1186/s40201-015-0176-0
- Morrow, H. (2001). Cadmio y aleaciones de cadmio. En I. John Wiley & Sons, *Enciclopedia de tecnología química de Kirk-Othmer* (pp. 471-507).

- Munive, R., Loli, O., Azabache, A. y Gamarra, 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. doi:10.17268/sci.agropecu.2018.04.11
- Pajoy, H. (2017). *Potencial fitorremediador de dos especies ornamentales como alternativa de tratamiento de suelos contaminados con metales pesados* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Pandey, J., Chand, S., Pandey, S., Rajkumari y Patra, D. (2015). Palmarosa [*Cymbopogon martinii* (Roxb.) Wats.] as a putative crop for phytoremediation, in tannery sludge polluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122, 296-302. doi:10.1016/j.ecoenv.2015.08.005
- Pandey, V. y Bajpai, O. (2019). Phytoremediation: from theory toward practice. *Phytomanagement of polluted sites* (pp. 1-49). Lucknow. doi:10.1016/B978-0-12-813912-7.00001-6
- Pliszko, A., Klimek, B. y Kostrakiewicz-Gieralt, K. (2020). Effect of shoot cutting on trace metal concentration in leaves and capitula of potential phytoaccumulator, invasive *Erigeron annuus* (Asteraceae). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 668-672. doi:10.1007/s00128-020-02844-7
- Quezada-Hinojosa, R., Föllmi, K., Gillet, F. y Matera, V. (2015). Cadmium accumulation in six common plant species associated with soils containing high geogenic cadmium concentrations at Le Gurnigel, Swiss Jura Mountains. *Catena*, 124, 85-96. doi:10.1016/j.catena.2014.09.007
- Ramírez, R., García, M., Álvarez, V., González, G. y Hernández, V. (2019). Potencial fitorremediador de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*) en suelos contaminados por metales pesados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1529-1540.
- Ramos, W., Vieira, F., Muniz, P. y Araújo, C. (2017). Assessing human health risks and strategies for phytoremediation in soils contaminated with As, Cd, Pb, and Zn by slag disposal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144, 522-530. doi:10.1016/j.ecoenv.2017.06.068
- Reategui, L. y Reátegui, C. (2018). *Capacidad de absorción del Helianthus annuus en suelos agrícolas contaminados con cadmio* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Callao, Callao.
- Schwitzguébel, J. (2000). *Potential of phytoremediation, an emerging technology*. Beijing P.R. China: Ecosystem Service and Sustainable Watershed Management in North China.
- Sentil, P. y Gunasundari, E. (2018). Biorremediación de metales pesados. En S. Varjani, A. Kumar, E. Gnansounou y B. Gurunathan (Edits.), *Biorremediación: aplicaciones para la protección y gestión del medio ambiente* (pp. 165-195). Singapur: Springer. doi:10.1007/978-981-10-7485-1\_9
- Shah, V. y Daverey, A. (2020). Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 18. doi:10.1016/j.eti.2020.100774
- Stefanowicz, A., Stanek, M., Woch, M. y Kapusta, P. (2016). The accumulation of elements in plants growing spontaneously on small heaps left by the historical Zn-Pb ore mining. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 6524-6534. doi:10.1007/s11356-015-5859-7

- Steliga, T. y Kluk, D. (2020). Application of *Festuca arundinacea* in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194. doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110409
- Tandy, S., Bossart, K., Mueller, R., Ritschel, J., Hauser, L., Schulin, R. y Nowack, B. (2004). Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents. *Environmental Science & Technology*, 38(3), 937-944. doi:10.1021/es0348750
- Tapia, J. (2010). La familia Asteraceae. *Centro de Investigación Científica de Yucatán*, 2, 82-84.
- Vogel-Mikuš, K., Drobne, D. y Regvar, M. (2005). Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonisation of pennycress *Thlaspi praecox* Wulf. (Brassicaceae) from the vicinity of a lead mine and smelter in Slovenia. *Environmental Pollution*, 133(2), 233-242. doi:10.1016/j.envpol.2004.06.021
- Wu, Z., Liu, S., Zhao, J., Wang, F., Du, Y., Zou, S., . . . Huang, Y. (2017). Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress. *Environmental and Experimental Botany*, 113, 1-11. doi:10.1016/j.envexpbot.2016.09.005
- Yang, S., Liang, S., Yi, L., Xu, B., Cao, J., Guo, Y. y Zhou, Y. (2014). Heavy metal accumulation and phytostabilization potential of dominant plant species growing on manganese mine tailings. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 8, 394-404. doi:10.1007/s11783-013-0602-4
- Yazdi, M., Kolahi, M., Mohajel, E. y Goldson, A. (2019). Study of the contamination rate and change in growth features of lettuce (*Lactuca sativa* Linn.) in response to cadmium and a survey of its phytochelatin synthase gene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, 295-308. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.04.071