



**Toxicidad del Cadmio y la estrategia de biorremediación de suelos
contaminados para disminuir sus efectos**

Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca
Facultad de Ciencias de la Salud
Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico
Trabajo de grado
Bogotá, 2021



Toxicidad del Cadmio y la estrategia de biorremediación de suelos contaminados para disminuir sus efectos

Carlos Andrés Ramírez Almanza
Dayra Liliana Ramírez Moreno

Asesor interno:
Judith Elena Camacho Kurmen
Q.F. Esp. MSc. Dr. en Biociencias

Asesor externo:
Carolina Jaime Rodríguez
Microbióloga, MSc

Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca
Facultad de Ciencias de la Salud
Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico
Trabajo de grado

Bogotá, 2021



**Toxicidad del Cadmio y la estrategia de biorremediación de suelos
contaminados para disminuir sus efectos**

APROBADA

JURADOS

ASESORES

Facultad de Ciencias de la Salud
Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico
Trabajo de grado
Bogotá, 2021

DEDICATORIA

El trabajo realizado lo dedico con mucho cariño a mi hija Anita, con su amor profundo, me salvó y llenó de fuerza, debe saber que los sueños se cumplen y este especialmente se cumple gracias a ella, a mi mamá Isabel, a mis hermanos David, Daniel y Migue quienes fueron sustento en todo momento, me han motivado a continuar pese a cada obstáculo presentado, por mantenernos fuertes, unidos y completos. ¡Su amor es mi salvavidas!

¡Lo logramos familia!

Dayra Liliana Ramírez Moreno

Este es para las personas que siempre están detrás de mí apoyándome, siempre fortaleciéndome y enseñándome a nunca desfallecer, esas personas son familiares cercanos amigos.

Carlos Andrés Ramírez Almanza

AGRADECIMIENTOS

Bien es cierto que el presente trabajo requirió de bastante esfuerzo y gran dedicación, no habría sido posible finalizarlo sin la ayuda desinteresada de todos y cada uno de los ángeles que me acompañaron en el recorrido y la construcción de esta monografía, muchos de ellos siendo soporte, ayuda y motivación en momentos de angustia y desmotivación.

Primero agradezco al universo por permitirme vivir este momento, por poner personas que han sido soporte y compañía durante estos años de estudio, a mi amada hija ANA ISABEL MOYANO RAMÍREZ, por su ilimitada paciencia, calma, amor y tranquilidad para conmigo, por ser motivo, amor y fuerza. A mi mamá ISABEL MORENO ROCHA, quien es mi guía y apoyo, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente. A mis hermanos David, Daniel y Migue por jamás soltar mi mano, ser mi ejemplo y fuente de alegría y risa. A Mauricio Acosta por su acompañamiento y ayuda cuando necesité.

A mis asesoras Carolina y Judith que con su amplia experiencia y conocimiento me orientaron durante el proceso, a través de ellas a la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca y sus docentes. A mi compañero de trabajo, Andrés.

A mis compañeros de aventuras, risa, estudio, creadores de sonrisas, maestros de enseñanzas de vida, mil veces gracias por hacer esta experiencia maravillosa, especialmente a Andrea por estar en los momentos de mayor aprendizaje y no dejarme desistir.

Dayra Liliana Ramírez Moreno

A mi mamá Miryam del Pilar Almanza Cortes, a mi papá Carlos Julio Ramírez, a mi hermana María Alejandra Ramírez Almanza que son pilares de mi vida y para mi carrera, que a cada esfuerzo se vea retribuido de mí para ustedes. También agradecer especialmente a mi compañera Dayra Ramírez y Andrea Carolina Hernández por todo lo que me aguantaron y por su forma de forjar mi carácter y de apoyarme.

Deseo también agradecer a Andrea Murcia García, por ser esa persona tan especial que siempre recordaré, por todo lo que me dio que fue más de lo que pude pedir, gracias.

Toxicidad del Cadmio y la estrategia de biorremediación de suelos contaminados para disminuir sus efectos

RESUMEN

El cadmio (Cd) se considera un metal pesado y tóxico para los ecosistemas y el ser humano. Se puede bioacumular en el suelo, los lodos, las plantas y fuentes hídricas. Ingresa a la cadena alimenticia del ser humano al ingerir alimentos o animales contaminados con Cd. Este trabajo es una revisión documental sobre las consecuencias del cadmio en la salud del ser humano y el uso del proceso de biorremediación del suelo contaminado con este metal pesado, para disminuir sus efectos. Se realizó una revisión bibliográfica, identificando las principales fuentes de exposición de este metal pesado (antropogénica, industrial, agrícola, entre otras), los daños que puede causar en la salud humana (apoptosis, carcinoma, etc.) y los microorganismos o plantas que se pueden emplear en los diferentes procesos de biorremediación.

Las enfermedades asociadas al Cd en el ser humano, incluyen alteraciones a nivel placentario, fetal y abortos con 28%, seguido de alteración renal, ósea, reproductiva y hormonal con 20%. El 24 % reporta apoptosis, citotoxicidad y como agente carcinógeno con 8%. Los factores determinantes para la biorremediación en suelos del Cd son: el pH, la mayoría de técnicas, independientemente del método y el microorganismo o planta utilizados, empleando de 5.0 a 6.0 (45%), la temperatura empleada fue de 24°C – Mayor de 30°C, origen y la concentración de Cd, la biomasa (microorganismos) o plantas utilizados para biorremediar el metal y el contenido de materia orgánica. Siendo el mejor proceso para biorremediar, la bioacumulación, el cual se puede desarrollar con plantas, hongos o bacterias.

PALABRAS CLAVES: metal pesado, efectos tóxicos en la salud, biorremediación, suelo, microorganismos y plantas

Carlos Andrés Ramírez Almanza
Dayra Liliana Ramírez Moreno

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo general	10
2.2 Objetivos específicos	10
3. ANTECEDENTES	10
4. MARCO TEÓRICO	12
4.1 Cadmio	12
4.1.1 Normativa de niveles de cadmio en alimentos	13
4.1.2 Ecotoxicidad	13
4.1.3 Toxicidad de cadmio en el ser humano	13
4.2 Biorremediación de cadmio	13
4.2.1 Bioadsorción o biosorción	16
4.2.2 Bioacumulación	18
4.2.3 Fitorremediación	18
4.2.4 Biolixiviación	18
4.2.5 Biotransformación	18
5. DISEÑO METODOLÓGICO	18
5.1 METODOLOGÍA PROPUESTA	18
5.2 UNIVERSO, POBLACIÓN, MUESTRA	18
5.2.1 UNIVERSO	18
5.2.2 POBLACIÓN	18
5.2.3 MUESTRA	18
5.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS OBJETOS DE ESTUDIO	18
5.4 CRITERIOS DE INCLUSIÓN O EXCLUSIÓN.	18
5.5 TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS	19
5.6 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	19
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
6.1 Recopilación, clasificación y análisis de la información.	19

6.2 Consecuencias de la exposición de Cd en la salud humana.	22
6.3 Fuentes de contaminación por Cd en el ser humano.	23
6.4 Procesos de biorremediación	25
6.5 Microorganismos utilizados en los procesos de biorremediación.	31
7. CONCLUSIONES	36
8. RECOMENDACIONES	36
9. BIBLIOGRAFIA	37
10. ANEXOS.	45

Figura 1. Valores de cadmio en suelos

Figura 2. Normativa de la Unión Europea (UE)

Figura 3. Concentración de Cd en diferentes productos derivados del cacao

Figura 4. *Normatividad internacional, límite máximo permisible de cadmio en suelos*

Figura 6. Fisiopatología del daño renal.

Figura 7. Diagrama esquemático de los diferentes mecanismos de biosorción bacteriana.

Figura 8. Factores que afectan los procesos de biorremediación de metales pesados.

Figura 9. Fuentes de Cd y procesos de biorremediación.

Figura 10. Características de los principales mecanismos de biorremediación.

Figura 11. Los mecanismos de respuesta a los contaminantes metálicos en las células vegetales

Figura 12. Partes de la planta que actúan en fitorremediación

Figura 13. *Tipo de publicación.*

Figura 14. *Porcentajes de publicación revisada por país*

Figura 15. *Información encontrada en las bases de datos por idioma*

Figura 16. *Información encontrada en las bases de datos por bases de datos o buscadores.*

Figura 17. *Año de publicación información*

Figura 18. *Afectaciones asociadas a Cd en la salud humana*

Figura 19. Porcentaje de literatura revisada según enfermedad asociada al Cd.

Figura 20. *Fuentes de exposición por Cd en el ser humano*

Figura 21. Descripción de diferentes técnicas utilizando diversos organismos para la eliminación de Cd de diferentes sustratos.

Figura 22. Porcentajes de frecuencia de rangos de pH y temperatura utilizados por los autores revisados.

Figura 23. *Porcentaje de documentos revisados por proceso de biorremediación.*

Figura 24. Microorganismos y plantas utilizados en los procesos de biorremediación

1. INTRODUCCIÓN

El cadmio (Cd) se acumula principalmente en la parte área más que en los frutos, como por ejemplo en el grano de cacao, maíz, cereales, tomates o en hojas altas y es considerado contaminante ambiental, tóxico para los seres vivos, ya que es bioacumulable considerándose un posible agente carcinogénico humano.

El Cd procede de diferentes fuentes, entre ellas están las fuentes naturales dadas por la desmineralización de rocas ígneas e incendios forestales, actividad volcánica y quema de combustibles fósiles. Las fuentes industriales abarcan los subproductos de la extracción, fundición y refinamiento de zinc, en menor medida se genera como subproducto de la búsqueda de plomo y cobre. Otra fuente es la agrícola, generada por el uso a largo plazo de pesticidas o fertilizantes fosfatados que contienen trazas de cadmio, esta fuente también incluye el estiércol de ganado y aguas residuales con contenido de cadmio; los cuales pueden llegar a contaminar los suelos cultivables.

Por lo tanto, se han utilizado tratamientos para remoción de metales pesados con el fin de disminuir la contaminación de estos en el medio ambiente, como los son; sustitución, fracturación neumática, lavado y *flushing*, los cuales son costosos e ineficientes, es por esto que se busca aplicar tratamientos biológicos, utilizando diferentes estrategias donde se aprovechan los microorganismos nativos que utilizan Cd en su metabolismo para mejorar la contaminación de dichos suelos.

En las personas no fumadoras la principal vía de entrada del Cd al ser humano es mediante la ingesta de alimentos o carne contaminada, es por ellos que la Unión Europea ha establecido límites más estrictos en el contenido de Cd de algunos productos, en suramérica y Europa rigen normas en cuanto máximo permitido de cadmio en suelo agua y aire todo con el fin de calidad disminuir el riesgo de toxicidad o padecimiento de algunas de las enfermedades por el consumo con contenido de Cd como lo son; daño renal en los túbulo contorneados proximales, asociados con disfunción mitocondrial, osteoporosis; cáncer y retraso en el desarrollo de los niños dado por la interferencia del Cd en el metabolismo de calcio.

Por lo anterior, se ha establecido mecanismos de biorremediación con microorganismos como un proceso de bajo costo para mitigar el Cd en el suelo, provoca menor intrusión en el sitio a tratar y en consecuencia un daño ecológico significativamente menor (puede degradar selectivamente los contaminantes sin dañar su flora y fauna autóctonas), contribuyendo a la búsqueda del objetivo de desarrollo sustentable, de reducir sustancialmente el número de muertes causadas

por productos químicos peligrosos, la contaminación del agua y el suelo, se puede usar de la mano con otras tecnologías para tratar suelos contaminados con metales pesados combinando procesos mediante el uso de microorganismos presentes en estos suelos contaminados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Realizar una revisión documental sobre la toxicidad del cadmio y el proceso de biorremediación del suelo contaminado con este metal pesado para disminuir sus efectos.

2.2 Objetivos específicos

1. Establecer las fuentes de contaminación por cadmio.
2. Determinar las consecuencias que tiene la exposición de cadmio en la salud humana
3. Identificar las técnicas de biorremediación usadas en suelos contaminados con cadmio.
4. Enunciar los principales microorganismos (bacterias y hongos) o plantas con capacidad biorremediadora de cadmio.

3.ANTECEDENTES

A nivel mundial varios autores han desarrollado sus investigaciones en diferentes alternativas bioamigables las cuales involucran el uso de microorganismos o plantas con capacidad biorremediadora de Cadmio (Cd).

En el 2016 Stanisław evaluó la utilidad del hidrolizado de proteínas (Hemozym) para fines de fertilización utilizado en suelos no contaminados y contaminados con cadmio donde también gracias Hemozym se dio la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo y su actividad microbiana dando una tendencia a la conversión de metales que son poco solubles para poder ser bioacumulables (1) . Además, Yang en el mismo año, aisló una cepa productora de biosurfactantes con

capacidad de producción alcalina de lodos de alcantarillado de una cafetería y se investigó su capacidad para eliminar Zn, Pb, Mn, Cd, Cu y As. La remoción de metales pesados en los suelos contribuyó a la adhesión de los minerales del suelo contaminados con metales pesados con la cepa Z-90 y a la formación de un complejo metálico con biosurfactante, y la eficacia de la biolixiviación de los metales pesados depende, de la forma química específica de los metales presentes en el suelo (2). Sánchez dio como principal vía de exposición del cadmio al ser humano la ingesta de comida contaminada, y en por segundo lugar, la inhalación de aerosoles de compuestos de cadmio, dando como resultado patologías que afectan al ser humano como lo son daño renal, osteoporosis que es debido a que el 10% del Cd filtrado se reabsorbe en los segmentos distales de la nefrona y como resultado el efecto hipercalcémico del Cd sea consecuencia de la inhibición de la actividad del canal de calcio en el túbulo distal, además el cadmio es un agente cancerígeno, ya que produce el aumento de la matriz metaloproteínica-9, la cual es una enzima que ayuda a la entrada de células tumorales.

En el 2017 Avelar investigó con diferentes cepas de *Cupriavidus*, mediante dos ensayos, uno con suelo contaminado con metales con el fin de conocer sus capacidades de tolerar y bioacumular cadmio y zinc, las cepas bacterianas aisladas mostraron un rápido crecimiento, resultando en un medio de cultivo alcalino (3). A su vez Širić Realizó la bioestabilización del cadmio mediante la experimentación de desorción confirmó que tanto la adsorción extracelular como la captación intracelular contribuyen a la bioestabilización, aunque el Cd se distribuyó principalmente en la membrana de *E. cloacae* siendo una biorremediación por bioacumulación (4) (5).

En 2018, Choińska-Pulit y colaboradores aislaron 51 cepas microbianas de agua y suelo contaminado con metales pesados, de estas eligieron *Pseudomonas azotoformans*. El estudio indicó que la acumulación del metal podría ser en la superficie celular, donde la cantidad de Cd absorbido alcanzó un 98, 57%, manifestando una buena capacidad de aplicación de biorremediación (6). Después Cerrón, Figueroa y colaboradores buscaron solubilizar elementos contaminantes como metales pesados presentes en suelos agrícolas, mediante el uso de enmiendas orgánicas (compost y vermicompost) junto con *Zea mays L.*, demostrando que dicha planta posee capacidad fitorremediadora (7), a su vez Zúñiga investigó las bacterias ácido lácticas como *Acidithiobacillus ferrooxidans* la cual posee una resistencia a altas concentraciones de metales pesados como el cadmio generada por mecanismos que se explican en su investigación: genes que codifican posibles determinantes de la resistencia a metales, como los sistemas de eflujo: ATPasas de tipo P, transportadores RND y facilitadores de la difusión de cationes, y por esos mecanismos es usado para la biolixiviación de cadmio en la biominería(8).

Así mismo, Albert y colaboradores estudiaron la tolerancia a trazas de Cd de la cepa fúngica *Absidia cylindrospora* en medio MEA dopado con Cd en placas de Petri. Evidenciaron la biosorción por el microorganismo de 68% de Cd cuando fue expuesto por 3 días a 50 mg L⁻¹(9). Además, Yang realizó el proceso de biorremediación combinando la biolixiviación por los biosurfactantes brutos de *Burkholderia sp.* Se propuso que el microorganismo Z-90 y la floculación por cloruro

de polialuminio (PAC) para desarrollar una técnica potencial amigable con el medio ambiente y rentable donde se pueda realizar una biolixiviación de metales pesados como; Zn, Pb, Mn, Cd, Cu y As, (10).

En el 2019 Kun visibilizó más la problemática que amenaza la seguridad alimentaria en el cereal del grano del arroz, en el cual hacia la biorremediación por bioacumulación de cadmio en el grano; teniendo en cuenta la influencia de las propiedades del suelo y la sensibilidad intrínseca del arroz, se podrían identificar cultivares con bioacumulación de Cd (11). En el mismo año, García y colaboradores regaron plantas de *Ambrosia ambrosioides* durante 21 días con una mezcla de solución Steiner previamente preparada, la cual contenía concentraciones previstas de metales pesados de alta pureza, lograron identificar que la planta transloca el Cd con mayor facilidad y a concentraciones mayores de 40 mg L⁻¹ se disminuye la acumulación de Cd (12). Así mismo Javad Kazemi aisló microorganismos autóctonos extremadamente termo acidófilos a temperatura ambiente del Complejo de Cobre, determinar su eficiencia en la biolixiviación de calcopirita para la recuperación de cobre y responder a la pregunta clave de si los microorganismos mencionados pueden tolerar una mayor densidad de pulpa que otros microorganismos termófilos extremos o no (13).

En 2020, Cristaldi (14) y colaboradores utilizaron una simbiosis entre *A. donax* y *Trichoderma harzianum*, en pruebas controladas de invernadero durante 7 meses en los cuales la planta micorrizada fue expuesta a suelo contaminado con Cd, evidenciaron una transferencia de metales de la raíz a las hojas de la planta, esto direcciona a que probablemente podría aumentar aún más la translocación del metal con el tiempo, el desarrollo y el crecimiento de la planta (15) (16). En el mismo año, Steliga y Kluk evaluaron el proceso de fertilización con macetas de *F. arundinacea* cultivadas en suelos con concentración de Cd de 15.6mg/kg, obteniendo porcentajes entre 26,3-46,7% de reducción del metal después de 6 meses. La mayor biorremediación de Cd en el suelo se observó entre el 2° y 4° mes de fitorremediación (17)

Maldaner y colaboradores también investigaron la capacidad de biosorción de 6 aislados de *Trichoderma spp* expuestos a 5 concentraciones de cloruro de Cd (CdCl₂) en medio BDA, el crecimiento inicial (IG) se vio afectado negativamente con el aumento de las concentraciones de CdCl₂, dos de los 6 aislados lograron tolerar y crecer en la concentración más alta de CdCl₂. (14) Luego Apaza-Aquino y Valderrama aislaron microorganismos nativos de una poza de relaves con el fin de hacer biosorción de Cd, para ello los macroorganismos fueron cultivados en régimen *Batch* con una solución de metal que contenía 100 ppm. La cepa *Rhizopus sp* logró biorremediar 69.23%(18).

En 2021, Pons y colaboradores usaron una planta identificada como hiperacumuladora de metales pesados: *Solanum nigrum* y otra con baja capacidad de acumulación: *S. melongena*, las cuales fueron sembradas en macetas con arena y tierra franco-arcillosa dopada con Cd y cosechadas a las 14 semanas, obteniendo un TF de 0,31 para *S. nigrum* y 0,24 para *S. melongena*. (17) (18).

El uso de procesos de biorremediación no afecta en gran medida el crecimiento de las plantas, dependiendo la forma química de asociación del metal disponible en el suelo influye mucho para el proceso de remediación. Cuando se emplean microorganismos el tiempo disminuye significativamente. En procesos de fitorremediación es importante tener en cuenta el porcentaje de translocación.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Cadmio

De acuerdo con Camacho VB, Díaz RG (2018) (1) y Londoño (2016) (2) los metales pesados son de alta peligrosidad. El cadmio (Cd) es un metal pesado tóxico con una densidad específica de 8 g/cm³, número atómico de 48, se coloca en el grupo 12 en la tabla periódica con electronegatividad de 1,69, se encuentra asociado al Zinc (2) (19) Según lo investigado por Abbas (3), la concentración global de Cd en ecosistemas naturales es de 0.07-1.1 mg /kg -1. El Cd no provee ningún beneficio ni propiedad nutritiva al ser humano. El consumo de Cd es tóxico para plantas, animales y seres humanos ya que es bioacumulable y posible agente carcinogénico humano (5). Tiene alta afinidad por los ácidos húmicos y la materia orgánica (6), se encuentra asociado con rocas de fosfato y otros minerales (7), actividades volcánicas, incendios forestales, combustión de carbón, madera y petróleo (11). El cadmio también se introduce de manera exógena mediante actividades antropogénicas (8), fundición y refinación de metales, quema de combustibles fósiles (9), como parte de cigarrillos, electrodos, pigmento en plásticos, incluso estabiliza los productos de PVC y hace parte de la fabricación de aparatos electrónicos (10), el sistema agrícola hace su aporte de cadmio mediante el uso de los fertilizantes fosforados sintéticos y pesticidas; también por procesos de manufactura y disposición de aguas residuales contaminados con efluentes industriales y domésticas (7)(9).

4.1.1 Normativa de niveles de cadmio en alimentos

Desde el punto de vista de la seguridad alimentaria, la ingesta de varios oligoelementos, está estrictamente regulada por varios organismos internacionales, incluido el Codex Alimentarias y el Comité Mixto FAO / OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA) como veremos a continuación:

Las plantaciones deberían ubicarse en áreas con un contenido bajo de Cd, de forma que el suelo agrícola no supere 1,4 mg/kg de Cd. Y el contenido de Cd en el agua de regadío no debería superar el valor de 0,005 mg/L. Las muestras de grano de cacao para las cuales existe un límite máximo permitido de cadmio de 0,5 mg/kg (20) (Véanse las figuras 1, 2, 3 y 4 de normativa en anexos.)

DIRECTIVA 2000/36/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de junio de 2000 relativa a los productos de cacao y de chocolate destinados a la alimentación humana (DO L 197 de 3.8.2000, p. 19). (21)

PROGRAMA CONJUNTO FAO/OMS SOBRE NORMAS ALIMENTARIAS COMITÉ DEL CODEX SOBRE CONTAMINANTES DE LOS ALIMENTOS 13.a reunión Yogyakarta (Indonesia), 29 de abril – 3 de mayo de 2019 (22)
República de Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diagnóstico Nacional de salud ambiental. Límites aceptados para la exposición a cadmio (23)

A nivel mundial, existe un número limitado de países que han presentado algún tipo de límite del contenido de este metal como se evidencia en la figura 4.

4.1.2 Ecotoxicidad

Químicamente, el cadmio se puede encontrar disuelto en el agua contenida en el suelo, adsorbido en superficies orgánicas e inorgánicas, formando parte de minerales como greenockita (sulfuro de cadmio), precipitado con otros compuestos del suelo, en óxidos complejos o carbonatos (15), quedando así disponible en el suelo para la absorción y acumulación por las plantas, siendo esta la forma de entrada a la cadena trófica (16) (ver figura 5). El nivel promedio de cadmio en suelos ha sido ubicado entre 0,07 y 1,1 mg/kg, con un nivel base natural que no debe exceder 0,5 mg/Kg (15).



Figura 5. Cadena trófica del Cd. Los HM ingresan a la cadena trófica desde el suelo a las plantas, mediante acumulación. Luego, pasan a los mamíferos cuando se alimentan de estas plantas contaminadas.

La acumulación del cadmio varía de acuerdo al tipo y al sitio de la planta, por ejemplo, en la yuca se acumula en las hojas, en el plátano se acumula en las raíces (24) y en el cacao se acumula en el grano (8) (25) dicha acumulación en los tejidos vegetales, especialmente en partes comestibles, limita el crecimiento (13) representando a su vez un riesgo para los organismos que se alimentan de dicha vegetación. Ahora bien, las plantas presentan entre otros signos y síntomas la reducción de la actividad fotosintética, reducción de la capacidad de absorción de agua y nutrientes; por ende, clorosis, inhibición del crecimiento, desecamiento de parte de las raíces (26) destrucción del cloroplasto, la inhibición del pigmento

fotosintético y daño de la membrana (12). El mayor factor que contribuye a la concentración de cadmio en suelos es el pH del mismo, en suelos ácidos la absorción de cadmio es mayor (27) (4) debido a la formación y aumento de especies con carga negativa y la unión del Cd con iones OH⁻, esto permite la adsorción del catión (Cd). (15)

Según el estudio realizado por Marini en el año 2020 los alimentos que se encuentran más asociados a la contaminación con Cd son los cereales, dado por su cultivo en suelos contaminados y al uso de fertilizantes que poseen Cd, dicho metal pesado es translocado a la planta (17).

Los animales que son sometidos a dietas con alto contenido de Cd, pueden llegar a padecer inapetencia, debilidad, pérdida de peso, anemia hemolítica, alteraciones en la queratinización de pezuñas y cuernos, así mismo conduce a alteraciones congénitas en los terneros, abortos y fetos muertos (2). En el *Gallus domesticus* se visibiliza la baja producción de huevos, en *Bos taurus* se manifiesta mediante la disminución del apetito y por ende retraso en el crecimiento, además del fallo renal, hipertensión, anemia, tumores, abortos y lesiones teratógenas. En la especie *Ovis aries* se observa la degeneración hepatocelular, en *Sus scrofa domesticus* hay disminución de las concentraciones de hierro hepático y manganeso renal y en peces disminuye la capacidad de digerir nutrientes (18).

4.1.3 Toxicidad de cadmio en el ser humano

Según la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC por sus siglas en inglés) el consumo de Cd es tóxico para plantas, animales y seres humanos ya que es bioacumulable y posible agente carcinogénico humano (28). La comida y los cigarrillos son las principales fuentes de exposición al cadmio en la población general (16). Este metal pesado es responsable de enfermedades graves en sistema óseo, en riñón e hígado(29) en el humano, debido a la retención del metal en el riñón, disfunción tubular renal(30) y el hígado; para el riñón, la toxicidad radica en la acumulación, especialmente, en las células tubulares proximales con posibles consecuencias de disfunción renal, y posterior desmineralización ósea como se muestra en la **figura 3**(31).Después de la exposición prolongada, a partir del daño tubular puede progresar a una disminución de la filtración glomerular, y finalmente, a la insuficiencia renal.(32).

El Cd se asocia con abortos espontáneos y malformaciones fetales(33) hace parte de los compuestos alteradores endocrinos(34) considerándose como imitador del estrógeno presentando a su vez un alto riesgo de cáncer para tejidos sensibles a las hormonas como la mamá y el endometrio (35) tiene la capacidad de pasar placenta y acumularse en tejidos fetales (36) y placentarios(37) conduce partos prematuros y bajo peso al nacer (29) , también influye en el transporte placentario de calcio y zinc e interrumpe la producción de progesterona placentaria(38)(39) mediante la inhibición de transcripción del receptor de LDL de ARNm disminuyendo El abastecimiento de colesterol necesario para su producción (40)(41).

Así mismo la absorción gastrointestinal alcanza hasta un 5 % de la ingestión total de cadmio, mientras la absorción por los pulmones podría alcanzar hasta un 50 % del

total(11), dicha acumulación en el cuerpo puede aumentar con la edad y la ingesta (42) (2), además se ha descrito que la absorción es mayor en mujeres, ya que se asocia a niveles bajos de hierro(43) y puede alterar la secreción de las hormonas reproductivas LH y FSH (hormona luteinizante y hormona folículo estimulante respectivamente)(40). Para el hombre representa toxicidad reproductiva con citotoxicidad en células testiculares (32).

El cadmio produce daños mediante un mecanismo que incluye: disfunción por formación de radicales libres como especies reactivas de oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (RNS), precipitando el estrés oxidativo e influyendo de forma desfavorable en el sistema reproductor femenino (44), bloqueo de grupos tiol, inhibiendo la respiración celular (30), apoptosis o activación por vía de las caspasas (44). Es decir, la inactivación enzimática por la formación de enlaces entre el metal y los grupos sulfhidrilos (-SH) y otros grupos funcionales de las proteínas y enzimas, causando daños irreversibles en los diferentes organismos, desplazando otros iones metálicos o modificando la conformación activa de moléculas biológicas (45).

La fisiopatología ocasionada por el cadmio en el riñón inicia cuando el cadmio (ver Figura 6 en anexos) es ingerido, posteriormente es absorbido por el intestino y llevado al hígado por el transportador DMT-1, el cual está unido a la albúmina, allí se une al glutatión y a la metalotioneína-1 (MT-1) donde se forma el complejo Cadmio-Metalotioneína-1 (Cd-MT1), este complejo se filtra fácilmente a través del glomérulo y es reabsorbido en su totalidad por el túbulo contorneado proximal (TCP), el Cd libre es acumulado en la mitocondria ocasionando una disfunción mitocondrial en la cadena respiratoria, lo que conlleva a la formación de radicales libres que activan caspasas causantes de apoptosis. Este mismo cadmio libre, se une a los grupos sulfhidrilos afectando la función y dando actividad a las MAPcinasas que disminuyen la resistencia transepitelial (46).

4.2 Biorremediación de cadmio

La biorremediación es realizar el aislamiento, la identificación y la aplicación de las bacterias presentes en el lugar del problema, para la eliminación de Cd del suelo mediante los procesos metabólicos de los organismos vivos (bacterias, hongos y plantas) Los microorganismos del suelo constituyen una alternativa amigable para minimizar el daño en el equilibrio microbiológico del suelo (25), debido a su resistencia natural a los factores medioambientales. El fin es generar consorcios microbiológicos para tratar la contaminación de metales pesados. Las bacterias empleadas por lo general tienen dos tipos de biorremediación; uno que es inespecífico y depende del gradiente quimiosmótico y el otro que es más específico, pero a su vez más lento y usualmente utiliza la hidrólisis de ATP como fuente de energía adicional al gradiente quimiosmótico según lo investigado por Viteri et al (33)

Los microorganismos como las bacterias pueden ser sensibles a concentraciones relativamente bajas de Cd y han desarrollado múltiples estrategias de defensa para proteger las células de los metales tóxicos, como el secuestro de metales en la superficie celular, sistemas de efluentes metálicos y secuestro de metales intracelulares. (**Ver figura 7**).

Figura 8. Factores que afectan los procesos de biorremediación de metales pesados. Elaboración propia basada (20) (69) (68).

FACTORES QUE AFECTAN LA BIORREMEDIACIÓN	CARACTERÍSTICA
Concentración del metal	Los valores normales de concentración de Cadmio en suelos, se han determinado cantidades inferiores de 1 mg Kg ⁻¹ , con un intervalo de 0,001 a 0,5 mg/kg, en el cual son una concentración normal y no presentan un poder toxicológico importante, pero si se incrementa por alguna de las fuentes (ver figura 9.) de Cd adquiere un potencial tóxico elevado. Valores entre 300-400 µg/L establecen contaminación del suelo por este metal.(11).
pH	El pH influye en la disociación o hidrólisis de compuestos (orgánicos o inorgánicos) que tengan metales pesados, reacciones de óxido reducción, precipitación y en la disponibilidad de biosorción de los metales (19). Por ende, en suelos con pH alcalinos el Cd no es móvil debido a que se precipita en forma de carbonatos y fosfatos insolubles. Así mismo, quien controla la solubilidad del metal son los sesquióxidos y la materia orgánica. (46)
Temperatura	Teniendo en cuenta que los microorganismos crecen a temperaturas entre 20- 37°C, la biorremediación en temperaturas similares (20-40°C) es óptima, pero ésta puede variar dependiendo del lugar y el microorganismo (47)Respecto a las plantas, altas temperaturas incrementan la tasa de evapotranspiración lo que conlleva a un mayor movimiento del agua de la raíz a la parte aérea y con ello de los metales (37)
Contenido de materia orgánica	El contenido de materia orgánica y la fijación del cadmio al suelo son directamente proporcionales, esto lleva al aumento en la capacidad de intercambio iónico, facilitando su absorción por las plantas y así ingresar a la cadena trófica (11)

La figura 9 describe la contaminación del suelo con Cd y diferentes tecnologías de biorremediación. (a) Los afluentes de contaminación por Cd derivan de actividades naturales, agrícolas, industriales, antropogénicas, entre estas últimas se encuentran

los desechos electrónicos, incineraciones, combustión de combustible, lodo de pintura, baterías de desecho y fundición de Zinc, entre otras. (b) Las fuentes contaminadas: suelo, agua y aire, ya sea de manera directa o indirectamente. (c) Consecuencias más comunes de la contaminación por Cd: reducción de la fertilidad del suelo, translocación inducida de metales pesados y bioacumulación de Cd en las cadenas alimentarias. (d) Diferentes enfoques de biorremediación: remediación bacteriana, micorremediación, fitorremediación.

En la figura 9 se hace una descripción gráfica general de la contaminación por Cd en el suelo y sus enfoques de biorremediación. La biorremediación asistida por bacterias y la fitorremediación son las más populares debido a su naturaleza ecológica, su mayor eficiencia y su proceso operativo de bajo costo. (48).

A continuación, se presenta una tabla resumen de las principales características de los procesos de biorremediación:

Figura 10. Características de los principales mecanismos de biorremediación. Elaboración propia basada en varios autores Pineda (49), A Gómez (49), VRodríguez (49) 2016.

TÉCNICA	DESCRIPCIÓN
Bioacumulación	La bioacumulación es un proceso celular que involucra un sistema de transporte de membrana que internaliza el metal pesado presente en el entorno celular con gasto de energía, este consumo energético se realiza a través de la H ⁺ -ATPasa; una vez incorporado el metal pesado al citoplasma este es secuestrado por proteínas ricas en grupos sulfhidrilos llamadas metalotioneinas (MT), fitoquelatinas (FQ) y algunos nuevos péptidos de unión a metales, si se trata de hongos este es compartimentalizado dentro de las vacuolas.(50)
Biosorción	La tecnología de biosorción o bioadsorción es un proceso fisicoquímico pasivo en el cual los iones metálicos se adsorben en la superficie de sustancias biológicas, este es un proceso reversible. El ion metálico que es adsorbido en la superficie se transporta dentro de la célula a través de transportadores activos. Utiliza biomasa viva o muerta.(44)
Biolixiviación	Es un proceso el cual obtienen la recuperación de medios contaminados por metales pesados o metaloides(47) en el cual es importante la interacción de los metales como el cadmio con los microorganismos utilizados ya que estos deben tener la capacidad de aumentar la solubilidad del metal permitiendo a su vez retirarlo del medio que se encuentra contaminando(34), teniendo en cuenta que hay factores como temperatura pH disponibilidad de nutrientes y óxidos e hidróxidos que afectan el proceso de biolixiviación (47)

Biotransformación	Los microorganismos no son capaces de degradar ni destruir compuestos inorgánicos, incluidos los metales, pero si reducir o aumentar su movilidad en el suelo (51). La técnica consiste en disminuir o eliminar por completo el contaminante (Cd) o la toxicidad del mismo, mediante su transformación a especies químicas que no resulten peligrosas. Este proceso se da a través de la interacción entre el metal y los microorganismos, lo que lleva al cambio en el estado de oxidación (Cd +1 es inestable reduciendo así la movilidad o aumentando la solubilidad del metal lo que lleva a su eliminación del medio, por el contrario, cuando se disminuye la solubilidad se inmoviliza el metal pesado). (52)Sin embargo, no es posible su aplicación en capas profundas del suelo y dependen de la especificidad del microorganismo para con el metal (51).
Bioestimulación	Esta técnica utiliza células vivas, consiste en la activación de la población microbiana nativa (37), se estimula el crecimiento favoreciendo las cantidades óptimas de nutrientes y energía que permitan su desarrollo (37).(53)
Bioaumentación	Consiste en la introducción artificial de poblaciones de microorganismos viables (47) que no se encuentran de manera natural en el suelo, como consecuencia a la adición de microorganismos resistentes al potencial tóxico del Cd se protege el suelo frente a la toxicidad que estos suponen (54)(53).
Fitofiltración	Secuestro y captura de contaminantes por plantas acuáticas a través de las raíces de la planta o algunas semillas, el objetivo es eliminar metales de fuentes hídricas.
Fitodegradación	Degradación o mineralización de contaminantes orgánicos gracias a la actividad enzimática específica de la planta, puede utilizar asociaciones de microorganismos para degradar contaminantes orgánicos
Fitoestimulación	La raíz en crecimiento promueve el desarrollo de microorganismos rizosféricos capaces de degradar el contaminante, usando los exudados radiculares como fuente de carbono
Fitovolatilización	Conversión de contaminantes a partículas volátiles, se da cuando la raíz absorbe algunos de los elementos de los grupos II, V y VI de la tabla periódica y los convierte y libera al exterior, en formas menos tóxicas,
Fitoestabilización	Durante este proceso las raíces de las plantas absorben los contaminantes del suelo y lo almacenan en la rizósfera, pueden incorporarlo a la lignina o en el humus disminuyendo la posibilidad de contaminación, como consecuencia se limita la movilidad y biodisponibilidad de metales pesados.

De los procesos anteriormente mencionados, centraremos nuestra revisión en bioadsorción, bioacumulación, fitorremediación y bioaumentación.

4.2.1 Bioadsorción o biosorción

La tecnología de biosorción es un proceso fisicoquímico pasivo rápido en el cual los iones metálicos se absorben en la superficie de sustancias biológicas mediante intercambio iónico (32), este es un proceso reversible. El ion metálico que es absorbido en la superficie se transporta dentro de la célula a través de transportadores activos. El proceso ocurre cuando los microorganismos coexisten con los iones metálicos y desarrollan procesos para usar estos iones metálicos. La biosorción de Cd^{2+} utilizando biomasa microbiana es una de las alternativas más prometedoras, este enfoque es económico, eficaz y respetuoso con el medio ambiente. Se han descrito microorganismos (hongos y bacterias) y plantas a través de aislamiento y detección de cepas con capacidad de tolerancia a los metales pesados y por ende poseen capacidad para la biosorción como es el caso de *Pseudomona sp* (33), *Burkholderia spp* (55), *Mortierella sp.* (56), *Fusarium sp.*, *Rhodotorula sp.*, *Pochonia sp.*, *Acremonium* (23), semillas de *Adansonia digitata* L (57) (43), *Aspergillus*, *Penicillium* (44) y *Lactobacillus plantarum* MF042018(45). Los mecanismos de respuesta a los contaminantes metálicos en las células vegetales se muestran en la **figura 11** (ver en anexos).

Adicionalmente la adsorción pasiva de metales pesados no requiere gasto de energía (58), esta se da en la superficie celular, en donde el pH, la temperatura, la biomasa y la concentración del metal pueden afectar la eficacia de biorremediación. Las anteriores variables se deben tener en cuenta al momento de emplear un proceso de biorremediación, ya que la alcalinidad del suelo favorece la formación de especies hidroxilo monovalentes ($CdOH^{+}$) lo que conduce a dificultar la unión a los lugares donde se realiza el intercambio iónico (35). La baja unión de metales a un pH más bajo puede resultar de la competencia por los sitios de unión cargados negativamente entre los cationes de metales pesados y los protones (59); respecto a suelos con pH ácido hace que se genere un intercambio más fácil, lo que lo hace disponible para las plantas. La temperatura es un factor altamente importante ya que influye en la velocidad de degradación de enzimas y proteínas bacterianas, en el metabolismo de los microorganismos, entre otros.

A continuación, se presenta microorganismos utilizados en este proceso:

Figura 12. (60) Biosorción microbiana de metales pesados. Tomado y modificado de 6(1), 13

MICROORGANISMOS	BIBLIOGRAFÍA
<i>Pseudomona aeruginosa</i>	(61)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	(19)

<i>Chelatococcus daeguensis TDA1</i>	(62)
<i>Fusarium sp, Myrothecium sp.</i>	(11)
<i>Deinococcus radiodurans</i>	(37)
<i>Aspergillus flavus</i>	(45)
<i>Alternaria alternata, Penicillium aurantogriseum</i>	(63)
<i>Rhizopus stolonifer</i>	(37)
<i>Streptococcus esquisimilis</i>	(64)
<i>Rhodococcus opacus</i>	(19)

4.2.2 Bioacumulación

La tecnología de bioacumulación es un proceso irreversible en el que los microorganismos acumulan iones metálicos intracelularmente, las cepas bioacumulativas sintetizan compuestos ricos en grupos tiol como mecanismo para neutralizar y acumular más cantidades de metal.

Los metales pesados y los metaloides en concentraciones elevadas son gran peligro porque tienden a bioacumularse en diferentes cultivos, como arroz, tomate, yuca. La bioacumulación significa un aumento en la concentración de un producto químico en un organismo en un cierto período de tiempo, comparada a la concentración de dicho producto químico en el ambiente (65)

El sistema de transporte de membrana se encarga de internalizar el metal pesado del entorno, participando así en el proceso de bioacumulación, esto se realiza con gasto de energía, el cual se lleva a cabo mediante la P-ATPasa, una vez en el citoplasma es secuestrado mediante proteínas con grupos sulfhidrilos (66)(67), las metalotioneinas (MT), péptidos de unión y las fitoquelatinas (FQ) intervienen en la unión del metal y el grupo sulfhidrilos en fase estacionaria(68) **ver figura 11**, si es en hongos esto se lleva a cabo dentro de las vacuolas (57).

Los microorganismos son de un papel relevante en la biorremediación de metales pesados debido a que son tanto como bioacumuladores directos siendo ellos el agente bioacumulador o con las relaciones simbióticas con las plantas para poder facilitar o potenciar la bioacumulación de las plantas (69).

4.2.3 Fitorremediación

La acumulación de Cd en las plantas depende del genotipo, además de la inoculación de las micorrizas que aumentan la absorción y el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, aumentó la tolerancia al Cd a través de un efecto de dilución (70).

Según Correa (71) es una tecnología que permite la descontaminación del suelo por metales pesados, a través de un método *in situ*; en este método de biorremediación, se utilizan plantas para la remoción de contaminantes. También la fitoextracción tiene el potencial de convertirse en una empresa rentable cuando se combina con la producción de biocombustibles. (72)

Consiste en el tratamiento *in situ* del medio contaminado, en el cual no es necesario extraer muestras de suelo del lugar, ya que se trabaja en el mismo campo donde está la problemática (73). Según Rizwan (74) la contaminación por metales pesados en el lugar puede ser eliminada directamente o estimulando los microorganismos naturales para que muestren su actividad contra los metales pesados.

Así, la fitorremediación distingue entre diferentes tipos de técnicas Figura 12 entre los que diferenciamos:

- Fitoextracción: Consiste en la concentración de los metales pesados en las partes aéreas de las plantas como las hojas. (73)
- Rizofiltración: absorción, precipitación y concentración de los metales pesados en las raíces. (73)
- Fitoestabilización: reduce la movilidad de los metales. (73)
- Fitoestimulación: uso de los exudados radiculares para favorecer el crecimiento de microorganismos con acción degradativa. (73)
- Fitovolatilización: concentración y modificación del metal pesado para liberarlo a la atmósfera por transpiración.
- Fitodegradación: degradación del metal pesado dando lugar a subproductos (73). Según lo investigado por Hernández (75) (48) la forma común de entrada del cadmio es Cd^{2+} puesto que los iones quelatos no están de manera disponible para el proceso de absorción de las raíces, siendo los pelos radiculares los más útiles y más eficaces para esta labor; los cuales están en contacto directo con concentraciones de cadmio elevadas en el suelo. Hernández describe 3 vías de entrada del Cd a la planta.

La primera vía: En la membrana plasmática de las células epidérmicas de la raíz, el CO_2 (ac) se disocia en H^+ y HCO_3^- , a través de la respiración de la planta. Se lleva a cabo un intercambio entre H^+ residual y el Cd^{2+} , siendo así adsorbido el metal en la superficie celular epidérmica de la raíz. Dicho proceso no requiere gasto de energía y es el paso previo para adsorber el Cd^{2+} mediante la vía del apoplasto (75) (45).

Segunda vía: Lo más importante de esta vía según Hernández (76), es que se asume que las plantas no disponen de mecanismos de entrada específicos para el cadmio, así que el metal usa transportadores de metales esenciales (IRT1 LCT1), bien sea Fe^{2+} , Zn^{2+} o Ca^{2+} . Una vez se ha formado el complejo

Cd-proteína transportadora, el metal ingresa en la epidermis de la raíz, esta vez mediante la vía del simplasto.

Tercera vía: En este modelo el autor Hernández (76) habla sobre poder aumentar la disponibilidad de iones en el suelo de la rizósfera, para que las raíces secreten ácidos mugineicos (MA) y a su vez formen complejos con el metal (Cd^{2+}), así el Cd ingresa a la epidermis mediante proteínas tipo YSL, pero en esta vía, ingresa en forma de quelatos.

4.2.4 Biolixiviación

Es un proceso en el cual obtienen la recuperación de medios contaminados por metales pesados o metaloides(75) en el cual es importante la interacción de los metales como el cadmio con los microorganismos utilizados ya que estos deben tener la capacidad de aumentar la solubilidad del metal permitiendo a su vez retirarlo del medio que se encuentra contaminando(75), teniendo en cuenta que hay factores como temperatura pH disponibilidad de nutrientes y óxidos e hidróxidos que afectan el proceso de biolixiviación (75).

4.2.5 Biotransformación

Es un tratamiento que consiste en reducir o suprimir por completo la concentración de los contaminantes de carácter orgánico o la toxicidad producida por metales pesados, a través de transformación o degradación de dichos elementos en unos que no causen daño o sean peligrosos para el medio; para ello se utilizan microorganismos que ofrecen un potencial biológico, en el cual son capaces de metabolizar contaminantes; para poder cumplir con su potencial biológico se deben tener en cuenta las condiciones del medio como pH, temperatura y concentración del contaminante(77). Con los metales pesados, se encuentra el problema de que no pueden ser biodegradados, pero si biotransformados por medio de interacciones metal-microorganismo en las cuales se facilita el cambio de estado de oxidación reduciendo la movilidad del metal o aumentando su solubilidad para facilitar su inmovilización y disminuir la contaminación. (75) (40)

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 METODOLOGÍA PROPUESTA

El tipo de investigación realizado en este trabajo es cualitativo descriptivo como lo refiere Blaxter 2002 en Niño, 2011 (78) La investigación cualitativa tiene como fin la recolección y análisis de información en todas las formas posibles, generalmente se centra en la exploración detallada y profunda referente a un tema de interés. También lo reafirma Pita Fernandez,2002(79) al mencionar que este enfoque busca profundizar las realidades, sus relaciones mediante una estructura dinámica a través de registros narrativos de los fenómenos, para Hernández, 2014 (80) las investigaciones cualitativas están enfocadas en profundizar en los fenómenos,

mediante la exploración vista desde la perspectiva de los participantes u el objeto de estudio. (78)

Por consiguiente, el tipo de estudio es descriptivo como lo menciona María (81), este está dado por la descripción de la realidad del objeto de estudio, donde se analizan sus partes o clases, para establecer las relaciones entre varios objetos, con el fin de corroborar o comprobar un enunciado por medio de palabras características de fenómenos o situaciones. A su vez lo complementa Tinto, 2013 (71) al afirmar que dicho tipo de investigación permite acotarlo, ordenarlo, caracterizarlo y clasificarlo, es decir coincide en hacer una descripción del fenómeno lo más precisa y exacta que sea posible.

La técnica utilizada para el desarrollo de este trabajo se basó en el análisis documental que consiste una forma de investigación técnica, tomando un conjunto de operaciones intelectuales donde se busca describir y representar de forma sistemática los documentos consultados y compilados, donde se extrae información científica e informativa dando reflejo al objetivo fundamental de la búsqueda (82). Por lo tanto, el análisis documental abarca tanto la identificación externa como la descripción física del documento con información como nombre del autor, título, editorial, nombre de revista, año de publicación, etc., y también comprende la presentación conceptual del contenido o temática. Rubio Liniers, 2004 (83).

5.2 UNIVERSO, POBLACIÓN, MUESTRA

5.2.1 UNIVERSO

Documentos científicos de los últimos 5 años publicados sobre el empleo de microorganismos con capacidad de Biorremediación de cadmio presente en suelo, estrategias de biorremediación y los efectos tóxicos a la salud humana.

5.2.2 POBLACIÓN

Bases de datos (Google académico, PubMed, Medline, Science Direct, entre otros) y artículos de revistas científicas relacionadas con el tema de biorremediación y bioadsorción de cadmio, Biolixiviación, Biotransformación, Bioaumentación, Bioestimulación de cadmio, microorganismos biotransformadores de metales pesados, fuentes de contaminación, toxicidad y consecuencias en la salud del ser humano y páginas de empresas industriales que tiene productos de base biotecnológica para la degradación de metales pesados en el suelo y libros gratuitos en línea disponibles en Google books.

5.2.3 MUESTRA

Bases de datos bibliográficas donde se encuentran temáticas relacionadas con biorremediación de cadmio, bacterias, hongos y otros utilizadas en procesos de bioadsorción, biolixiviación, fitorremediación, bioacumulación, genes específicos presentes en los microorganismos con capacidad de bioadsorción, implicaciones a

la salud humana del consumo de alimentos contaminados con cadmio, efectos negativos en el ecosistema o en las plantas. Documentos publicados desde el año 2016.

- ✓ Sciedirect
- ✓ Scielo
- ✓ Pubmed
- ✓ Dialnet
- ✓ Doaj
- ✓ Taylor & Francis
- ✓ Royal Society of Chemistry
- ✓ Buscador de Google
- ✓ Ministerio de salud colombiano
- ✓ Organización mundial de la salud.

Los documentos que se aceptan deben cumplir con los datos necesarios (Años, autor, título, revista, libro, editorial, o institución, volumen o número o similares y el material debe poder descargarse en PDF, Word u otros que se puedan revisar en línea).

El material se debe clasificar según el tipo de documento, país, año de publicación en relación con las temáticas descritas.

5.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS OBJETOS DE ESTUDIO

En la elaboración de la presente revisión se tomaron en cuenta diferentes criterios y parámetros mencionados a continuación:

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL: Cadmio, fuentes de Cd, toxicidad, salud, fitorremediación, bioacumulación. biosorción, bioestimulación, microorganismos, suelo

PALABRAS CLAVE EN INGLÉS: Cadmium, source, toxicity, health, phytoremediation, bioaccumulation. biosorption, biostimulation, microorganisms, soil,

5.4 CRITERIOS DE INCLUSIÓN O EXCLUSIÓN.

Inclusión: Artículos científicos debidamente referenciados y citado mínimo una vez, bases de datos que otorguen información verídica que pueda ser comprobada experimentalmente. Para la elección de los artículos, se debe tener en cuenta que sean artículos escritos como resultado de una investigación aplicada, informes gremiales basados en información oficial, monografías de grado y libros con contenido temático acorde. Los manuales y normativas se aceptan de años antes del 2015

Exclusión: Publicaciones sin autores referenciados ni fecha de publicación, que no brinden una información verídica y que no pueda ser verificada por carecer de los datos necesarios. Publicaciones anteriores al año 2016, con excepción de

documentos oficiales que brinden información sobre normativa, o artículos con información que brindan información verídica sobre procesos de biorremediación de cadmio en suelos.

5.5 TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS

Recopilación de la información: Los documentos fueron recopilados de diferentes bases de datos, incluyendo:

- ✓ PubMed: Es un buscador gratuito en internet con acceso a citas, resúmenes y publicaciones en bases de datos como MEDLINE y OLDMEDLINE que contienen artículos de temas biomédicos publicados en revistas indexadas
- ✓ ScienceDirect: Es una base de datos que alberga publicaciones académicas y libros electrónicos sobre investigación científica y médica.
- ✓ Scielo: Es una base de datos bibliográficos, biblioteca digital y un modelo de editorial y publicación cooperativa de revistas de libre acceso.

5.6 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se realizó un análisis multicriterio de la revisión documental realizada según distribución por países de las publicaciones, tipo de publicación, temáticas más encontradas, reporte de microorganismos y plantas biorremediadoras, estrategias de biorremediación, fuentes de exposición por cadmio en el suelo, se identificaron las consecuencias que representa dicha exposición de cadmio en la salud humana.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Recopilación, clasificación y análisis de la información.

De las 82 de referencias recuperadas, tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se evidencian los porcentajes obtenidos, 82.60 %, 6.73% y 10.57% correspondientes a artículos científicos, documentos oficiales (emitidos por la OMS, Federaciones, INVIMA, DEVIDA, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, reglamentos oficiales, entre otros) y documentos académicos de universidades de américa latina (Figura 8).

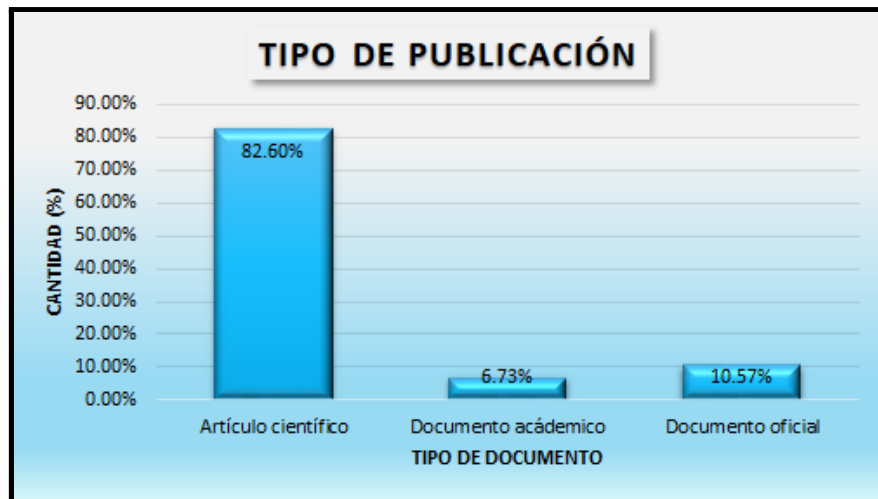


Figura 13. Tipo de publicación. Fuente: elaboración propia basada en la revisión documental

Respecto a la cantidad de publicaciones encontradas por país en la investigación, se evidencia que China es el país de donde más se obtuvo información con 22% del total de las publicaciones revisadas, seguido de Perú, Colombia, México con 13.5%, 10.1%, 9.3% y 8.4% respectivamente, seguido de Polonia, India, Francia y Brasil con 6.7 % cada uno, Chile y Argentina con 5%, el de más bajo porcentaje fue Canadá con 1.6% como lo muestra la figura 14.



Figura 14. Porcentajes de publicación revisada por país. Fuente: elaboración propia basada en la revisión documental

Ahora bien, el idioma de las fuentes de información consultadas, fue inglés en un 59% y español en 41%. Del idioma inglés fueron consultadas las bases PubMed, ScienceDirect, Taylor & Francis, The Royal Society of Chemistry's y otras. Los documentos de español fueron obtenidos de Dialnet, Scielo y el buscador de Google los cuales incluyen trabajos de grado de universidades latinoamericanas y artículos

científicos de países de habla hispana como México, Perú, Colombia, Cuba y Argentina. (Figura 15)

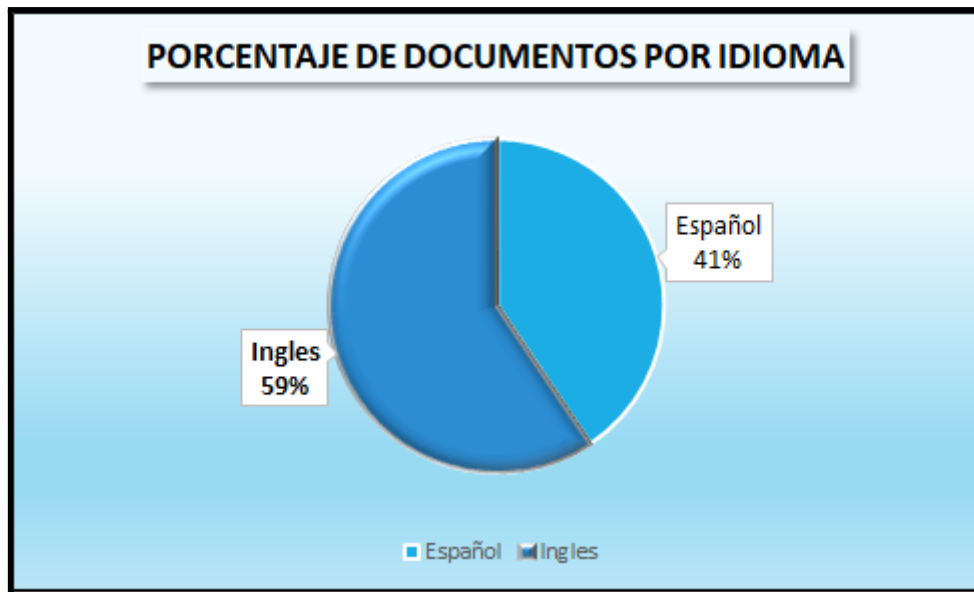


Figura 15. Información encontrada en las bases de datos por idioma. Fuente: elaboración propia basada en la revisión documental.

La fuente de información provino de la búsqueda en bases de datos, se encontró información científica sobre el tema del presente trabajo, procesos de biorremediación de Cd, microorganismos que participan en la biorremediación, plantas con capacidad de bioacumulación del metal, así mismo se realizó la recuperación de documento oficiales con normativa vigente respecto al contenido de Cd de la Unión Europea, Codex Alimentarius y otros, los anteriores fueron encontrados en el buscador de Google con un 20% del total de la información, valga aclarar que de este buscador también se obtuvo toda la información de las bases de datos pero se excluyeron en el porcentaje. Para elaborar el marco teórico y los resultados se obtuvo información de PubMed 35.2%, ScienceDirect 22.3%, Scielo 12.9%, Dialnet 4.7%, Taylor & Francis 2.35%, The Royal Society of Chemistry's 1.17% y Doaj 1.17%.

Porcentaje de documentos

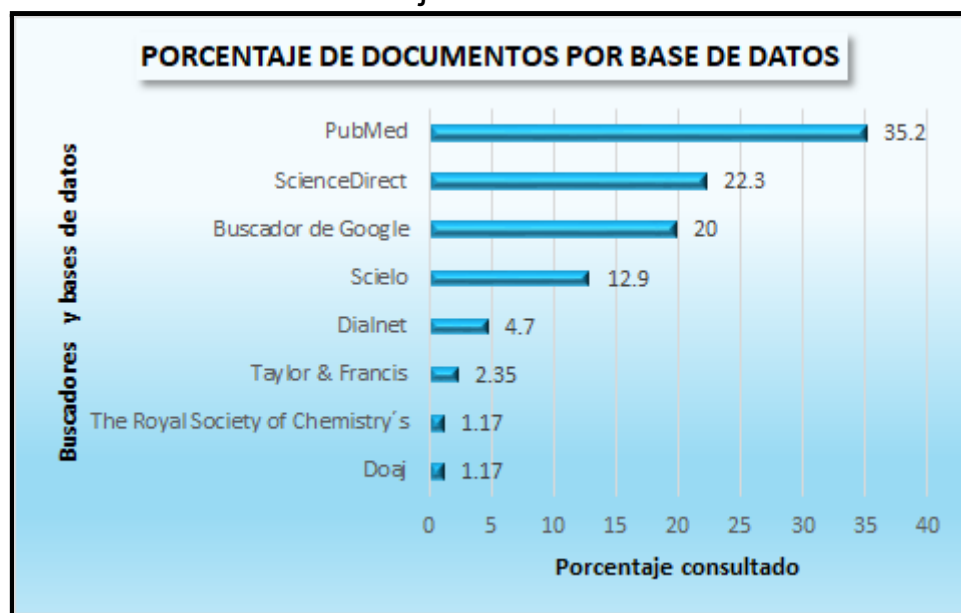


Figura 16. Información encontrada en las bases de datos por bases de datos o buscadores. Fuente: elaboración propia

La información seleccionada de antes del 2015 corresponde a documentos oficiales, manuales de cultivo, guía de buenas prácticas de manufactura, excepto algunos artículos usados en los antecedentes. La mayor cantidad de publicaciones están entre los años 2016 a 2021 con publicaciones correspondientes a artículos científicos (Figura 12).

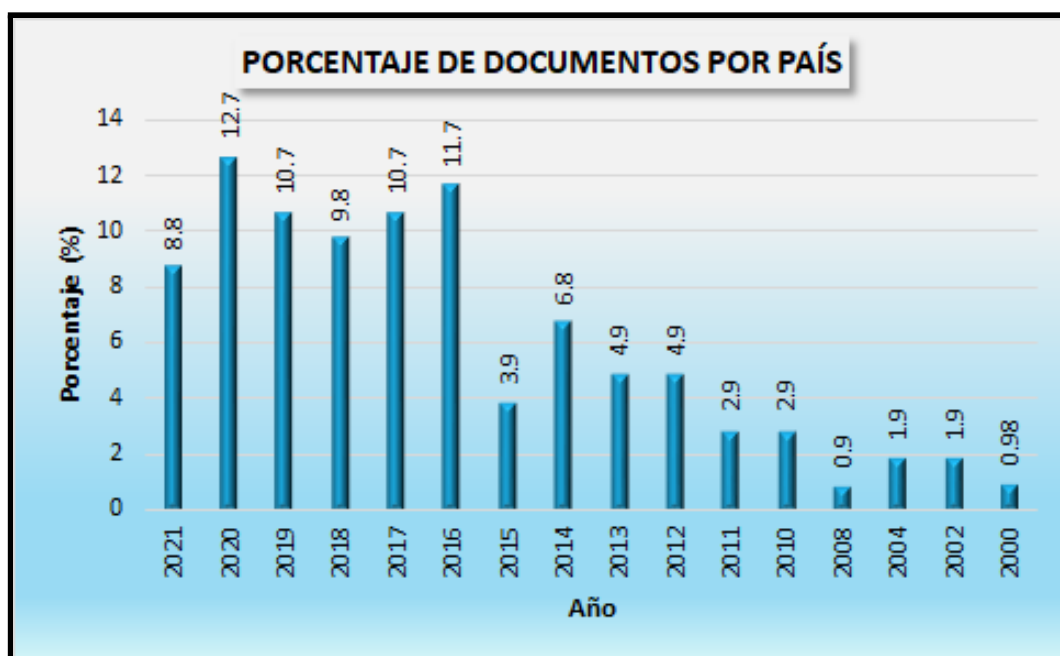


Figura 17. Año de publicación información. Fuente: elaboración propia

La información recopilada en América Latina, corresponde a la mayoría de bibliografía revisada, lo cual se puede atribuir a que varios países son pioneros en la

exportación de productos agrícolas a nivel mundial, la poca información recolectada de otros continentes se da como respuesta a los criterios de exclusión, ya que cuando se dio búsqueda con las palabras clave, aparecen bastantes documentos, pero al excluir, la búsqueda se redujo a menos del 10 %.

La normativa de la UE sembró una alarma en los países, llevando así a realizar investigación recién se dio a conocer el reglamento (UE) No 488/2014 DE LA COMISIÓN de 12 de mayo de 2014, el cual empezaba a regir desde el 2019, como consecuencia de esto la investigación sobre este tema comienza a surgir a partir del año del reglamento (2014).

6.2 Consecuencias de la exposición de Cd en la salud humana.

La toxicidad reproductiva masculina se relaciona por el daño estructural producido en la vasculatura testicular, asimismo, en la barrera hemato testicular, lo que conduce a una inflamación (48). El cadmio tiene la capacidad de pasar barrera placentaria y ser tóxico para la placenta por acumulación en esta y en tejidos fetales, a su vez puede conducir a partos prematuros y bajo peso al nacer, de tal forma que cuando aumenta la concentración de cadmio en sangre (28) (84), disminuye el peso. También afecta el metabolismo de aminoácidos y purinas (84), causa además citotoxicidad en células de Sertoli y Leydig llegando a apoptosis mediante (reactive oxygen species) ROS (84). A continuación, se presenta un diagrama de resumen de las principales afectaciones que tiene la salud humana asociada al cadmio.

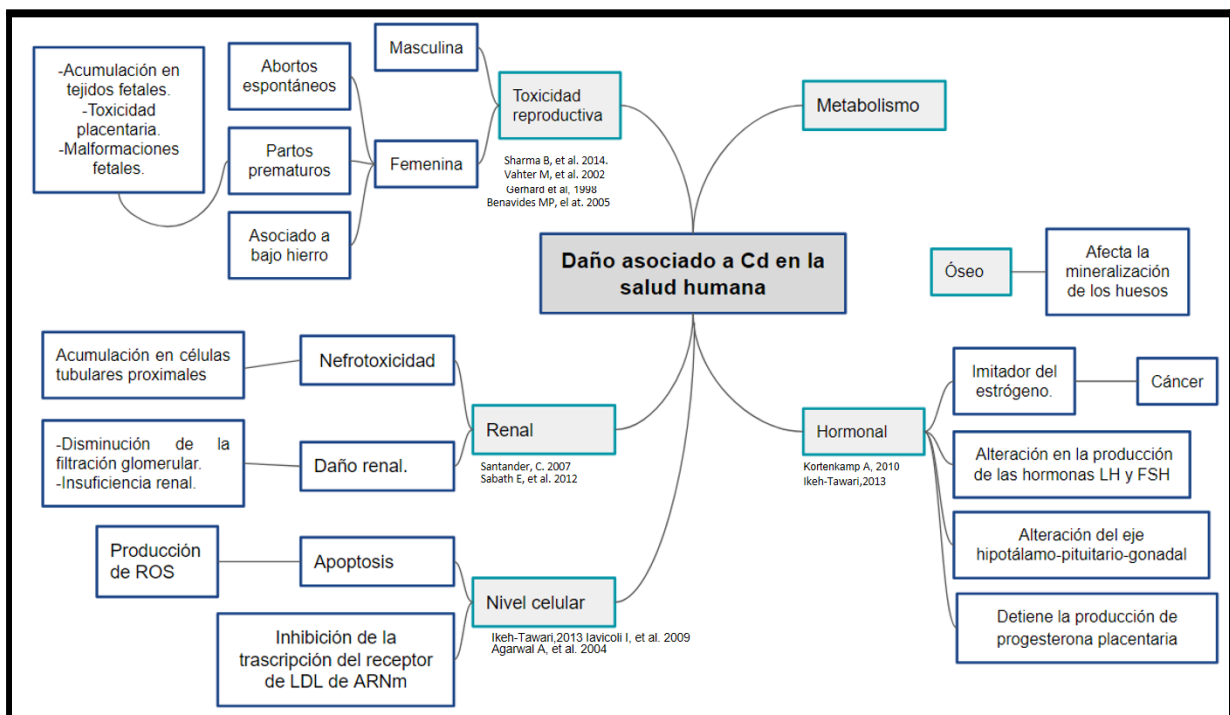


Figura 18. Afectaciones asociadas a Cd en la salud humana. Fuente: elaboración propia basado en la revisión bibliográfica.

De las 25 referencias bibliográficas revisadas sobre las posibles enfermedades asociadas al Cd en el ser humano, se evidencia que el mayor porcentaje está entre alteraciones a nivel placentario, fetal y abortos con 28%, seguido de alteración renal, ósea, reproductiva y hormonal con 20%. El 24 % corresponde a concentración de Cd asociado a la edad, apoptosis, citotoxicidad y finalmente como posible agente carcinógeno con 8%. Ver tabla 12

Figura 19. Porcentaje de literatura revisada según enfermedad asociada al Cd. Fuente: elaboración propia basada en la revisión bibliográfica.

Asociado a	Porcentaje %
Renal y óseo	20
Reproductivo y hormonal	20
Placentario, fetal y abortos	28
Cáncer	8
Otros (Náuseas, vómitos, dolor abdominal, diarreas)	24
	100 %

6.3 Fuentes de contaminación por Cd en el ser humano.

En el análisis bibliográfico realizado los autores describen diferentes focos de exposición para el ser humano (Ver diagrama 2), un factor es la contaminación del aire, debido a la actividad de la industria y el humo de cigarrillo, como bien lo manifiesta Rodríguez et al. el Cd es uno de los elementos constitutivos de este, cada cigarrillo contiene 1.2 ug de Cd, del cual se inhala 0.1-0.2 ug. La vía de exposición para personas no fumadoras es por la ingesta de Cd por alimentos contaminados, como lo indica Rodríguez et al. (11), la absorción gastrointestinal alcanza hasta un 5 % de la ingestión total de cadmio, mientras la absorción por los pulmones podría alcanzar hasta un 50 % del total.

Estos (heavy metals) HM provienen a su vez de suelos con contenido de Cd trasladado a la planta, como el caso del cacao y cereales (Marini,(17)), otra fuente es la industrial, de acuerdo con Alloway (9), entre esta se encuentra la fundición, refinación de metales, quema de combustibles fósiles, pigmentos de plásticos, haciendo parte de fabricación de aparatos electrónicos, entre otros. El Cd se encuentra de forma natural asociado a rocas de fosfato (Bolan, (85)) y minerales. A su vez está relacionado con aguas residuales domésticas e industriales contaminadas.

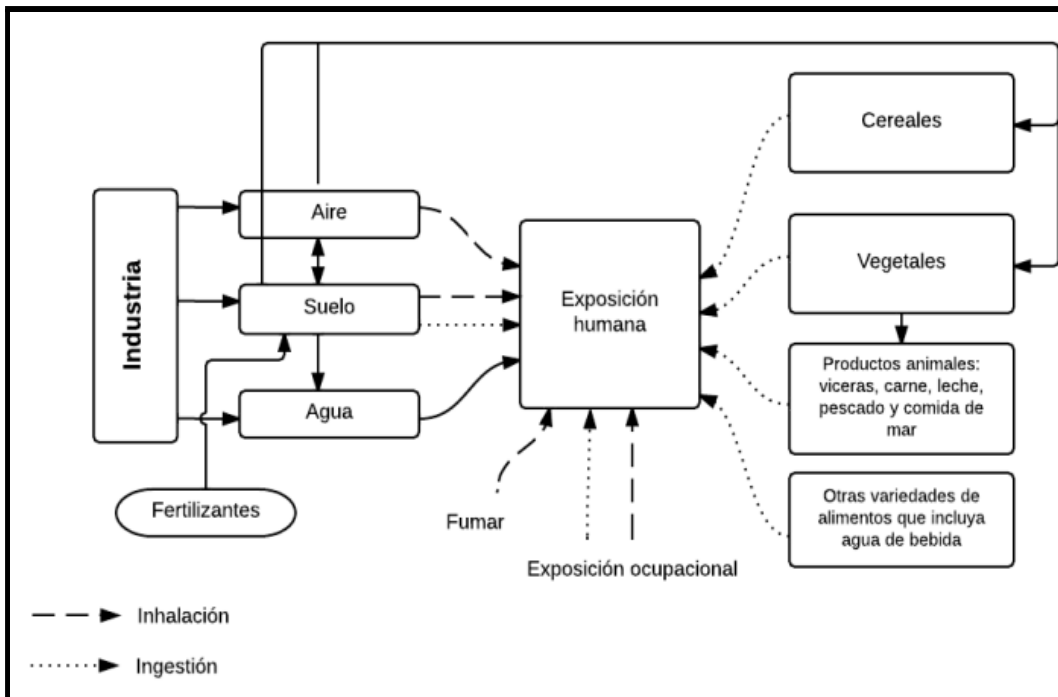


Figura 20. Fuentes de exposición por Cd en el ser humano. Tomado y modificado de Invima, 2016 (86)

Las fuentes de contaminación de Cd, desembocan en su mayoría en los alimentos, ya que la propiedad química del Cd le permite disolverse en el agua y está a su vez se filtra en los suelos, donde la plata termina absorbiendo y almacenando este metal pesado, ingresando así a la cadena trófica, bien sea por que los humanos consumen plantas con Cd o animales alimentados de estas plantas. Como lo manifiestan Cristaldi(14), una vez absorbido el Cd tiene una vida media muy larga, puede durar de 1 a 3 décadas en el cuerpo humano (Zeng, (84)), así mismo, el Cd está implicado en el desarrollo de cáncer por consumo de alimentos contaminados con este, produciendo daño óseo, renal, toxicidad reproductiva masculina, femenina, placentaria y fetal.

6.4 Procesos de biorremediación

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de la revisión respecto a los procesos de biorremediación *in vitro* teniendo en cuenta diferentes variables. Dichos procesos incluyen fitorremediación, biosorción, biolixiviación y bioacumulación.

Figura 21. Descripción de diferentes técnicas utilizando diversos organismos para la eliminación de Cd de diferentes sustratos. Fuente: elaboración propia basada en la revisión bibliográfica.

TÍTULO	TÉCNICA	MICROORGANISMOS	PLANTA	% DE ELIMINACIÓN DE CD	CONCENTRACIÓN DE CD INICIAL	MEDIO DE CULTIVO EXPERIMENTAL	VARIABLES FÍSICO QUÍMICAS DEL CULTIVO			LUGAR	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
							T°	pH	OTRA		
Phytoremediation potential of Arundo donax (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals.	FITOREMEDIACIÓN	Arundo donax	<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> y <i>Wickerhamomyces anomalous</i>	% de acumulación: <i>T. harzianum</i> Cd (72%) <i>S. cerevisiae</i> Cd (71%) <i>W. anomalous</i> ; 60%. BAF A. donax: 0.50, A. donax+ <i>T. harzianum</i> con 0.30mg/20mL de Cd es 0.42; con 0.30 de Cd el BAF para A. donax + <i>T. harzianum</i> y A. donax es de 0.44 y 0.35 respectivamente. Valores de TF: 0.70	0.24, 0.30, 0.45, 0.52 mg/20 mL.	Suelo	26°C	-	Tiempo: 96 h	Italia	(14)

<p>Applicati on of Festuca arundina cea in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons.</p>	<p>FI TORREME DIAC IÓN</p>	<p>Festuca arundinacea</p>	<p>Cd (26,3-46,7%). TF: Cd (0.21-0.25)</p>	<p>15.6m g/kg</p>	<p>Suelo</p>	<p>- -</p>	<p>- -</p>	<p>Cosec ha a los 6 meses</p>	<p>P o l i o n i a</p>	<p>(36)</p>
<p>X-ray absorption spectroscopy evidence of sulfur-bound cadmium in the Cd-hyperaccumulator Solanum nigrum and the non-accumulator Solanum melongena.</p>	<p>FI TORREME DIAC IÓN</p>	<p>Solanum nigrum - Solanum melongena</p>	<p>-----</p>	<p>100 mg /kg</p>	<p>2 cm de arena en el fondo y ~ 500 g de suelo de control o dopado con Cd incubado en cada maceta</p>	<p>24 ° C</p>	<p>- -</p>	<p>Cosec ha a las 14 semanas</p>	<p>F r a n c i a</p>	<p>(57)</p>
<p>Potencial fitorremediador de la chicura (Ambrosia ambrosioides) en suelos contaminados por metales pesados.</p>	<p>FI TORREME DIAC IÓN</p>	<p>Ambrosia</p>	<p>Cumulación de 40 (mg L-1) en raíz, 243.7 mg / kg-1 en tallo</p>	<p>0, 20, 40, y 60 mg L-1</p>	<p>Arena lavada al 80% y perlita (20%)</p>	<p>- -</p>	<p>- -</p>	<p>Planta s regadas con soluci ón nutritiva Steiner / 21 días</p>	<p>M é x i c o</p>	<p>(76)</p>

	Ó N	<i>i o i d e s</i>								
Fitorremediación con Maíz (Zea mays L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados.	FI TO R R E M E D I A C I Ó N	<i>Z e a m a y s L</i>	Raíces 91 %, hojas 6 % y tallos 3 %	Valle de Manta ro: 6,76m g/ kg. Muqui : 8, 26 mg/kg . (Comp ost y vermic ompos t Cd: 39,25 mg/kg)	--	-	V a l l e d e M a n t a r o : 7 , 3 0 . M u q u i : 7 , 8 5	Muqui: franco areno so. Valle de Manta ro : Franc o arcillo so.	P e r ú	(86)
Cupriavidus necator strains: zinc and cadmium tolerance and bioaccumulation.	B I O A C U M U L A C I Ó N	<i>C u p r i a v i d u s t a i w a n e n s</i>	Concentración Cd: Cd = 12.4 mg dm ⁻³	Conce ntracio nes de Cd 9.14 µmol L ⁻¹ (9.0 Zn + 0.14 Cd); 91.4 µmol L ⁻¹ (90 Zn + 1.4 Cd); 914 µmol L ⁻¹ (900 Zn +	Cultiv o [Luria- Berta ni.	2 8 . C	p H 7 , 8 6	Hume dad del suelo 70 % .Tiem po de incub ación: 120 hrs	B r a s i l / S u d a m e r i c a	(34)

		is			14 Cd); nd 9,140 μmol L ⁻¹ (9,000 Zn + 140 Cd)					
In Vitro Bioadsorption of Cd ²⁺ Ions: Adsorption Isotherms, Mechanism, and an Insight to Mycoremediation	BIOACUMULACIÓN		<i>Trichoderma fasciculatum</i> y <i>Trichoderma longibrachiatum</i>	T. fasciculatum: 67.10%. T. longibrachiatum 76.25%	g 25, 50, y 75 mg/L of Cd ²⁺	PDA	30°C	pH: 5.0 el tiempo de incubación: 120 h	China	(87)
Identification of cadmium bioaccumulation in rice (<i>Oryza sativa</i> L.) by the soil-plant transfer model and species sensitivity y distribution	BIOACUMULACIÓN		<i>Oryza sativa</i> L	El valor promedio y la transferencia de gran TF de los cultivares en el grado 5 fueron 1.4–7.9 y 1.5–5.7	2,90 concentración de Cd (mg / kg)	-	-	pH 5 que a pH 6, 7 y 8. Las muestras de suelo se digirieron con una solución de mezcla de HNO ₃ -HClO ₄ -HF	China	(88)

Lead, cadmium and mercury contents and bioaccumulation potential of wild edible saprophytic and ectomycorrhizal mushrooms, Croatia	BIOACCUMULACIÓN	<i>Agaricus campestris</i> - <i>Bolotus edulis</i> . - <i>L. deterrimus</i>	8,93 mg kg ⁻¹ de biomasa seca)	Cd (0,22-0,79 mg kg ⁻¹)	-	-	pH 6,67	secar en horno (48 h; 60 ° C) la materia orgánica del suelo (2 g secada al aire) a 550 ° C durante 16 h en un horno Horn	Croatia	(4)
Biosorption and bioaccumulation characteristics of cadmium by plant growth-promoting rhizobacteria	BIOACCUMULACIÓN	<i>Cupriavidus necator</i> GX_5, <i>Sphingomonas</i> sp. GX_15 y <i>Curtobacterium</i> sp. GX_31	- capacidad máxima de adsorción fueron 7.97, 17.13 y 26,43 mg g ⁻¹ de GX_5, GX_15 y GX_31 con 100 mg l ⁻¹ de Cd (II)	Cd, viz., 20, 50, 100, 150, 200 and 250 mg/L,	medio LB	30°C	pH 5	agitador rotatorio a 28 ° C y 180 rpm	China	(4)

Aislamiento de cepas fúngicas de una poza de relaves para la biorremediación de plomo y cadmio	B I O S O R C I Ó N		<i>Rhizopus</i> <i>sp</i> y <i>Aspergillus</i> <i>niger</i>	69,23%	100 ppm	--	T ° : a m b i e n t e	p h 5	Edad fisiológica del cultivo: 4, 8, 20 y 24 hrs.	p e r ú / A m e r i c a l a t i n a	(49)
Tolerance of Trichoderma isolates to increasing concentrations of heavy metals	B I O S O R C I Ó N		<i>Trichoderma</i> <i>(T. harzianum</i> y <i>T. viridescens)</i>	----	0; 0.25; 1.0; 5.0; 10.0 mgL ⁻¹	BDA	2 5 ± 2 ° C	- -	--	B r a s i l / S u d a m e r i c a	(56)
Comparison of tolerance and biosorption of three trace metals (Cd, Cu, Pb) by the soil fungus Absidia cylindrospora	B I O S O R C I Ó N		<i>Absidia</i> <i>cylindrospora</i>	- ----	(50 y 100 mg L ⁻¹	--	- -	- -	3-7 días de exposición	F r a n c i a / E u r o p a	(58)

Optimization of copper, lead and cadmium biosorption onto newly isolated bacterium using a Box-Behnken design	B I O S O R C I Ó N		<i>Pseudomonas azotiformans</i>	----	(100 mg / L	YPG, Cyganow y PDB	- -	p h 6 . 0	--	P o l o n i a / E u r o p a	(89)
Bioadsorption and biostabilization of cadmium by Enterobacter cloacae TU	B I O S O R C I Ó N		<i>Enterobacter cloacae TU</i>	----	20, 50, 100, 150, 200 y 250 mg	--	3 0 . C	- -	-velocidad de rotación de 170 rpm	B e i j i n g / C h i n a	(62)
Response of the biominer Acidithiobacillus ferrooxidans to high cadmium concentrations	B I O L I X I V I A C I Ó N		<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Una concentración de CdSO4 de 75 mM.	--	Luria-Bertani (LB)	3 0 . C	p h 1 . 4 5 - 8	--	C h i l e / E p a ñ a	(90)

La revisión realizada describe que los procesos de remediación tienen variables importantes para su aplicación como el pH y la temperatura que influyen en el metabolismo de los microorganismos y plantas, así mismo en el resultado final respecto a la biorremediación de Cd tal como lo refiere la tabla 13. Teniendo en cuenta la información obtenida, el pH empleado en las técnicas está entre 5.0 a 8.0, pero el rango de pH más utilizado, independiente del método y el microorganismo o planta empleada, fue de 5.0 a 6.0 con un porcentaje de 45.4% del total de autores referenciados. Así mismo la temperatura más referenciada por los autores estuvo entre los rangos de 24°C – Mayor de 30°C. Ver tabla 14.

Figura 22. Porcentajes de frecuencia de rangos de pH y temperatura utilizados por los autores revisados. Fuente: elaboración propia basada en la revisión bibliográfica.

Rango	Porcentaje	Rango	Porcentaje
pH	%	Temperatura	%
5.0 - 6.0	45.4	24 – 26	33.3
6.1 - 7.0	18.1	28 – 30	55.5
7.2 - 8.0	36.3	> 30	11.1

Teniendo en cuenta la revisión hecha de las técnicas de biorremoción de Cd, como lo muestra el gráfico 2, se encontró más información del proceso de fitorremediación con un 27.3%, seguido de Bioacumulación y bioadsorción con 24.2% cada una, biolixiviación con 18.2% y por último biotransformación y bioaumentación con 3.03% cada uno. De los dos últimos se obtuvo bajo porcentaje debido a que sólo se mencionaron, pero no se profundizaron a diferencia de los otros procesos.

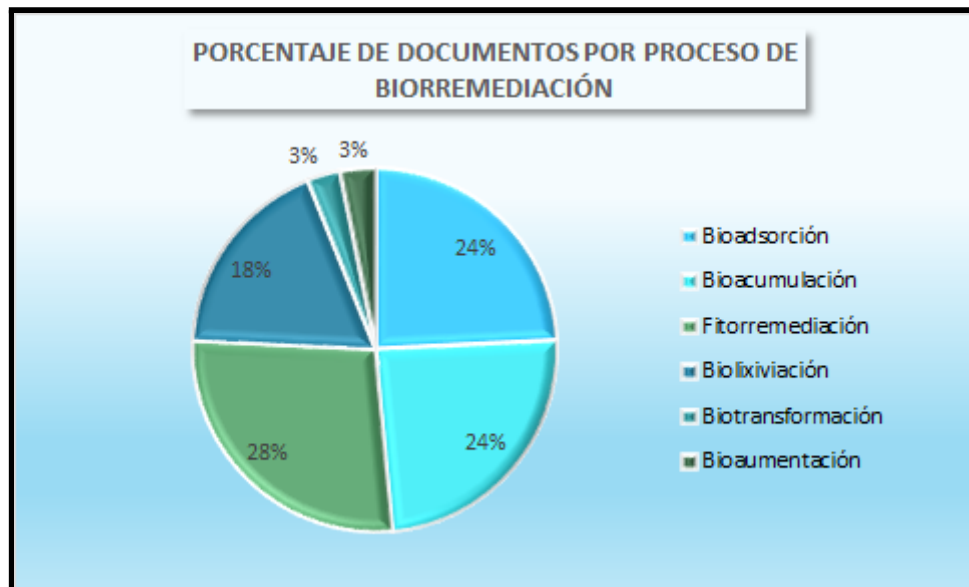


Figura 23. Porcentaje de documentos revisados por proceso de biorremediación. Elaboración propia.

6.5 Microorganismos utilizados en los procesos de biorremediación.

Teniendo en cuenta la información recopilada en el presente trabajo, las bacterias, hongos y plantas con capacidad para ser utilizados en dichas técnicas según los autores son mencionados a continuación:

Figura 24. Microorganismos y plantas utilizados en los procesos de biorremediación. Fuente: elaboración propia basada en la revisión bibliográfica.

FITORREMEDIACIÓN

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA	BIBLIOGRAFÍA
Maíz	<i>Zea mays L.</i>	Poaceae (gramineas)	(86)
Arroz	<i>Oryza sativa L</i>	Poaceae (gramineas)	(88)
Chicura	<i>Ambrosia ambrosioides</i>	Asteráceas	(24)
Caña común	<i>Arundo donax</i>	Poaceae (gramineas)	(14)
Cilantro	<i>Coriandrum sativum</i>	Apiaceae	(34)
Tomate	<i>Solanum lycopersicum</i>	Solanaceae	
Berenjena	<i>Solanum melongena</i>	Solanaceae	
Festuca alta	<i>Festuca arundinacea</i>	Poaceae (gramineas)	(36)
Hierba mora	<i>Solanum nigrum</i>	Solanaceae	(57)
	<i>S. melongena</i>	Solanaceae	
MICORREMEDIACIÓN			
NOMBRE CIENTÍFICO		FAMILIA	BIBLIOGRAFÍA
<i>Rhizopus sp</i>		Mucoraceae	(49)
<i>Aspergillus flavus</i>		Trichocomaceae	(45)
<i>Aspergillus niger</i>		Trichocomaceae	(49)
<i>Cladosporium sphaerospermum</i>		Davidiellaceae	(34)
<i>Trichoderma harzianum</i>		Hypocreaceae	(14)
<i>Alternaria alternata</i>		Pleosporaceae	(63)
<i>Trichoderma harzianum</i>		Hypocreaceae	(56)
<i>Trichoderma virens</i>		Hypocreaceae	(56)
<i>Penicillium aurantogriseum</i>		Trichocomaceae	(63)
<i>Rhizopus stolonifera</i>		Mucoraceae	(49)
<i>Fusarium sp,</i>		Nectriaceae	(11)
<i>Myrothecium sp.</i>		Incertae sedis	(11)
<i>Fusarium oxysporum</i>		Nectriaceae	(34)
<i>Aspergillus fumigatus.</i>		Trichocomaceae	
<i>Penicillium sp CN35</i>		Trichocomaceae	
<i>Absidia cylindrospora</i>		Mucoraceae	(58)
<i>Trichoderma fasciculatum (Glomus f.)</i>		Hypocreaceae	(91)
<i>Trichoderma longibrachiatum</i>		Hypocreaceae	(91)
<i>Agaricus campestris</i>		Agaricaceae	(4)

<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<i>Saccharomycetaceae</i>	(19)
<i>Boletus edulis</i>	<i>Boletaceae</i>	(4)
<i>Lactarius deterrimus</i>	<i>Russulaceae</i>	(4)
BIORREMEDIACIÓN		
NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA	BIBLIOGRAFÍA
<i>Rhodococcus opacus</i>	<i>Corynebacteriaceae</i>	(19)
<i>Enterobacter cloacae</i>	<i>Enterobacteriaceae</i>	(52)
<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Bacillaceae</i>	(34)
<i>Streptococcus equisimilis</i>	<i>Streptococcaceae</i>	(64)
<i>Chelatococcus daeguensis TDA1</i>	<i>Hyphomicrobiaceae</i>	(62)
<i>Cupriavidus taiwanensis</i>	<i>Burkholderiaceae</i>	(62)
<i>Deinococcus radiodurans</i>	<i>Deinococcaceae</i>	(37)
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	(34)
<i>Pseudomonas aeruginosa PSK3</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	(34)
<i>Pseudomonas azotoformans</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	(89)
<i>Pseudomona aeruginosa</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	(61)
<i>Cupriavidus necator</i>	<i>Burkholderiaceae</i>	(92)
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	<i>Enterobacteriaceae</i>	(34)
<i>Sphingomonas sp.</i>	<i>Sphingomonadaceae</i>	(62)
<i>Curtobacterium</i>	<i>Microbacteriaceae</i>	(62)
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	<i>Acidithiobacillaceae</i>	(90)
<i>Burkholderia sp.</i>	<i>Burkholderiaceae</i>	(55)
<i>Serratia liquefaciens</i>	<i>Yersiniaceae</i>	(34)
<i>Burkholderia sp.</i>	<i>Burkholderiaceae</i>	(55)
<i>Pseudomonas sp. cepa Al-Dhabi-126</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	(34)
<i>Pantoea agglomerans UCP1320</i>	<i>Erwiniaceae</i>	(34)

La interacción entre las bacterias, hongos y plantas con el metal pesado depende de la pared celular, cuando hablamos de bacterias Gram negativas como lo reporta Costa y Tavares, 2016(48) con *Streptococcus equisimilis* su pared está compuesta principalmente por peptidoglicano, el cual tiene asociados grupos carboxilo y ácidos teicoicos los cuales poseen alto contenido de grupos fosfatos con carga negativa, esta carga da la facilidad de reacción y captura de los iones metálicos. Otros grupos que pueden estar presentes en esta estructura y constituyen sitios activos para el enlace de iones metálicos son: aminos, hidroxilos, sulfatos (85) y glicoproteínas que proporcionan sitios potentes para la unión de metales. Respecto a plantas se sabe que hay varios mecanismos para que se dé la entrada del Cd como intercambio iónico (73), transportadores de metales esenciales (48) o complejos con proteínas tipo YSL (48). En la recopilación hecha por Cayotopa et al. (25) para los hongos se han postulado una serie de mecanismos, entre los cuales están incluido: unión extracelular, absorción reducida, salida de metal, quelación intracelular o compartimentación en las vacuolas por gránulos de polifosfato, por ejemplo en el

hongo *Paxillus involutus*, los mecanismos de tolerancia al Cd son la complejación por metalotioneínas (MT) o por compuestos fenólicos.

La mayoría de los microorganismos y plantas mencionados por los diferentes autores revisados en este estudio, tuvieron la capacidad de biorremediar el metal pesado, constituyendo así una fuente biológica prometedora para eliminar, remediar, recuperar o desintoxicar suelos contaminados con Cd. Dicha captura, varía acorde al bioinsumo, las características propias de cada uno, el metabolismo, las condiciones de crecimiento, la biomasa y el factor de translocación, en el caso de las plantas.

Respecto a las bacterias empleadas en los documentos revisados, la mayor familia empleada fue *Pseudomonadaceae*, mencionada en 5 publicaciones, seguido de *Burkholderiaceae* en 4, *Enterobacteriaceae* con 2. Ahora bien, en lo que respecta a los hongos las familias *Hipocreaceae* y *Trichocomaceae* fueron mencionadas por 5 autores cada una, seguido de *Mucoraceae* y *Nectriaceae* en 3 y 2 publicaciones respectivamente. En las plantas, las gramíneas (familia *Poaceae*) fueron las más frecuentes con 4 referencias y las *Solanaceae* con 3, el resto de familias no mencionadas, tanto de bacterias, hongos y plantas sólo fueron referenciadas 1 vez.

Las plantas han desarrollado una variedad de mecanismos para asimilar los metales pesados de los ambientes como el suelo y agua con características físicas y químicas muy diferentes, dependientes de sus características genéticas las cuales desarrollan procesos de absorción, transformación y almacenamiento en su tejido vegetal. Es un proceso biorremediador *in situ* o directo en el suelo con distintos tipos de técnicas como fitoextracción, la cual es la más común, como su gran exponente *Oryza sativa* (arroz) o *Zea mays L* (maíz) ejemplares de la fitoextracción técnica que consiste en la absorción mediada por las raíces de la misma, que luego es almacenado en su parte aérea o su fruto en menor medida, dando solución a contaminantes que no pueden ser degradados.

De la revisión realizada respecto al proceso de fitorremediación se logra un buen porcentaje de bioacumulación (63.3%), los autores usaron *Arundo donax*, *Festuca arundinacea*, *Solanum nigrum*, *S. melongena*, *Ambrosia ambrosioides*, *Zea mays L.*, *Oryza sativa L*, se observó que la mayoría de las plantas eran de la familia de las gramíneas, se trata de una familia (*Poaceae*) de plantas con más de 12.000 especies, en su mayoría herbáceas, muy cosmopolitas, ocupando una quinta parte de la vegetación de la tierra, entre ellas está Alpiste, arroz, avena, bambú, cebada y otras, también encontramos *Zea Mays L* (maíz) la cual fue cosechada a los 4 meses de ser sembrada y tratada con compost, vermicompost y un tratamiento químico, concluyendo que esta planta tiene alta capacidad asimilativa y de absorción de Cd en suelos arcillosos y representa un fácil manejo del cultivo.

Con respecto a *A. donax*, esta posee una facilidad de manejo, ya que en la cadena alimenticia no tiene un valor significativo como alimento de otras especies, por lo tanto, la acumulación de Cd que hace no representa toxicidad para los animales, pero tiene una desventaja: la lentitud del proceso de biorremediación, es por ello que Cristali y colaboradores reportaron una investigación en simbiosis la cepa *T. harzianum T22*, la cual fue seleccionada debido a su capacidad de crecer y

desarrollarse en diferentes condiciones respecto a pH (ácido y básico), textura (arenoso o arcilloso) y diferentes niveles de nutrición del suelo [Harman et al., 2004], obteniendo buenos resultados con respecto a la acumulación de Cd, cerca de 67.66% logró ser biorremediado.

Ahora bien, el factor de translocación (TF) de Cd comprende la relación entre la cantidad de cadmio traslocada desde las raíces hasta las partes altas de la planta, debe ser menor a 1, según Steliga et al. (36) la planta que sobresale por evidenciar poca translocación de Cd es *Festuca arundinacea* con un TF de 0.28, seguido de 0,31 para *S. nigrum* y 0,24 para *S. melongena* (Pons et al. (57)) y Cristaldi(14) reportaron un TF de 0.70 para *A. donax* y finalmente *A. ambrosioides* quien posee mayor facilidad para traslocar Cd, evidenciando esto en el valor de TF: 4.85.

De igual forma Kumar et al. (34) recopilaron la concentraciones de cadmio en las plantas comestibles como cilantro (*Coriandrum sativum*), tomate (*Solanum lycopersicum*) y berenjena (*Solanum melongena*), demostraron que su remediación de cadmio fue menor y sin mayor importancia, pero conlleva a un peligro alimentario, debido al contenido de Cd, la berenjena en su fruto pudo remediar por acumulación, 5.83 Cd (mg kg⁻¹), y en menor medida *Coriandrum sativum*, *Solanum lycopersicum* las cuales tuvieron una concentración de 2.4 y 0.2 Cd (mg kg⁻¹) respectivamente.

Otro aspecto a tener en cuenta es el tiempo que lleva hacer el proceso de remediación a los diferentes microorganismos o plantas, Steliga T (36), cosechó las plantas de *Festuca arundinacea* a los 6 meses, Pons M(57), a las 14 semanas de *S. nigrum*, respecto a hongos, Apaza (49), dejó alcanzar el cultivo una edad fisiología de 24 horas, Albert Q (33) dejó a *Absidia cylindrospora* en exposición a Cd durante 7 días. Teniendo en cuenta lo anterior, quien presenta mayor eficacia son las bacterias, ya que logran biorremediar en menor tiempo, por ejemplo *B. cereus* redujo un 61,3% de Cd después de 48 horas. La tolerancia a múltiples metales y la reducción de Cd por *B. cereus* indican su potencial para un uso posterior para la descontaminación de suelos contaminados, pero se debe tener en cuenta el volumen de biomasa requerida para eliminar el metal.

Por otro lado, el potencial de adsorción y eficiencia de diferentes cultivos bacterianos para la bio-eliminación de Cd demuestra mayor la biorremediación dando como grandes exponentes según los autores (37)(43) (69) Microorganismos tolerantes a metales pesados del pasivo minero Santa Rosa, Jangas (Perú) Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión a *Pseudomonas stutzeri* y *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa* PSK3, *Klebsiella pneumoniae* y *Serratia liquefaciens* dentro de muchos más, en donde su capacidad de adsorción en medida (mg/g biomasa seca) o eficiencia de eliminación en porcentaje fue de 72–89% para *Pseudomonas stutzeri* y *Bacillus subtilis*, 85% para *Pseudomonas aeruginosa* PSK3 y 44% *Klebsiella pneumoniae*, *Serratia liquefaciens*, dando una mejor eficiencia y rendimiento al tratamiento biorremediador con bacterias a diferencia de plantas comestibles.

Así mismo, se observa el potencial de adsorción de cadmio y eficacia de eliminación de varias especies de hongos como *Cladosporium sphaerospermum*, *Fusarium oxysporum*, *Aspergillus fumigatus* y *Penicillium* sp. CN35 con la capacidad de absorción expresada en mg/g de biomasa seca y eficiencia de remoción (%), de 65,73% para *Cladosporium sphaerospermum*(63), 54,30% para *Fusarium oxysporum*,(37) 5,02 mg/g para *Aspergillus fumigatus* (44)y de 83.5% para *Penicillium* sp CN35(25), lo cual muestra que las bacterias y los hongos son mejores biorremediadores y pueden ser viable para una bioremediación equilibrada.

7. CONCLUSIONES

1. La actividad antropogénica ha interferido notablemente en el aumento de las concentraciones de Cd, ya que el ser humano está detrás de la industria, la actividad agrícola, el humo de cigarrillo y otras, aportando gran volumen de la concentración de metales pesados.
2. El cadmio consumido en alimentos contaminados produce daños a la salud humana como disfunción por formación de radicales libres como especies reactivas de oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (RNS), precipitando el estrés oxidativo e influyendo de forma desfavorable en el sistema reproductor femenino, apoptosis o activación por vía de las caspasas y genera carcinógenos que afectan la salud.
3. La manera más eficiente de generar una biorremediación de suelo contaminado con cadmio es mediante el uso de bacterias nativas del suelo en simbiosis con plantas que maximizan el porcentaje de cadmio retenido como *Pseudomonas* spp con porcentaje de remoción de 44.67%, *B. cereus* con 61,3% y así mismo el uso de hongos como *Trichoderma*, *Rhizopus* sp, *Aspergillus* sp, entre otros, con porcentajes de remoción de 72% y 69.23 los dos últimos, respectivamente.
4. La técnica más relevante para la resolución del problema de cadmio en suelo es la de bioacumulación, ya que resuelve ser más efectiva debido a que se puede llevar a cabo con hongos, bacterias y plantas o en simbiosis entre ellas, y no sólo con una fuente de biomasa. Seguido por el proceso de fitorremediación, ya que es de fácil manejo, no requiere grandes procesos biotecnológicos como es el caso de las bacterias u hongos, los cuales requieren condiciones específicas de cultivo y generación de biomasa para su empleo.

8. RECOMENDACIONES

La realización de un proceso de biorremediación necesita previamente estudiar las características del suelo, basadas en éstas buscar el microorganismo o planta que se adecúe más para no afectar su metabolismo o su actividad remediadora. Así mismo se debe tener en cuenta el tiempo que se dispone para realizar dicho proceso y elegir la metodología óptima respecto a tiempo.

Se recomienda desarrollar un ensayo previo y práctico en el laboratorio con los microorganismos que presentaron la mayor eficiencia en la revisión realizada utilizando la biocamulación, teniendo en cuenta la concentración del metal y los requerimientos necesarios en los suelos que requieran ser tratados para disminuir el contenido Cd.

9. BIBLIOGRAFIA

1. Camacho VB, Díaz RG. Evaluation of contamination by heavy metals in soils of the Cayapas Mataje Mangrove Reserve (REMACAM)-Ecuador. *Entramado*. 2018 Oct 11;14(1):104–10.
2. LUIS FERNANDO LONDOÑO-FRANCO 1 PTL-M 2. LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL. 2016 [cited 2021 Oct 15];14(2). Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612016000200017
3. Abbas G, Murtaza B, Bibi I, Shahid M, Niazi NK, Khan MI, et al. Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: Physiological, biochemical, and molecular aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [Internet]. 2018 Jan 2 [cited 2021 Apr 27];15(1). Available from: </pmc/articles/PMC5800158/>
4. Širić I, Kasap A, Bedeković D, Falandysz J. Lead, cadmium and mercury contents and bioaccumulation potential of wild edible saprophytic and ectomycorrhizal mushrooms, Croatia. <http://dx.doi.org.ez.unisabana.edu.co/101080/0360123420171261538> [Internet]. 2017 Mar 4 [cited 2021 Jul 27];52(3):156–65. Available from: <https://www-tandfonline-com.ez.unisabana.edu.co/doi/abs/10.1080/03601234.2017.1261538>
5. Del Cacao D. PROGRAMA NACIONAL DE VIGILANCIA Y CONTROL DE CADMIO EN PRODUCTOS [Internet]. 2016 [cited 2021 Apr 27]. Available from: <https://www.invima.gov.co/documents/20143/441038/Documento-tecnico-Cadmio-en-cacao.pdf/36200805-c21d-c444-ee08-47a0f6c8c230>
6. 2014 09-12 oportunidades de mercado para exportar cacao colombiano [Internet]. [cited 2021 Apr 27]. Available from: <https://es.slideshare.net/pasante/2014-0912-oportunidades-de-mercado-para-exportar-cacao-colombiano>
7. Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, Kumpiene J, Park J, Makino T, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils - To mobilize or to immobilize? *J Hazard Mater* [Internet]. 2014 Feb 15 [cited 2021 Apr 27];266:141–66. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24394669/>
8. Benavides MP, Gallego SM, Tomaro ML. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian J Plant Physiol* [Internet]. 2005 [cited 2021 Apr 27];17(1):21–34. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-0420200500010

- 0003&Ing=en&nrm=iso&tIng=en
9. Brian J. Alloway. Heavy Metals in Soils [Internet]. Alloway BJ, editor. Dordrecht: Springer Netherlands; 2013 [cited 2021 Apr 27]. (Environmental Pollution; vol. 22). Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-4470-7>
 10. Charania NA, Tsuji LJS, Martin ID, Liberda EN, Coté S, Ayotte P, et al. An examination of traditional foods and cigarette smoking as cadmium sources among the nine First Nations of Eeyou Istchee, northern Quebec, Canada. *Environ Sci Process Impacts* [Internet]. 2014 [cited 2021 Apr 27];16(6):1422–33. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24781002/>
 11. Dunia M, Heredia R. ARTÍCULO DE REVISIÓN Intoxicación ocupacional por metales pesados Occupational poisoning due to heavy metals. *MEDISAN*. 2017;21(12):3372.
 12. E A, N H, IH S, Z J, MH S, LX J. Role of jasmonic acid in improving tolerance of rapeseed (*Brassica napus* L.) to Cd toxicity. *J Zhejiang Univ Sci B* [Internet]. 2018 Feb 1 [cited 2021 Oct 15];19(2):130–46. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29405041/>
 13. Perales-Aguilar L, Esquivel-Rivera JA, Silos-Espino H, Carrillo-Rodríguez JC, Perales-Segovia C, Perales-Aguilar L, et al. Tolerancia de plantas de zonas áridas a metales pesados. *Terra Latinoam* [Internet]. 2021 Jan 1 [cited 2021 Oct 15];39. Available from: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-5779202100100108&Ing=es&nrm=iso&tIng=es
 14. Cristaldi A, Oliveri Conti G, Cosentino SL, Mauromicale G, Copat C, Grasso A, et al. Phytoremediation potential of *Arundo donax* (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals. *Environ Res* [Internet]. 2020 Jun 1 [cited 2021 Jul 27];185:109427. Available from: <https://www-sciencedirect-com.ez.unisabana.edu.co/science/article/pii/S0013935120303200?via%3Dihub>
 15. Charrupi Riascos N, Carolina Martínez Novoa D. Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño. 2017 [cited 2021 Oct 15]; Available from: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/718
 16. Esmeralda P, García P, Isabel M, Cruz A. *Rev Esp Méd Quir* Volumen 17, Núm. 3, julio-septiembre. *Rev Esp Méd Quir* [Internet]. 2012 [cited 2021 Oct 15];17(3):199–205. Available from: www.nietoeditores.com.mx
 17. Marini M, Angouria-Tsorochidou E, Caro D, Thomsen M. Daily intake of heavy metals and minerals in food – A case study of four Danish dietary profiles. *J Clean Prod* [Internet]. 2021 Jan 20 [cited 2021 Oct 15];280:124279. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620343249>
 18. Producto Límite (ppm). 2015 [cited 2021 Oct 15];21. Available from: <https://alimentacion-animal.elika.eus/wp-content/uploads/sites/6/2017/12/CAD-MIO-2015maquetado.pdf>
 19. Alengebawy A, Abdelkhalek ST, Qureshi SR, Wang MQ. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*. 2021;9(3):1–34.
 20. Zhang F, Xiao X, Wu X. Physiological and molecular mechanism of cadmium (Cd) tolerance at initial growth stage in rapeseed (*Brassica napus* L.).

- Ecotoxicol Environ Saf [Internet]. 2020 Jul 1 [cited 2021 Oct 15];197:110613. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651320304528>
21. Parlamento Europeo El Consejo De EY. DIRECTIVA 2000/36/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de junio de 2000 relativa a los productos de cacao y de chocolate destinados a la alimentación humana [Internet]. 2000 Jun [cited 2021 Apr 28]. Available from:
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/Es/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0036-20131118&rid=1>
 22. Del Cacao D. PROGRAMA NACIONAL DE VIGILANCIA Y CONTROL DE CADMIO EN PRODUCTOS. [cited 2021 Aug 20]; Available from:
<https://www.invima.gov.co/documents/20143/441038/Documento-tecnico-Cadmio-en-cacao.pdf/36200805-c21d-c444-ee08-47a0f6c8c230>
 23. Manuel Santos Calderón J, Gabriel Uribe J, Soto Carreño Supervisora de consultoría Marcela Bonilla Madriñán A. República de Colombia Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Internet]. 2012 [cited 2021 Apr 28]. Available from:
[https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico de salud Ambiental compilado.pdf](https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf)
 24. Soto-Benavente M, Rodriguez-Achata L, Olivera M, Sanchez VA, Nano CC, Quispe JG. Health risks due to the presence of heavy metals in agricultural products cultivated in areas abandoned by gold mining in the Peruvian Amazon. *Sci Agropecu* [Internet]. 2020 Mar 1 [cited 2021 Apr 28];11(1):49–59. Available from:
https://www.researchgate.net/publication/340384081_Health_risks_due_to_the_presence_of_heavy_metals_in_agricultural_products_cultivated_in_areas_abandoned_by_gold_mining_in_the_Peruvian_Amazon
 25. Cayotopa-Torres J, Arévalo-López L, Pichis-García R, Olivera-Cayotopa D, Rimachi-Valle M, Márquez-Dávila K, et al. Nuevos agentes de biorremediación de cadmio: Especies de *Trichoderma* nativas de la rizósfera de árboles de cacao. *Sci Agropecu* [Internet]. 2021 Apr 1 [cited 2021 Oct 15];12(2):155–60. Available from:
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172021000200155&lng=es&nrm=iso&tlng=en
 26. Yadav SK. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African J Bot* [Internet]. 2010;76(2):167–79. Available from:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2009.10.007>
 27. Mendez JP, Mendez JP, Ramírez CAG, Gutiérrez ADR, García FP. PLANT CONTAMINATION AND PHYTOTOXICITY DUE TO HEAVY METALS FROM SOIL AND WATER. *Trop Subtrop Agroecosystems* [Internet]. 2008 Dec 16 [cited 2021 Apr 28];10(1):19–44. Available from:
<https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/25>
 28. Gerhard I, Waibel S, Daniel V, Runnebaum B. Impact of heavy metals on hormonal and immunological factors in women with repeated miscarriages. *Hum Reprod Update* [Internet]. 1998 May [cited 2021 Apr 28];4(3):301–9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9741713/>
 29. Garbisu C, Alkorta I. Basic concepts on heavy metal soil bioremediation. *The*

- European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection [Internet]. 2003 [cited 2021 Apr 28];3(1):58–66. Available from: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/12/Basic-concepts-on-heavy-metal-soil-bioremediation.pdf>
30. para optar al Título Profesional de Médico Veterinario M. CLAUDIA ISABEL SANTANDER FUENZALIDA PROFESOR GUÍA: LORETO DEL CARMEN MUÑOZ ARENAS. 2007 [cited 2021 Oct 15]; Available from: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131233/Detección-de-cadmio-y-mercurio-y-plomo-en-gatos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 31. OMS | Cadmio Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas [Internet]. [cited 2021 Apr 28]. Available from: https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/cadmium/es/
 32. Sabath E, Robles-Osorio ML. Medio ambiente y riñón: nefrotoxicidad por metales pesados. 2012 [cited 2021 Apr 28];32(3):279–86. Available from: <http://www.revistanefrologia.com>
 33. Bustos Viteri KT, Cacuango Gualacata JJ. Identificación molecular de bacterias resistentes a cadmio y cromo aisladas de aguas contaminadas de la zona de Papallacta cantón Quijos de la provincia de Napo. 2017 Jan [cited 2021 Apr 28]; Available from: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13535>
 34. Kumar A, Subrahmanyam G, Mondal R, Cabral-Pinto MMS, Shabnam AA, Jigyasu DK, et al. Bio-remediation approaches for alleviation of cadmium contamination in natural resources. Chemosphere [Internet]. 2021 Apr 1 [cited 2021 Jul 28];268:128855. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520330538?via%3Dihub>
 35. Georgescu B, Georgescu C, Dărăban S, Bouaru A, Pașcalău S. Heavy Metals Acting as Endocrine Disrupters [Internet]. Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies. 2011 [cited 2021 Apr 28]. Available from: [https://www.usab-tm.ro/utilizatori/ZOOTEHNIE/file/REVISTA 2011/vol 44/2/BIOCHIM/Georgescu.pdf](https://www.usab-tm.ro/utilizatori/ZOOTEHNIE/file/REVISTA%202011/vol44/2/BIOCHIM/Georgescu.pdf)
 36. Steliga T, Kluk D. Application of Festuca arundinacea in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. Ecotoxicol Environ Saf [Internet]. 2020 May 1 [cited 2021 Jul 27];194:110409. Available from: [https://www-sciencedirect-com.ez.unisabana.edu.co/science/article/pii/S0147651320302487?via%3Dihub](https://www.sciencedirect-com.ez.unisabana.edu.co/science/article/pii/S0147651320302487?via%3Dihub)
 37. Beltrán-Pineda ME, Gómez-Rodríguez AM. Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. Rev Fac Ciencias Básicas [Internet]. 2016;12(2):172–97. Available from: [file:///C:/Users/LENOVO/Downloads/2027-Texto del artículo-6473-1-10-20160901.pdf](file:///C:/Users/LENOVO/Downloads/2027-Texto%20del%20artículo-6473-1-10-20160901.pdf)
 38. Nwidi I, Agunwamba J. Selection of Biosorbents for Biosorption of Three Heavy Metals in a Flow-Batch Reactor Using Removal Efficiency as Parameter. Niger J Technol [Internet]. 2015 Mar 31 [cited 2021 Apr 28];34(2):406. Available from: https://www.researchgate.net/publication/220039321_Bacterial_Biosorption_of

- _heavy_metals
39. Xu S, Xing Y, Liu S, Hao X, Chen W, Huang Q. Characterization of Cd²⁺ biosorption by *Pseudomonas* sp. strain 375, a novel biosorbent isolated from soil polluted with heavy metals in Southern China. *Chemosphere* [Internet]. 2020 Feb 1 [cited 2021 Apr 28];240. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31550585/>
 40. Ayubb T N, Cerra G A, Chamorro A L, Pérez C A. Resistencia a cadmio (Cd) de bacterias endófitas y bacterias rizosféricas aisladas a partir de *Oriza sativa* en Colombia. *Rev Colomb Cienc Anim - RECIA* [Internet]. 2017 Dec 1 [cited 2021 Apr 28];9(2):281. Available from: <http://www.recia.edu.co>
 41. Profesional Agronomía C DE. EFECTO DE TRES SISTEMAS DE MANEJO SOBRE EL CONTENIDO DE CADMIO (Cd) EN LA HOJARASCA Y EN LA CÁSCARA DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN SAN ALEJANDRO UCAYALI, PERÚ. [Internet]. 2019 [cited 2021 Apr 28]. Available from: http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4229/UNU_AGRONOMIA_2019_T_KERVIN-TUESTA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 42. Pro E. Effects of heavy metals on soil microbial biomass carbon. 2019 [cited 2021 Apr 28]; Available from: <http://medcraveonline.com>
 43. Jan M, Shah G, Masood S, Iqbal Shinwari K, Hameed R, Rha ES, et al. *Bacillus Cereus* Enhanced Phytoremediation Ability of Rice Seedlings under Cadmium Toxicity. *Biomed Res Int* [Internet]. 2019 [cited 2021 Apr 28];2019. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2019/8134651/>
 44. Manguilimotan LC, Bitacura JG. Biosorption of Cadmium by Filamentous Fungi Isolated from Coastal Water and Sediments. *J Toxicol* [Internet]. 2018 [cited 2021 Apr 28];2018. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/jt/2018/7170510/>
 45. Ameen FA, Hamdan AM, El-Naggar MY. Assessment of the heavy metal bioremediation efficiency of the novel marine lactic acid bacterium, *Lactobacillus plantarum* MF042018. *Sci Rep* [Internet]. 2020 Dec 1 [cited 2021 Apr 28];10(1):1–11. Available from: www.nature.com/scientificreports
 46. Sánchez Barrón G, Sánchez Barrón G. Ecotoxicología del cadmio riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. 2016 [cited 2021 Apr 28]; Available from: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/50902/>
 47. Mauricio R, Beltran S, De G, De Biorremediación M, La P, De R. GUÍA DE MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS [Internet]. 2013 [cited 2021 Apr 28]. Available from: https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO_FINAL_cd.pdf?sequence=1
 48. Marrero-Coto J, Díaz-Valdivia A, Coto-Pérez O. Mecanismos moleculares de resistencia a metales pesados en las bacterias y sus aplicaciones en la biorremediación [Internet]. Vol. 41, *Revista CENIC Ciencias Biológicas*. 2016 [cited 2021 Apr 28]. Available from: <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevBiol/article/view/609>
 49. Apaza-Aquino H, Valencia MREV. EFICIENCIA DE LA BIOMASA DE *RHIZOPUS* SP EN LA REMOCIÓN DE CADMIO (II). *Rev Investig la Esc Posgrado la UNA PUNO* [Internet]. 2020 Oct 31 [cited 2021 Jul 27];9(4):1805–16. Available from:

- <http://revistas.unap.edu.pe/epg/index.php/investigaciones/article/view/2288>
50. Cuba C, Rubio OE, Zamora M, Hernández Baranda AM, Cabrera Rodríguez Y, Guridi JA, et al. EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE UNA MEZCLA DE OLIGOGALACTURÓNIDOS SOBRE UN SUELO CONTAMINADO CULTIVADO CON PLÁNTULAS DE TOMATE. *Cultiv Trop* [Internet]. 2016 [cited 2021 Apr 28];37:160–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20663.52642>
 51. Álvarez Calvo ML. Tratamiento de suelos contaminados por metales mediante combinación de técnicas de fitorremediación con adición de biochar [Internet]. Universidad Politécnica de Madrid; 2019 [cited 2021 Apr 27]. Available from: <http://oa.upm.es/55865/>
 52. Xu C, He S, Liu Y, Zhang W, Lu D. Biadsorption and biostabilization of cadmium by *Enterobacter cloacae* TU. *Chemosphere* [Internet]. 2017 Apr 1 [cited 2021 Jul 27];173:622–9. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565351730005X?casa_token=QhUhq_NtpRIAAAAA:cgmhnTBapnTo4Ww46kPh7-s9jrAMSoq_RxSiZz2uU2O2ATizpskBE2bvFMqFjfiWoxv3kY0u6B0
 53. Moreno-Sánchez R, Rodríguez-Enríquez S, Jasso-Chávez R, Saavedra E, García-García JD. Biochemistry and Physiology of Heavy Metal Resistance and Accumulation in *Euglena*. *Adv Exp Med Biol* [Internet]. 2017 [cited 2021 Jul 27];979:91–121. Available from: https://link-springer-com.ez.unisabana.edu.co/chapter/10.1007/978-3-319-54910-1_6
 54. Motamayor JC, Risterucci AM, Lopez PA, Ortiz CF, Moreno A, Lanaud C. Cacao domestication I: The origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity (Edinb)* [Internet]. 2002 Nov 28 [cited 2021 Apr 27];89(5):380–6. Available from: www.nature.com/hdy
 55. Yang Z, Shi W, Yang W, Liang L, Yao W, Chai L, et al. Combination of bioleaching by gross bacterial biosurfactants and flocculation: A potential remediation for the heavy metal contaminated soils. *Chemosphere* [Internet]. 2018 Sep 1 [cited 2021 Jul 27];206:83–91. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565351830821X?casa_token=3m1qBRwwDGwAAAAA:xJh9Td_ncRcO69fljJsEer-vjtLI41vYHxqdGf8Fa7DbUN4PfrZ3At-4jQa9IKR_OJ-f8nG1QGw
 56. Maldaner J, Steffen GPK, Missio EL, Saldanha CW, Morais RM de, Nicoloso FT. Tolerance of *Trichoderma* isolates to increasing concentrations of heavy metals. <https://doi-org.ez.unisabana.edu.co/101080/0020723320201778290> [Internet]. 2020 [cited 2021 Jul 27];78(2):1–13. Available from: <https://www-tandfonline-com.ez.unisabana.edu.co/doi/abs/10.1080/00207233.2020.1778290>
 57. Pons ML, Collin B, Doelsch E, Chaurand P, Fehlauer T, Levard C, et al. X-ray absorption spectroscopy evidence of sulfur-bound cadmium in the Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* and the non-accumulator *Solanum melongena*. *Environ Pollut* [Internet]. 2021 Jun 15 [cited 2021 Jul 27];279:116897. Available from: <https://www-sciencedirect-com.ez.unisabana.edu.co/science/article/pii/S0269749121004796?via%3Dihub#sec1>
 58. Albert Q, Leleyter L, Lemoine M, Heutte N, Rioult JP, Sage L, et al.

- Comparison of tolerance and biosorption of three trace metals (Cd, Cu, Pb) by the soil fungus *Absidia cylindrospora*. *Chemosphere* [Internet]. 2018 Apr 1 [cited 2021 Jul 27];196:386–92. Available from: <https://www-sciencedirect-com.ez.unisabana.edu.co/science/article/pii/S0045653517321343?via%3Dihub>
59. Kortenkamp A. 12. Are Cadmium and Other Heavy Metal Compounds Acting as Endocrine Disrupters? In: *Metal ions in life sciences* [Internet]. *Met Ions Life Sci*; 2010 [cited 2021 Apr 28]. p. 305–17. Available from: <http://ebook.rsc.org/?DOI=10.1039/9781849732116-00305>
 60. Lizandra Pérez Bou ISB. Biosorción microbiana de metales pesados: características del proceso / Biosorption of heavy metals: characteristics of the process | Pérez Bou | *Revista Cubana de Ciencias Biológicas* [Internet]. Vol. 6, Núm. 1. 2018 [cited 2021 Aug 20]. Available from: <http://www.rccb.uh.cu/index.php/RCCB/article/view/216>
 61. Galman JL, Slabu I, Weise NJ, Iglesias C, Parmeggiani F, Lloyd RC, et al. Biocatalytic transamination with near-stoichiometric inexpensive amine donors mediated by bifunctional mono- and di-amine transaminases. *Green Chem* [Internet]. 2017 Jan 23 [cited 2021 Oct 18];19(2):361–6. Available from: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/gc/c6gc02102f>
 62. Li X, Li D and bioaccumulation characteristics of cadmium by plant growth-promoting rhizobacteria, Yan Z, Ao Y. Biosorption and bioaccumulation characteristics of cadmium by plant growth-promoting rhizobacteria. *RSC Adv* [Internet]. 2018 Aug 30 [cited 2021 Jul 27];8(54):30902–11. Available from: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/ra/c8ra06270f>
 63. Bahobil A, Bayoumi RA, Atta HM, El-Sehrawey MM. Fungal Biosorption for Cadmium and Mercury Heavy Metal Ions Isolated from Some Polluted Localities in KSA. *IntJCurrMicrobiolAppSci* [Internet]. 2017 [cited 2021 Oct 18];6(6):2138–54. Available from: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.606.253>
 64. Costa F, Tavares T. Biosorption of nickel and cadmium in the presence of diethylketone by a *Streptococcus equisimilis* biofilm supported on vermiculite. *Int Biodeterior Biodegrad* [Internet]. 2016 Nov 1 [cited 2021 Oct 18];115:119–32. Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/Biosorption-of-nickel-and-cadmium-in-t-he-presence-a-Costa-Tavares/ce875673996b4232da58f543e83786da6109157c>
 65. Bras. Carla Mendieta Webster y Katerine Taisigüe Lóp. Acumulación y traslocación de metales, metaloides y no metales en plantas nativas de la zona minera de Chontales: Implicaciones para el potencial de fito-remediación [Internet]. 2014 [cited 2021 Oct 15]. Available from: https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/methods/Accumulation-and-Translocation-metals-in-native-plants_Extended-abstract.pdf
 66. Olaniran AO, Balgobind A, Pillay B. Bioavailability of heavy metals in soil: Impact on microbial biodegradation of organic compounds and possible improvement strategies. *Int J Mol Sci* [Internet]. 2013 [cited 2021 Apr 27];14(5):10197–228. Available from: [/pmc/articles/PMC3676836/](https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2013/ij/140510197)
 67. Yang Z, Zhang Z, Chai L, Wang Y, Liu Y, Xiao R. Bioleaching remediation of

- heavy metal-contaminated soils using *Burkholderia* sp. Z-90. *J Hazard Mater* [Internet]. 2016 Jan 15 [cited 2021 Jul 27];301:145–52. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438941530039X>
68. Haider FU, Liqun C, Coulter JA, Cheema SA, Wu J, Zhang R, et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2021 Mar 15;211:111887.
 69. Muñoz-Silva L, Olivera-Gonzales P, Santillán Torres M, Tamariz-Angeles C. Microorganismos tolerantes a metales pesados del pasivo minero Santa Rosa, Jangas (Perú). *Rev Peru Biol* [Internet]. 2019 [cited 2021 Oct 15];26(1):109–18. Available from: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332019000100013&lng=es&nrm=iso&tlng=es
 70. Arambawatta-Lekamge SH, Pathiratne A, Rathnayake IVN. Sensitivity of freshwater organisms to cadmium and copper at tropical temperature exposures: Derivation of tropical freshwater ecotoxicity thresholds using species sensitivity distribution analysis. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2021 Mar 15;211.
 71. Garzón JM, Pablo Rodríguez-Miranda J, Org O. Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible Contribution of bioremediation to solve pollution problems and its relationship with sustainable development. [cited 2021 Apr 27]; Available from: <http://dx.doi.org/10.22267/rus.171902.93>
 72. Ashrafzadeh S, Leung DWM. Development of Cadmium-Safe Crop Cultivars: A Mini Review. *J Crop Improv*. 2016 Mar 3;30(2):107–17.
 73. Correa García C, Correa García C. Ecotoxicología del cadmio, riesgo para la salud por la utilización de suelos ricos en cadmio. 2016 [cited 2021 Apr 28]; Available from: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/49137/>
 74. Rizwan M, Ali S, Zia ur Rehman M, Rinklebe J, Tsang DCW, Bashir A, et al. Cadmium phytoremediation potential of Brassica crop species: A review. *Sci Total Environ* [Internet]. 2018 Aug 1 [cited 2021 Apr 28];631–632:1175–91. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29727943/>
 75. P.S C, Sanyal D, Dasgupta S, Banik A. Cadmium biosorption and biomass production by two freshwater microalgae *Scenedesmus acutus* and *Chlorella pyrenoidosa*: An integrated approach. *Chemosphere* [Internet]. 2021 Apr 1 [cited 2021 Apr 28];269:128755. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520329532?via%3Dihub>
 76. Ricardo Israel Ramírez Gottfried¹, Mario García Carrillo¹§, Vicente de Paul Álvarez Reyna¹, Guillermo González Cervantes², Vicente Hernández Hernández¹. Potencial fitorremediador de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*) en suelos contaminados por metales pesados - Dialnet. 2019 [cited 2021 Jul 27];10(7):1529–40. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7152652>
 77. Manousaki E, Kalogerakis N. Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.): Metal uptake in relation to salinity. *Environ Sci Pollut Res* [Internet]. 2009 Nov [cited 2021 Oct 15];16(7):844–54. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29727943/>
 78. UVM P. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION DISEÑO Y EJECUCION

- [Internet]. 2011 [cited 2021 Apr 28]. Available from:
https://www.academia.edu/35258714/METODOLOGIA_DE_LA_INVESTIGACION_DISENO_Y_EJECUCION
79. Investigación cuantitativa y cualitativa. 2002 [cited 2021 Apr 28]; Available from: http://www.fisterra.com/mbe/investiga/cuanti_cuali/cuanti_cuali.asp
 80. Roberto Hernández, Carlos Fernández Collado, Pilar Baptista Lucio. Metodología de la Investigación [Internet]. 2014 [cited 2021 Apr 28]. Available from:
<https://academia.utp.edu.co/grupobasicoclinicayaplicadas/files/2013/06/Metodologia-de-la-Investigacion.pdf>
 81. María L, Dulzaides Iglesias E, María LA, Gómez M. Análisis documental y de información: dos componentes de un mismo proceso. 2004 [cited 2021 Apr 28]; Available from:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352004000200011
 82. El análisis de contenido como herramienta de utilidad para la realización de una investigación descriptiva. Un ejemplo de aplicación práctica utilizado para conocer las investigaciones realizadas sobre la imagen de marca de España y el efecto país de origen [Internet]. 2013 [cited 2021 Apr 28]. Available from:
<https://www.redalyc.org/pdf/555/55530465007.pdf>
 83. Colectiva S, Aires B. Los lenguajes de indización en e-Salud: su aplicación a los documentos sobre trastornos de la conducta alimentaria Indexing languages in e-Health: applications for documents about eating disorders [Internet]. Vol. 7, Octubre. 2011 [cited 2021 Apr 28]. Available from:
<https://www.scielo.org/article/scol/2011.v7suppl1/S61-S69/es/>
 84. Zeng T, Liang Y, Chen J, Cao G, Yang Z, Zhao X, et al. Urinary metabolic characterization with nephrotoxicity for residents under cadmium exposure. *Environ Int* [Internet]. 2021 Sep 1 [cited 2021 Aug 20];154:106646. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412021002713>
 85. Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, Kumpiene J, Park J, Makino T, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize? *J Hazard Mater*. 2014 Feb 15;266:141–66.
 86. Munive Cerrón R, Loli Figueroa O, Azabache Leyton A, Gamarra Sánchez G. Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Sci Agropecu* [Internet]. 2018 Dec 31 [cited 2021 Jul 27];9(4):551–60. Available from:
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172018000400011&lng=es&nrm=iso&tlng=es
 87. Kumar R, Sharma P, Umar A, Kumar R, Singh N, Joshi PK, et al. In Vitro Bioadsorption of Cd²⁺ Ions: Adsorption Isotherms, Mechanism, and an Insight to Mycoremediation. 1085 [cited 2021 Oct 18];8. Available from:
www.mdpi.com/journal/processes
 88. Li K, Cao C, Ma Y, Su D, Li J. Identification of cadmium bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.) by the soil-plant transfer model and species sensitivity distribution. *Sci Total Environ* [Internet]. 2019 Nov 20 [cited 2021 Jul 27];692:1022–8. Available from:
<https://www.sciencedirect.com.ez.unisabana.edu.co/science/article/pii/S0048969719332048?via%3Dihub#s0005>

89. Choińska-Pulit A, Sobolczyk-Bednarek J, Łaba W. Optimization of copper, lead and cadmium biosorption onto newly isolated bacterium using a Box-Behnken design. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2018 Mar 1 [cited 2021 Jul 27];149:275–83. Available from: <https://www-sciencedirect-com.ez.unisabana.edu.co/science/article/pii/S0147651317308369?via%3Dihub>
90. J R-Z, S G, C M-B, R N, CA N, A P, et al. Response of the biominer Acidithiobacillus ferrooxidans to high cadmium concentrations. *J Proteomics* [Internet]. 2019 Apr 30 [cited 2021 Jul 27];198:132–44. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30553947/>
91. Brito JP, Ramada MH, de Magalhães MT, Silva LP, Ulhoa CJ. Peptaibols from *Trichoderma asperellum* TR356 strain isolated from Brazilian soil. *SpringerPlus* 2014 31 [Internet]. 2014 Oct 13 [cited 2021 Oct 18];3(1):1–10. Available from: <https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/2193-1801-3-600>
92. Kumar A, Subrahmanyam G, Mondal R, Cabral-Pinto MMS, Shabnam AA, Jigyasu DK, et al. Bio-remediation approaches for alleviation of cadmium contamination in natural resources. *Chemosphere* [Internet]. 2021;268(November). Available from: https://www.researchgate.net/publication/345087752_Bio-remediation_approaches_for_alleviation_of_cadmium_contamination_in_natural_resources
93. Cely Torres LA. Oferta productiva del cacao colombiano en el posconflicto. Estrategias para el aprovechamiento de oportunidades comerciales en el marco del acuerdo comercial Colombia-Unión Europea. *Equidad y Desarrollo* [Internet]. 2017 Jul 5 [cited 2021 Apr 27];1(28):167–95. Available from: <https://ciencia.lasalle.edu.co/eq/vol1/iss28/7>

10. ANEXOS.

Figura 1. Valores de cadmio en suelos. NC: No contaminados, CL: Contaminación ligera, C: Contaminación, CA: Contaminación alta. Tomado y modificado de: Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias del comité del Codex sobre contaminantes de los alimentos. (36)

Valores típicos para suelos NC (mg/kg suelo)	CL (mg/kg suelo)	C (mg/kg suelo)	CA (mg/kg suelo)	Contaminación inusualmente alta (mg/kg suelo)

0 – 1	3 – 5	5 – 10	10 - 20	>20. En suelos ricos en Cd pero no en Zn: 0-0.7 (véase Garrett et al., 2008; Chaney et al., 2009).
-------	-------	--------	---------	---

Figura 2. Normativa de la Unión Europea (UE) en vigencia desde el 2019 (92)

Normativa	Modifica	Nivel
REGLAMENTO (UE) No 488/2014 DE LA COMISIÓN de 12 de mayo de 2014.	Modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios.	Niveles máximos (NM) de cadmio para el chocolate y productos derivados del cacao, en un rango de 0.10 a 0.60 mg/Kg a partir del 01 de enero de 2019.

Figura 3. Concentración de Cd en diferentes productos derivados del cacao. Tomado y modificado de: Proexport Colombia. 2014. (93)

Producto	Nivel máximo permitido de cadmio (ppm (mg/kg))
Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao < 30%	0.10 desde el 1 de enero 2019
Chocolate con un contenido de materia seca total de Cacao < 50 %	0.30 desde el 1 de enero 2019
Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 30%	0.30 desde el 1 de enero 2019
Chocolate con un contenido de materia seca total de Cacao ≥ 50 %	0.80 desde el 1 de enero 2019
Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber)	0.60 desde el 1 de enero 2019

Figura 4. Normatividad internacional, límite máximo permisible de cadmio en suelos

País/ Normativa	Nivel de Cd	Bibliografía
España. Real decreto 1310/1990 de 29 de octubre	Límite máximo permisible de cadmio en suelos con un pH > 7 de un 1 mg/kg y pH < 7 de 3 mg/kg.	(Ministerio de Agricultura 1990) (23)
Holanda	Límite máximo permisible de cadmio 0.8 mg/kg	(Ministerio de ambiente, 2000)(24)
Alemania.	Límite máximo permisible de cadmio de 1 mg/kg.	(Ministro de medio ambiente 1992).(24)

Unión Europea. Directiva del consejo de 12 de junio de 1986.	Límite máximo permisible de cadmio en suelos de 1 – 3 mg/kg.	(Unión Europea,1986).(24)
Guatemala. Norma Técnica Obligatoria para chocolate en polvo o en tabletas.	No se encuentran límites para cadmio.	(Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía, 1975, 3) (24) (Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía, 1987, 3)(24)
Corea del Sur. Artículo 5 del The South Korea Food Code numeral 3, establece los requisitos para Cocoa Products or Chocolates.	Solo para el polvo de cocoa se dan límites en plomo, el cual es máximo de 2 mg/kg.	(Code of Federal Regulations, 2011, 7). (24)
Uruguay. Reglamento bromatológico expedido por el Ministerio de Salud Pública de Uruguay.	Límite máximo para cadmio, es de 0,2 mg/Kg (aplica para todos los productos de chocolate, sucedáneos y demás derivados del cacao).	(Ministerio de Salud Pública, 1994, 17). (24)
Argentina. Código alimentario argentino capítulo III.	Límite para Chocolates y productos de cacao con menos de 40 % de cacao es de 0,2 mg/kg; el límite para Chocolates y productos a base de cacao con más de 40 % de cacao es de 0,3 mg/kg.(25)	(Administración Nacional de Alimentos, 2012) (24)

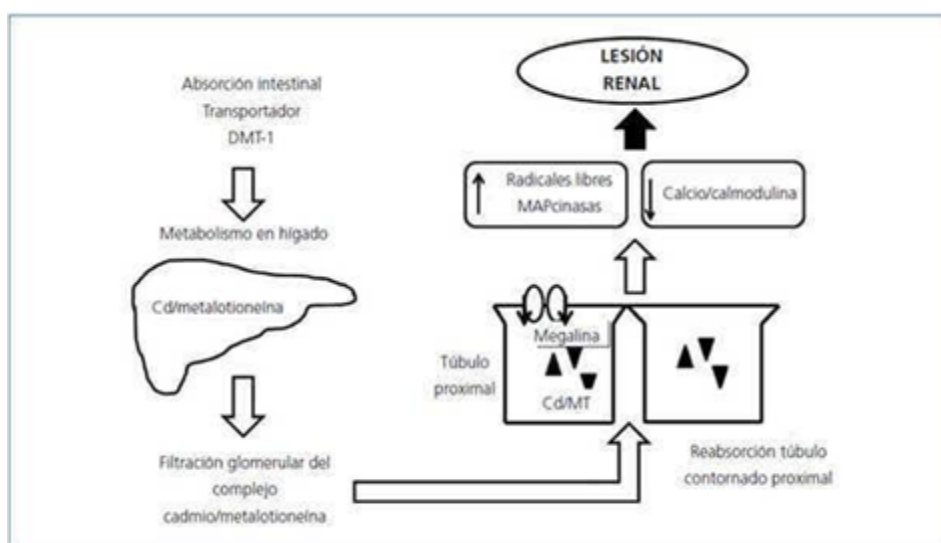


Figura 6. Fisiopatología del daño renal. Tomado de Sabatha, Osorio 2012(61).

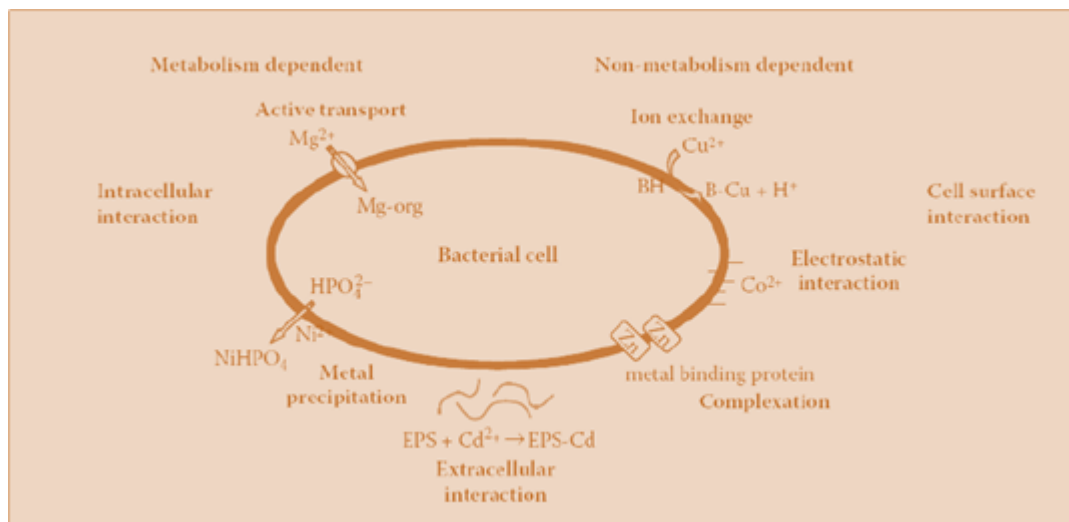


Figura 7. Diagrama esquemático de los diferentes mecanismos de biosorción bacteriana. Tomado de: Hassan, 2010. (19).

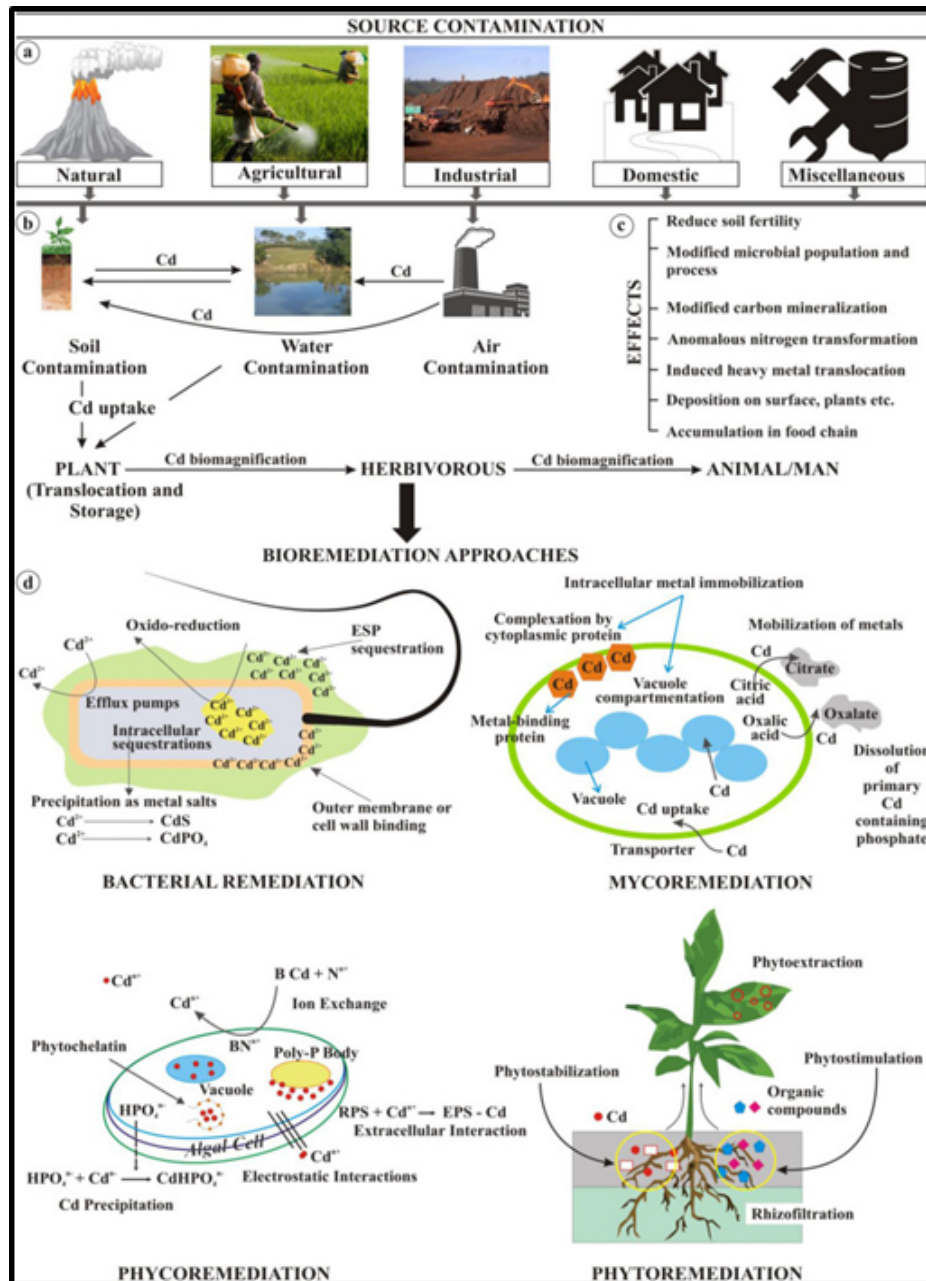


Figura 9. Fuentes de Cd y procesos de biorremediación. Figura tomada de Kumar, Chaturvedi, Yadav et al. 2019(57)

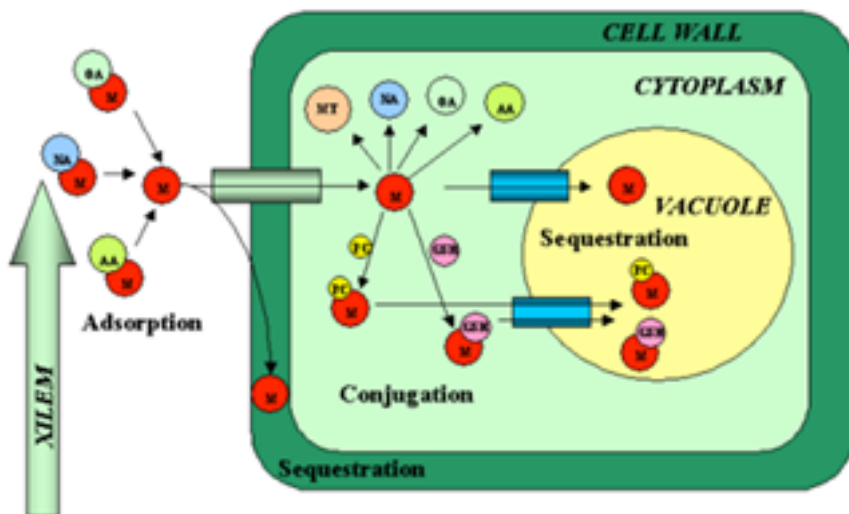


Figura 11. Los mecanismos de respuesta a los contaminantes metálicos en las células vegetales. Generalmente implican la conjugación seguida de un secuestro activo en la vacuola y el apoplasto. Los quelantes mostrados son GSH: glutatión, MT: metalotioneínas, NA: nicotinamina, OA: ácidos orgánicos, PC: fitocelatinas, AA: aminoácidos. (72)

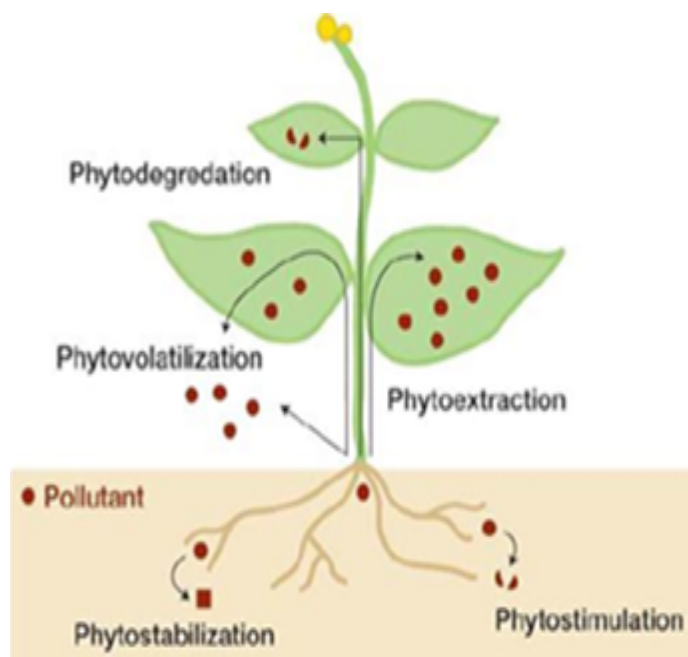


Figura 12. Partes de la planta que actúan en fitorremediación. Tomado de Imperiale, 2012. 71)

Categorías de tecnologías de fitorremediación: el contaminante (representado por puntos rojos) puede ser estabilizado o degradado en la rizosfera, secuestrado o degradado dentro del tejido vegetal, o volatilizado (72). Dichas técnicas pueden ser aplicadas a grandes superficies, con escasa producción de subproductos y el suelo puede ser reutilizado. (73)