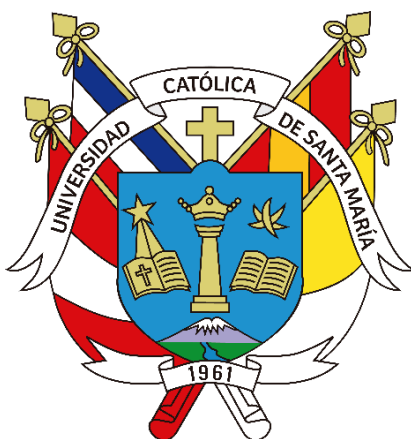


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y
Biotechnológicas
Escuela Profesional de Ingeniería Biotechnológica



Biorremediación de suelos contaminados con metales pesados
haciendo uso de hongos micorrízicos arbusculares

Tesis presentada por el Bachiller:

Angulo Castro, Fabio Josué

ORCID: 0000-0003-0648-9479

para optar el Título Profesional de Ingeniero Biotechnólogo

Asesor:

Maestro. Ortiz Romero, Derly David

ORCID: 0000-0003-1886-8206

Arequipa – Perú

2025

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA BIOTECNOLOGICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 30 de Agosto del 2023

Dictamen: 004728-C-EPIB-2023

Visto el borrador del expediente 004728, presentado por:

2014800341 - ANGULO CASTRO FABIO JOSUÉ

Titulado:

**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS HACIENDO USO DE
HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO BIOTECNOLOGO

**29280938 - BARDALES ALVAREZ ROXANA MARGARITA
DICTAMINADOR**



**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR**



**41404327 - BARREDA DEL CARPIO JAIME ERNESTO
DICTAMINADOR**



Biorremediación de suelos contaminados con metales pesados haciendo uso de hongos micorrízicos arbusculares

INFORME DE ORIGINALIDAD

11 %

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

1 %

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

2 %

2

repositorio.unac.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

3

bibdigital.epn.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

4

helvia.uco.es

Fuente de Internet

<1 %

5

www.tandfonline.com

Fuente de Internet

<1 %

6

es.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

7

ruidera.uclm.es

Fuente de Internet

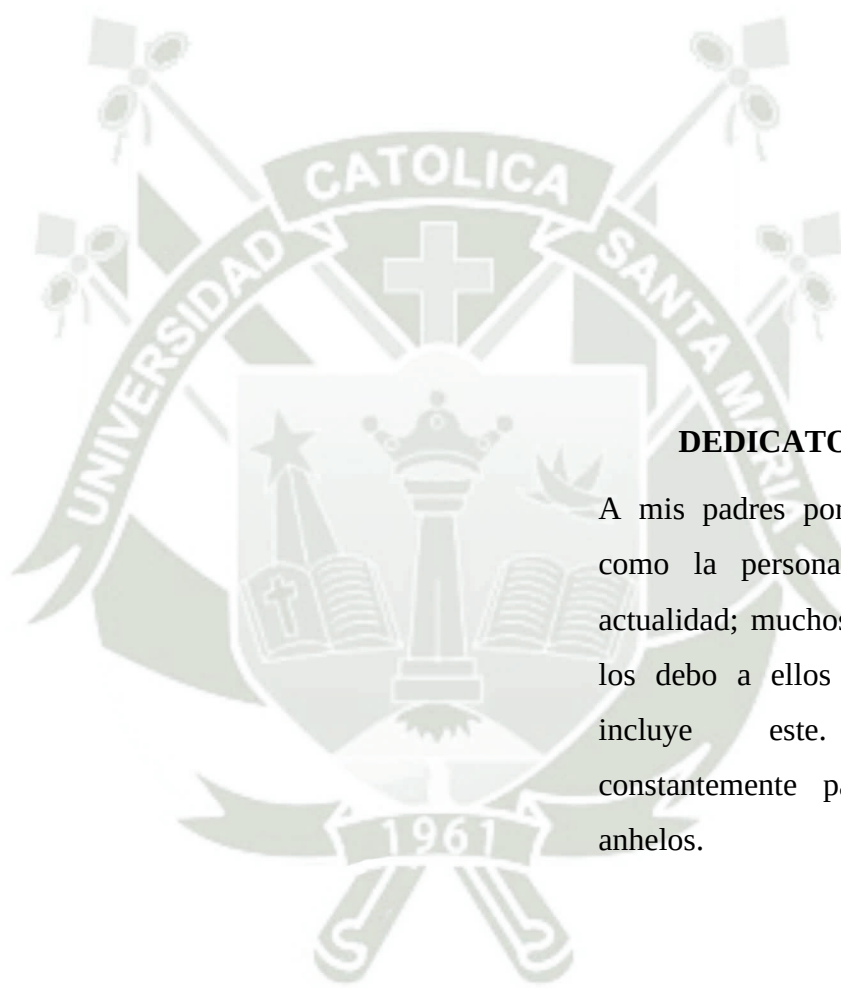
<1 %

8

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %



DEDICATORIA

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ellos entre los que se incluye este. Motivándome constantemente para alcanzar mis anhelos.

RESUMEN

Los metales pesados son compuestos citotóxicos, mutagénicos y carcinogénicos, donde su presencia en suelos se ha convertido en un problema grave y generalizado resultante tanto de actividades naturales como antropogénicas. Los metales pesados se encuentran presentes en los suelos como iones metálicos libres, complejos metálicos solubles, iones metálicos intercambiables, metales ligados orgánicamente y compuestos precipitados o insolubles como óxidos, carbonatos e hidróxidos, o pueden formar parte de la estructura de los minerales de silicato (presentes de manera natural en el suelo). En plantas, el estrés generado por la presencia de metales pesados (HM) perturba su metabolismo, reduciendo su crecimiento al inhibir su consumo de macro y micronutrientes, además, provocando la inhibición del crecimiento de raíces, peroxidación lipídica de las membranas e incluso causar la muerte de las células vegetales. Frente a lo expuesto, varias investigaciones respaldan el potencial biofertilizante de los hongos micorrízicos arbusculares (AMF), los cuales son microorganismos presentes en el suelo que desarrollan una asociación simbiótica mutualista con la mayoría de las plantas terrestres. Tomando en cuenta que el potencial de los AMF para actuar como una barrera biológica contra la translocación excesiva de HM del suelo a las raíces y de estas últimas hacia las partes aéreas de las plantas o como promotor de las plantas fitorremediadoras, se planteó el objetivo principal de esta investigación: delimitar los procesos adecuados usados dentro de las principales técnicas de fitorremediación de suelos contaminados con diversos metales pesados, haciendo uso no solamente de plantas con gran capacidad bioacumuladora, sino que se busca incrementar su eficacia y rendimiento mediante relaciones simbióticas mutualistas con hongos micorrízicos arbusculares. Con la finalidad de recabar la mejor información se usó la base datos Scopus, el motor de búsqueda se armó utilizando los siguientes descriptores: bioremediation, phytoremediation, heavy metal, arbuscular mycorrhizal fungi, environment y soil polluted, con los cuales se obtuvieron documentos primarios y a partir de los cuales se amplió la información con documentos secundarios derivados de los primarios; de todos los documentos devueltos por las bases de datos, se tomaron en cuenta artículos científicos, capítulos de libros y reviews, dentro de los cuales, como mínimo el 70% tuvo una antigüedad no mayor a 5 años, del mismo modo que se evitaron aquellos documentos que no se encuentren en idioma español, francés o inglés.

Palabras clave: Biorremediación, fitorremediación, metales pesados, hongos micorrízicos arbusculares.

ABSTRACT

Heavy metals are cytotoxic, mutagenic and carcinogenic compounds, where their presence in soils has become a serious and widespread problem resulting from both natural and anthropogenic activities. Heavy metals are present in soils as free metal ions, soluble metal complexes, exchangeable metal ions, organically bound metals and precipitated or insoluble compounds such as oxides, carbonates and hydroxides, or they may be part of the structure of silicate minerals (naturally occurring in soil). In plants, the stress generated by the presence of heavy metals (HM) disturbs their metabolism, reducing their growth by inhibiting their consumption of macro and micronutrients, as well as causing inhibition of root growth, lipid peroxidation of membranes and even causing plant cell death. In view of the above, several investigations support the biofertilizing potential of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), which are microorganisms present in the soil that develop a mutualistic symbiotic association with most terrestrial plants. Considering the potential of AMF to act as a biological barrier against excessive translocation of HM from soil to roots and from roots to aerial parts of plants or as a promoter of phytoremediating plants, the main objective of this research was to To delimit the adequate processes used within the main techniques of phytoremediation of soils contaminated with various heavy metals, making use not only of plants with high bioaccumulative capacity, but also seeking to increase their efficiency and performance through mutualistic symbiotic relationships with arbuscular mycorrhizal fungi. In order to gather the best information, the Scopus database was used due to the large number of journals indexed worldwide that it contains, in the same way that the NCBI database was consulted to collect documents in line with the professional career of Biotechnological Engineering; the search engine for both databases was assembled using the following descriptors: bioremediation, phytoremediation, heavy metal, arbuscular mycorrhizal fungi, environment and soil polluted, with which primary documents were obtained and from which the information was expanded with secondary documents derived from the primary ones; Of all the documents returned by the databases, scientific articles, book chapters and reviews were taken into account, of which at least 70% were not older than 5 years, and documents that were not in Spanish, French or English were avoided.

Key words: Bioremediation, phytoremediation, heavy metals, arbuscular mycorrhizal fungi.

ÍNDICE GENERAL

	Págs.
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	3
CAPITULO I.....	4
CAPITULO II.....	9
1. CUERPO DE LA REVISIÓN.....	9
1.1 Nuevas perspectivas y tecnologías para mejorar los procesos de fitorremediación.....	16
1.2 Fitorremediación de metales pesados por hongos micorrízicos arbusculares Toxicidad en plantas por metales pesados.....	22
1.3 Cuantificación de la transferencia trófica para metales pesados.....	24
1.4 Mecanismos moleculares de tolerancia a metales pesados.....	25
1.5 Hongos micorrízicos arbusculares.....	27
1.6 Fitorremediación asistida por Hongos micorrizicos arbusculares.....	36
1.7 Fitoestabilización o Fitoimmobilización.....	39
1.8 Fitoextracción.....	40
1.9 Actualidad de la fitorremediación a nivel nacional.....	44
CAPITULO III.....	51
1. PERSPECTIVAS A FUTURO.....	51
CONCLUSIONES.....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

	Págs.
Tabla 1. Fuentes y efectos de los metales pesados a la salud humana	7
Tabla 2. Casos de estudio de contaminantes del aire.....	15
Tabla 3. Proteínas transportadoras y canales iónicos para metales pesados.....	21
Tabla 4. Clasificación de Hongos micorrízicos arbusculares Según Schüßler & Walker (2010) and Redecker et al. (2013).	28
Tabla 5. Plantas nativas de Perú y los metales que absorben	46
Tabla 6. Estudios de Fitorremediación Asistida por Hongos micorrízicos arbusculares ...	48



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación de las fuentes de contaminación por metales pesados.	6
Figura 2. Clasificación de las tecnologías de remediación in situ	10
Figura 3. Mecanismos de fitorremediación.....	15
Figura 4. Mecanismos de captación y defensa frente a metales pesados.....	19
Figura 5. Efecto de los metales en el crecimiento de las plantas.	23
Figura 6. Diferencias en la colonización de AMF. En la parte inferior izquierda notamos que los AMF son capaces de penetrar tanto de forma intra e intercelular a diferencia de la Ectomicorizas (derecha).	28
Figura 7. Representación del ciclo de vida de AMF. En el punto (A) da inicio la germinación de las diferentes esporas presentes, en (B) se desarrollan las hifas intra y extra radicales, en (C) se forma el apresorio para iniciar la colonización y finalmente en (D) se da la reproducción mediante vesículas y arbusculos.	30
Figura 8. Papel de los AMF en la absorción de nutrientes. Observamos que una planta micorrizada (lado derecho), a nivel microscópico la formación de vesículas y arbusculos permiten un mayor transporte de minerales y a nivel macroscópico un mayor desarrollo del área radicular y la biomasa aérea.	32
Figura 9. Mapa de los países donde se observa un impacto significativo por la presencia de metales pesados.....	36
Figura 10. Esquematización de las principales técnicas de fitorremediación con la interacción con los hongos micorrizicos arbusculares (AMF).	38
Figura 11. Representación gráfica de las interacciones entre la planta y los AMF.	38
Figura 12. Mecanismos de los AMF para la fitoestabilización.....	39
Figura 13. Proceso de fitoextracción mediante Glomalina secretada por AMF.	41

Lista de Abreviaturas

ABA	Ácido abscísico
AF	Factor de acumulación
AMF	Hongos micorrízicos arbusculares
As	Arsénico
APX	Ascorbato peroxidasa
ABC	Casete de unión a ATP
Ba	Bario
BAF	Factor de bioacumulación
BMF	Factor de biomagnificación
BTEX	Benceno, tolueno, etilenbenceno y xilenos
Cd	Cadmio
CAX	Intercambiadores de calcio
CAT	Catalasas
CDF	Facilitador de difusión de cationes
Co	Cobalto
Cu	Cobre
COPT	Proteína transportadora de cationes de cobre
Cr	Cromo
ADN	Ácido desoxirribonucleico
GRSP-FE	Glomalina extraíble relacionada a proteínas del suelo
Sr	Estroncio
GPX	Glutación peroxidasa
GR	Glutación reductasa
HM	Metales pesados
AMF	ATPasas de metales pesados
IIA	Ácido 3 Indol Acético
IAP	Contaminantes inorgánicos del aire
IRT	Proteína transportadora regulada por hierro
Mn	Manganeso
Hg	Mercurio
MTP	Proteína de tolerancia a metales

MTF	Factor de transferencia de metales
MT	Metalotioneínas
Ni	Níquel
PM	Materia particulada
PC	Fitoquelatinas
PB	Plomo
PAH	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
PCR	Reacción en cadena de la Polimerasa
NRAMPS	Proteínas de Resistencia natural a metales pesados asociados con macrófagos
ROS	Especies reactivas de oxígeno
ARN	Ácido ribonucleico
Se	Selenio
PS	Sideróforos
SOD	Superóxido dismutasa
T-GRSP	Glomalina total relacionada a proteínas del suelo
TF	Factor de transferencia
TTF	Factor de transferencia trófica
VIT	Transportador vacuolar de hierro
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
YS	Yellow Stripe
Zn	Zinc
ZRT	Proteína transportadora regulada por zinc
ZIP	Proteínas transportadoras de zinc

INTRODUCCIÓN

El proceso de biorremediación está definido como “la utilización de microorganismos para reducir o eliminar peligros ambientales a través de reacciones químicas o procesos físicos deseados” (1). Los metales pesados son compuestos citotóxicos, mutagénicos y carcinogénicos, donde su presencia en suelos se ha convertido en un problema grave y generalizado resultante tanto de actividades naturales como antropogénicas (minería, fundición, disposición de residuos industriales y municipales, uso de fertilizantes y pesticidas, y la industria automotriz) (2).

Los metales pesados se encuentran presentes en los suelos como iones metálicos libres, complejos metálicos solubles (unidos a ligandos), iones metálicos intercambiables, metales ligados orgánicamente y compuestos precipitados o insolubles como óxidos, carbonatos e hidróxidos, o pueden formar parte de la estructura de los minerales de silicato (presentes de manera natural en el suelo), que al no poder ser degradados fácilmente a comparación de los contaminantes orgánicos, pueden constituir un peligro medioambiental persistente (3); es tanta la amenaza para el ecosistema como para la salud humana que la contaminación por metales pesados ha sido reconocida como uno de los peligros con más incidencia, por su persistencia, bioacumulación y bio magnificación, que perjudica la sostenibilidad de los agroecosistemas (4).

En plantas, el estrés generado por la presencia de metales pesados (HM) perturba su metabolismo, reduciendo su crecimiento al inhibir su consumo de macro y micronutrientes (5), además, los HM pueden inhibir el crecimiento de las raíces, interferir en la homeostasis de la planta, producir y acumular especies reactivas de oxígeno (ROS), causar peroxidación lipídica de las membranas e incluso causar la muerte de las células vegetales (6); sin embargo, existen plantas denominadas hiperacumuladoras (7; 8) que poseen varias estrategias, tales como quelación, eflujo, secuestro y detoxificación; que les permiten mitigar la toxicidad ocasionada por los HM (9).

Estas plantas son usadas como herramientas efectivas en la remediación (fitorremediación) de suelos contaminados por metales (10; 11). Por lo tanto, la biorremediación y la fitorremediación, son las estrategias más adecuadas y significativas para la eliminación de HM del ecosistema, donde la fitoextracción y la fitoestabilización son los mecanismos de fitorremediación más estudiados; durante la fitoextracción, las plantas acumulan los HM en la parte aérea, mientras que en el segundo método los metales pesados quedan inmovilizados en las raíces de la planta (12). En concreto, la introducción de plantas a suelos contaminados

incrementa el suministro de materia orgánica, reduce el proceso de erosión, mejora el ecosistema y la actividad microbiana del suelo (13).

Por otro lado, los hongos micorrízicos arbusculares (AMF), son microorganismos presentes en el suelo que desarrollan una asociación simbiótica mutua con la mayoría de las plantas terrestres (14; 15). Los AMF en simbiosis con las plantas, ayudan en su desarrollo y crecimiento, confiriéndoles gran tolerancia al estrés medioambiental, incluyendo los suelos contaminados por metales pesados (16).

Los beneficios otorgados por parte de los AMF, se deben a que producen una red de micelio que contribuyen con el desarrollo de la planta mediante el mejoramiento de la absorción de nutrientes y la captura de agua, debido a mecanismos que implican la ampliación del área de absorción y el volumen de suelo accesible para el sistema radicular (17). Recientemente, se ha encontrado que las micorrizas mejoran la eficiencia de las plantas a la tolerancia a metales pesados mediante: la dilución de los metales, síntesis de ácidos orgánicos para prevenir la entrada de los HM, quelación de los iones metálicos por metalotioneínas, inmovilización y retención de los metales en las hifas de los AMF o en las raíces de la planta (18).

Tomando en cuenta que el potencial de los AMF para actuar como una barrera biológica contra la translocación excesiva de HM del suelo a las raíces y de estas últimas hacia las partes aéreas de las plantas, ha sido ampliamente demostrado en suelos contaminados (19) y los efectos de la asociación de AMF en los procesos de fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados son de gran interés, puesto que las plantas micorrizadas son muy efectivas en la extracción de metales pesados como cobre, cadmio, plomo, zinc, etc., en comparación con las plantas hiperacumuladoras no micorrizadas (20); una promisorio alternativa frente al uso de químicos para contrarrestar los efectos adversos de los metales pesados, podrían ser los microorganismos (AMF) asociados a las raíces de la planta, donde la principal ventaja serían sus metabolitos biodegradables y menos tóxicos (21).

En relación a lo mencionado, se establece que el objetivo principal dentro de esta investigación es el delimitar los procesos adecuados usados dentro de las principales técnicas de fitorremediación de suelos contaminados con diversos metales pesados, haciendo uso no solamente de plantas con gran capacidad bioacumuladora, sino que se busca incrementar su eficacia y rendimiento mediante relaciones simbióticas mutualistas con hongos micorrízicos arbusculares.

METODOLOGÍA

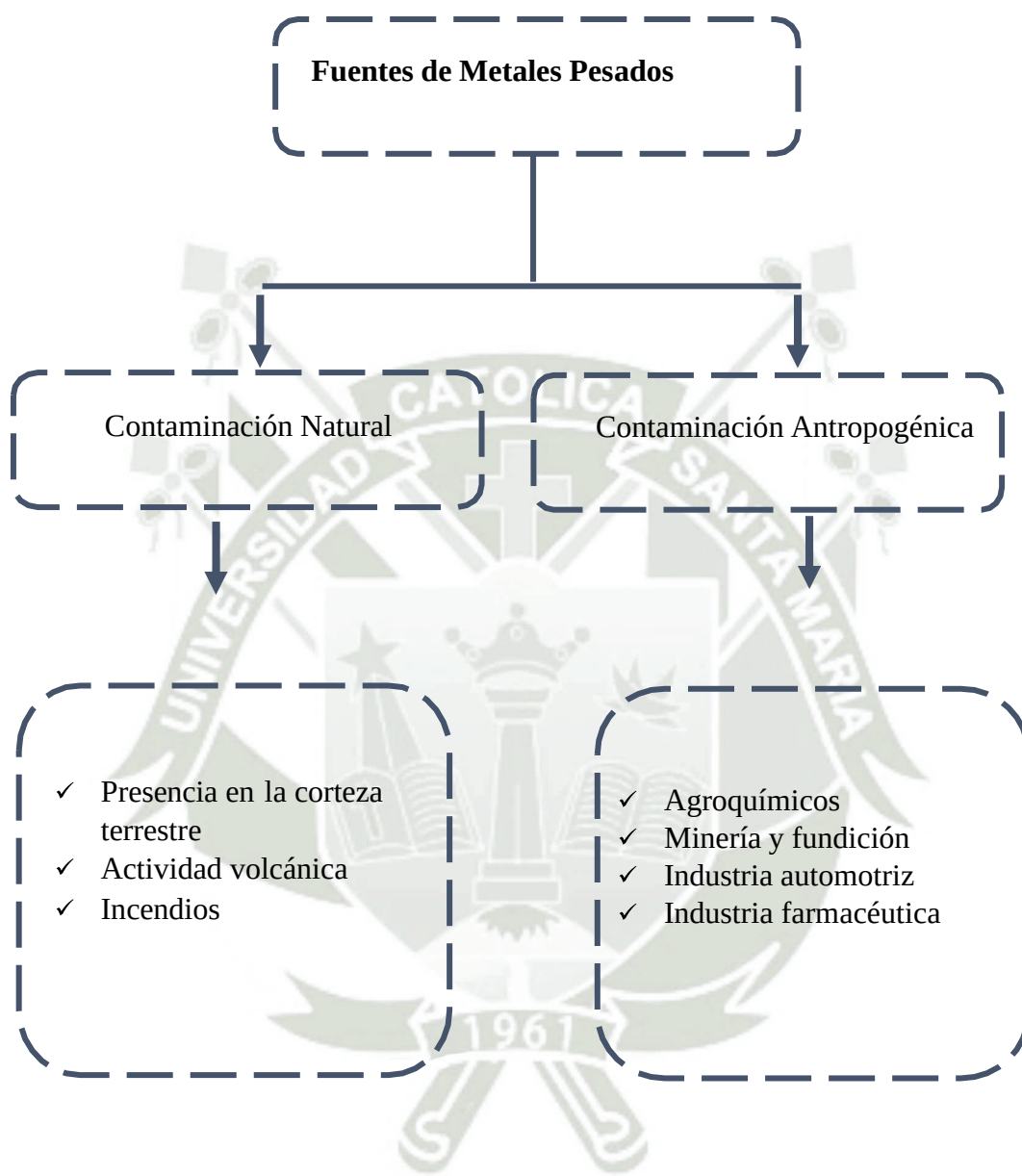
Siendo el objetivo principal dentro de esta investigación el de delimitar los procesos adecuados usados dentro de las principales técnicas de fitorremediación de suelos contaminados con diversos metales pesados, haciendo uso no solamente de plantas con gran capacidad de bioacumularlos, sino que se busca incrementar su eficacia y rendimiento mediante relaciones simbióticas mutualistas con hongos micorrízicos arbusculares; se realizó una búsqueda de información utilizando la base datos Scopus debido al amplio número de revistas indexadas a nivel mundial que contiene, del mismo modo que la base de datos NCBI. Estas bases de datos fueron consultadas para recopilar documentos acorde con la carrera profesional de Ingeniería Biotecnológica; el motor de la búsqueda para ambas bases de datos se armó utilizando los siguientes descriptores: bioremediation, phytoremediation, heavy metal, arbuscular mycorrhizal fungi, environment y soil polluted, con los cuales se obtuvieron documentos primarios y a partir de los cuales se amplió la información con documentos secundarios derivados de los primarios; de todos los documentos devueltos por las bases de datos, se tomaron en cuenta artículos científicos, capítulos de libros y reviews, dentro de los cuáles, como mínimo el 70% tuvo una antigüedad no mayor a 5 años, del mismo modo que se evitaron aquellos documentos que no se encuentren en idioma español, francés o inglés.

CAPITULO I

La contaminación por metales pesados (HM) en suelos y todos sus efectos secundarios, se ven reflejados en la agricultura, disminuyendo la productividad y perjudicando la agrosostenibilidad de los ecosistemas destinados a la producción agrícola (4). Dentro de las publicaciones científicas, el termino metales pesados hace referencia a un grupo de metales y metaloides con potenciales tóxicos; diferentes legislaciones, regulaciones varían considerablemente en su definición, así como que elementos químicos deben ser incluidos. Es por ello que la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), considera el uso de “metales pesados” como una definición engañosa y sin sentido al no tener respaldo químico ni toxicológico, debiendo de abandonar clasificaciones en base a su peso atómico, masa molecular o densidad; para conseguir una nueva clasificación respecto a su toxicidad, la cual depende de las propiedades químicas de los metales y sus compuestos y de las propiedades biológicas de los organismos en riesgo, estas nuevas clasificaciones deben de permitir la interpretación bioquímica de la toxicidad, así como proporcionar un coeficiente racional de que especies o compuesto metálicos sean probablemente más tóxicos (22; 23). Al no encontrar una definición correcta para “metales pesados” y viendo que la tendencia en su uso sigue en aumento, para fines de este estudio los consideraremos como compuestos citotóxicos, mutagénicos y carcinogénicos (2) los cuales provienen tanto de fuentes naturales (estando presentes en la corteza terrestre) como de una serie de actividades antropogénicas (24); tales como la minería, fundición, disposición de residuos industriales y municipales, uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas, deposición atmosférica, irrigación con agua contaminada, la industria automotriz e incluso la industria farmacéutica (25) (**Fig. 1**). Tal es el caso que, durante los últimos cincuenta años, al medio ambiente se le han depositado alrededor de 30 mil toneladas de cromo (Cr) y 800 mil toneladas de plomo (Pb) (26), siendo ambos unos de los elementos con mayores riesgos potenciales para la salud de los seres humanos y el medio ambiente. Esta contaminación por HM (cromo, plomo, mercurio, arsénico, cadmio, zinc, níquel, aluminio, etc.) y sus efectos negativos para los ecosistemas y los seres humanos (**Tabla 1**), con el paso de los años recibe cada vez más atención pública a nivel mundial, debido a que los elementos químicos anteriormente mencionados se acumulan y pueden persistir tanto en los entornos urbanos como rurales por periodos de tiempo extensos (27). Por ende, los suelos contaminados con materia orgánica e inorgánica representan vías potenciales de exposición de dichos contaminantes hacia los seres humanos,

teniendo a la dieta como la mayor fuente de ingesta de metales pesados; como ejemplo, el arroz (*Oryza sativa*) cultivado en suelos agrícolas con moderadas a elevadas concentraciones de cadmio, pueden hacer que la planta bioacumule dicho metal en los granos, logrando así su inserción en la cadena alimentaria, pudiendo provocar ciertas patologías crónicas tales como cáncer de pulmón, diversos cánceres gastrointestinales, daño a los riñones y variedad de hepatopatologías (28). Otros mecanismos por los cuales los HM pueden ingresar al cuerpo humano serían a través de la piel y por las vías respiratorias (inhalación), pudiendo interactuar con un sinnúmero de moléculas presentes en el cuerpo humano o reemplazando ciertos elementos esenciales y de esa forma manifestar sus efectos negativos; entre ellos, iones de plomo pueden sustituir cationes divalentes como Ca^{2+} , Mg^{2+} y Fe^{2+} (esenciales para el cuerpo) y iones monovalente como Na^+ , el cadmio puede reemplazar al zinc por poseer el mismo estado de oxidación, afectando el funcionamiento de varias proteínas (29). Considerando que los metales pesados provienen de diferentes fuentes, y que por ende se pueden encontrar en diferentes concentraciones dependiendo del lugar de investigación, es fundamental la determinación de la presencia o ausencia de estos contaminantes inorgánicos, del mismo modo que conocer si se encuentran por encima de los límites máximos permitidos, con la finalidad de poder establecer los mejores mecanismos de acción para recuperar la calidad del entorno contaminado.

Figura 1. Representación de las fuentes de contaminación por metales pesados.



Nota: Elaboración propia

Tabla 1. Fuentes y efectos de los metales pesados a la salud humana

Nivel de toxicidad	Metal pesado	Fuentes	Efectos a la salud	Referencias
ALTO	Arsénico (As)	Antipiréticos, antisépticos, cáusticos, antiespasmódicos, herbicidas, fungicidas, insecticidas, pinturas y Cosméticos	Efectos carcinogénicos, daño y muerte celular.	(30)
	Cadmio (Cd)	Industrias de baterías, cerámica, electrónica, productos petrolíferos, textiles, insecticidas, soldaduras, industrias metalúrgicas.	Daño irreversible a los túbulos renales (involucrados en la reabsorción de nutrientes)	(31; 32)
	Mercurio (Hg)	Minería, combustión de carbón y desechos hospitalarios	Neurotoxinas que afectan el correcto funcionamiento del cerebro, daño en riñones y pulmones.	(33; 34)
	Plomo (Pb)	Fundición de minerales, industria automovilística, fertilizantes, pesticidas, aditivos y pigmentos en la gasolina, residuos municipales.	Enfermedades cardio- respiratorias, daño al cerebro y los riñones.	(35)
	Selenio (Se)	Electrónicos, industria de la cerámica, pintura, vidrios y metalurgia, industria química, farmacéutica y agrícola.	Toxicidad a las vías respiratorias, gastrointestinales, problemas cardiovasculares y toxicidad crónica.	(36)
	Zinc (Zn)	Hierro y acero galvanizado, construcción y revestimientos, conductos de calefacción, automóviles.	Diarrea, fallo hepático, sangre en la orina, fallo renal, ictericia, calambres abdominales y dolor epigástrico.	(37)

Nivel de toxicidad	Metal pesado	Fuentes	Efectos a la salud	Referencias
Moderado	Cobalto (Co)	Industria de los metales, de construcción, cosméticos y joyería, exposición médica.	Daño neurológico, cardiovascular y endocrino.	(38)
	Cromo (Cr)	Curtiembres, galvanoplastia y refractario	Úlceras, dermatitis y otras reacciones alérgicas	(39)
	Cobre (Cu)	Chips electrónicos, baterías, celulares, tuberías de agua, industria de fertilizantes, industria del papel, fungicidas, insecticidas, catalizadores, y productos para el procesamiento de metales	Sangrados gastrointestinales, diarreas, taquicardia, hematurias, problemas respiratorios y anemia hemolítica	(37)
	Níquel (Ni)	Minería y fundición, emisiones de los vehículos, desechos familiares, municipales e industriales, industria siderúrgica y cementera.	Irritación pulmonar, inflamación pulmonar y enfisema	(40)
Bajo	Bario (Ba)	Minería y refinación	Daño cardiovascular, renal, respiratorio, hematológico, al sistema nervioso y endocrino	(41)
	Manganeso (Mn)	Minería e industria metalúrgica	Neurotoxicidad por manganeso	(42)
	Estroncio (Sr)	Plantas de energía térmica, industrias de metalurgia e industrias químicas	Toxicidad general	(43)

Nota: Tomado de (44)

CAPITULO II

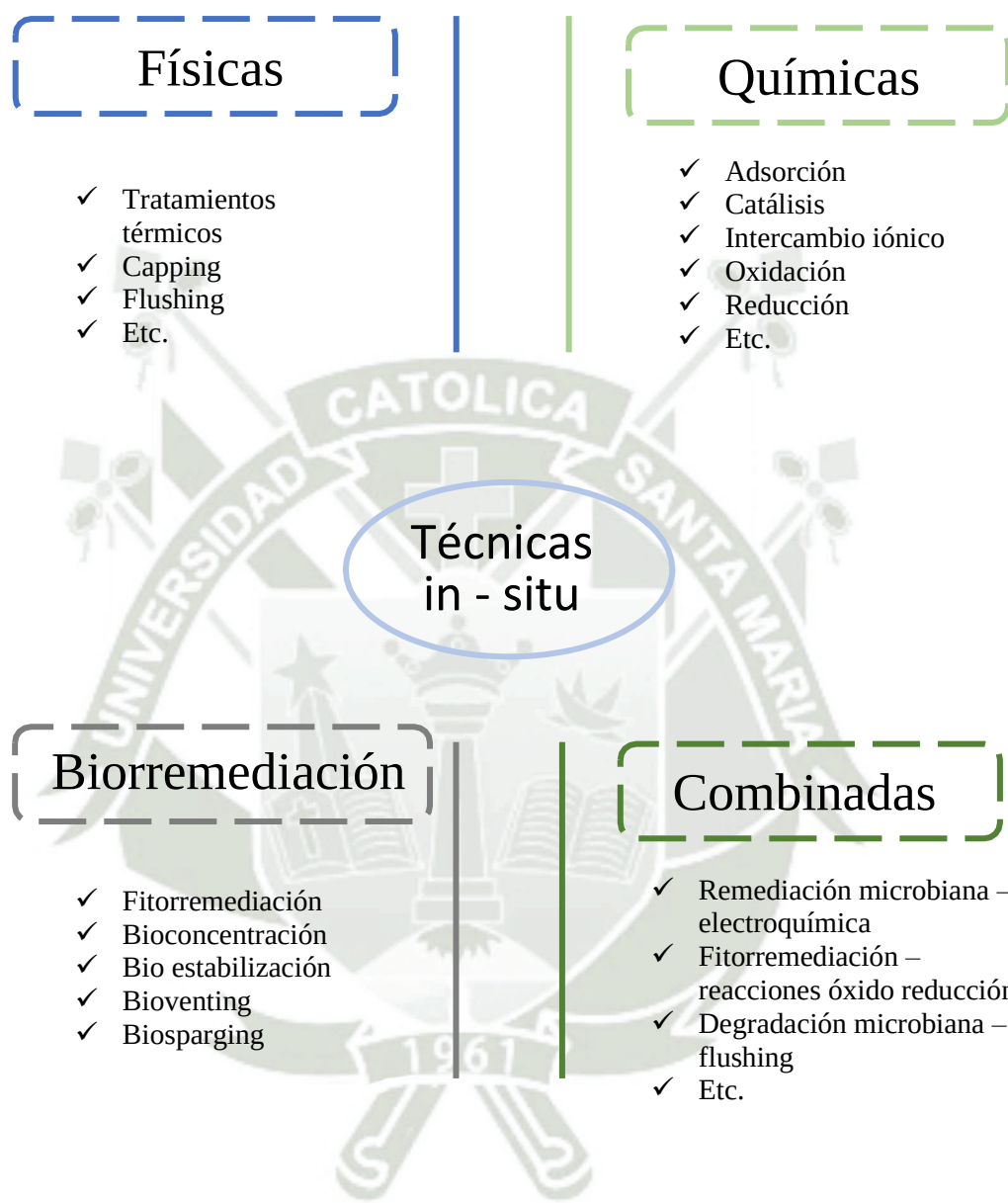
2. CUERPO DE LA REVISIÓN

Las tecnologías de remediación de suelos contaminados en la actualidad se dividen en dos grandes grupos: remediación “ex situ”, en la cual se remueve el suelo o los cuerpos de agua subterránea para tratarlos, en algunos casos son retornados a su lugar de origen, y la remediación “in situ”, donde los métodos usados para lograr remediar los suelos o los cuerpos de agua son tratados sin la necesidad de trasladar las tierras a otros lugares (45).

Es gracias a estas virtudes que las tecnologías de remediación in situ deben de ser mayormente implementadas para minimizar o revertir la contaminación de terrenos por metales pesados, conjuntamente con mayores esfuerzos en investigación para poder acrecentar los niveles de eficacia logrados hasta el momento; es posible que las técnicas de aplicación in situ puedan clasificarse según sus propiedades (46) en físicas, químicas, biológicas y métodos combinados (**Fig. 2**).

- La remediación mediante el uso de métodos físicos tiene por finalidad revertir o detener el deterioro del medio ambiente haciendo uso de procedimientos tales como: tratamientos térmicos, capping, flushing, etc.
- La remediación mediante el uso de métodos químicos, hace uso de los principios de las reacciones químicas para remover los contaminantes. Los mecanismos incluidos son: adsorción, catálisis, intercambio iónico, reacciones de oxido – reducción, etc.
- La remediación a través de procesos biológicos, recibe el nombre de “Biorremediación”, los cuales incluyen reacciones de absorción, transformación y degradación; las cuales pueden ser llevadas a cabo por animales, plantas y microorganismos.

Figura 2. Clasificación de las tecnologías de remediación in situ



Nota: Tomado de Song Y et al, 2017 (47).

Dentro de la biorremediación, para este trabajo de investigación nos enfocamos principalmente en una de sus ramas que utiliza como material biológico a las plantas y microorganismos para combatir y retornar los diferentes suelos a su estado previo antes de la contaminación por metales pesados. La fitorremediación como técnica, se basa principalmente en dos mecanismos, muchas veces complementarios, por los cuales las

plantas pueden transportar los metales presentes en el suelo mediante las raíces hacia sus partes aéreas (hojas, flores y frutos) o por el contrario evitar dicho flujo y simplemente inmovilizar todo metales pesado (reduciendo su biodisponibilidad) en las raíces y alrededores (48).

Tomar PC, et al 2020, refiere que los principales tipos de fitorremediación son (49):

1. **Fitoextracción:** comúnmente también denominada fitoacumulación, es el principal método de fitorremediación ya que se ha demostrado que todas las plantas pueden absorber y almacenar metales pesados en su partes aéreas o comestibles. Aquellas plantas que poseen la capacidad de acumular mayores concentraciones de HM sin presentar alteraciones en su metabolismo o exteriorizar síntomas de fitotoxicidad son llamadas **hiperacumuladoras** (desarrolladas posteriormente). Según Wang X; et al, 2021 demostraron que la alfalfa (*Medicago sativa L.*) cultivada en terrenos con elevadas concentraciones de zinc posee un gran potencial para su fitoextracción, presentando relativa concentración en la biomasa, gran transferibilidad entre suelo – planta, buena tasa de crecimiento y facilidad de cosecha (50). Según Yu G; et al, 2020 llevaron a cabo la fitoextracción de cadmio de tierras de cultivo usando exclusivamente *Celosia argenta Linn* o en combinación con bacterias y químicos para mejorar la extracción (51). Según Zhang Y; et al, 2019 buscaron mejorar el rendimiento de fitoextracción de *Lolium perenn L.* haciendo uso de 3 agentes quelantes biodegradables para remediar suelos artificialmente contaminados con cadmio y plomo, logrando aumentar el índice de transferencia y el factor de bio concentración (52). En los últimos años ha surgido el término “fitominería”, la cual consiste en el uso de plantas para la fitoextracción de metales nobles y preciosos, los cuales se encuentran en bajas concentraciones o de fuentes secundarias; que no permiten la rentabilidad de las tecnologías de extracción tradicionalmente usadas (hidrometalurgia) (53).
2. **Fitotransformación:** otra denominación sería fitodegradación, este procedimiento se base en el hecho de que los contaminantes presentes en el suelo pueden ingresar a la planta y ser transportados por el xilema a diversos órganos, siendo indispensable que posean una gran similitud con ciertos micronutrientes esenciales para la planta, posteriormente a que los compuestos orgánicos e inorgánicos se encuentren dentro de la planta, esta puede degradarlos hacia compuestos menos tóxicos haciendo uso de una serie de enzimas o cofactores. Sin embargo, esta estrategia no es recomendable para

combatir la presencia de metales pesados. Según Al-Baldawi IA; et al, 2018 concluyeron que la planta acuática *Azolla pinnata* puede servir como un biofiltro de agua contaminada con colorantes a base de metileno gracias a que posee los mecanismos adecuados para la realización de su fitotransformación y mineralización (54). Según Li Y, et al (2016) refiere que evaluaron la generación de tres metabolitos de degradación, generados a partir de Ibuprofeno (como residuo de la industria farmacéutica), con la finalidad de comprobar los procesos de fitotransformación llevados a cabo en *Typha angustifolia* principalmente por dos enzimas: carboxilesterasas y monooxigenasas; observando la presencia de dichos metabolitos en las hojas, confirmando así su fitorremediación además de sugerir la rizodegradación como proceso complementario (55). Según Li M, et al (2020) propusieron para zanahoria y apio determinadas rutas metabólicas (conjugación con glutatión o con ácido fenilacético) y algunas reacciones como: hidroxilación, metilación, aminación, sulfonación, metoxilación, etc.) que contribuyen en la fitotransformación del fármaco anticonvulsivo Carbamazepina, debido a su persistencia, toxicidad y efectos teratogénicos con potencial riesgo para los humanos bajo la exposición en la cadena alimentaria (56).

3. **Fitoestabilización o fitoinmovilización:** para esta técnica, las plantas hacen uso exclusivamente de su área radicular, especialmente para reducir la movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados y evitar de esta forma que puedan llegar a los cuerpos de agua subterránea o ser arrastrados por el agua de lluvia o regadíos, contaminando áreas cada vez más extensas; evitando por último la polución de la cadena alimentaria. Mayormente, el uso de plantas con un desarrollo extenso de su área radicular es preferible, para así facilitar la adsorción y acumulación de los contaminantes. Según Zhao L, et al (2016) compararon dos eco tipos de *Athyrium wardii*, uno proveniente de una zona contaminada con plomo y otro de un área no contaminada, concluyendo que el primer tipo posee una mayor adaptación y mejor crecimiento en presencia de plomo, además de un elevado factor de bioacumulación (BCF) y un bajo factor de transferencia; requisitos fundamentales para los procesos de fitoestabilización (57). Según Sylvain B; et al (2016) utilizaron dos especies de sauces: *Salix purpurea* y *Salix viminalis* para verificar la fitorremediación de suelos contaminados con arsénico, antimonio y plomo provenientes de una mina abandonada de oro, evidenciando que ambas especies fueron capaces de desarrollar considerablemente sus sistemas radiculares, sin embargo, *S. purpurea* presentó mayor biomasa (58). Los tres metaloides fueron acumulados principalmente en la rizosfera, siendo *S. purpurea* la especie más adecuada para la fitoinmovilización ya que no posee

la capacidad para translocar dichos elementos de la raíz a sus partes superiores. De igual forma que en los procesos de fitoextracción, se observó que los rendimientos de los procesos de fitoestabilización haciendo uso solamente de los mecanismos presentes en las plantas es bajo, razón por la cual, se buscan estrategias que incrementen dichos rendimientos; por ejemplo, Roy Chowdhury A; et al (2019) en haciendo uso de la planta *Chrysopogon zizanioides* L. con la adición de los residuos provenientes de los procesos de tratamiento para obtener agua potable, los cuales poseen partículas que absorben con relativa eficacia metales pesados, buscó combatir la acidificación y erosión de suelos así como disminuir la presencia de metales debido a los drenajes ácidos de las minas; obteniendo como resultados la reducción de la erosión y disminución de la biodisponibilidad de los metales en suelo (59).

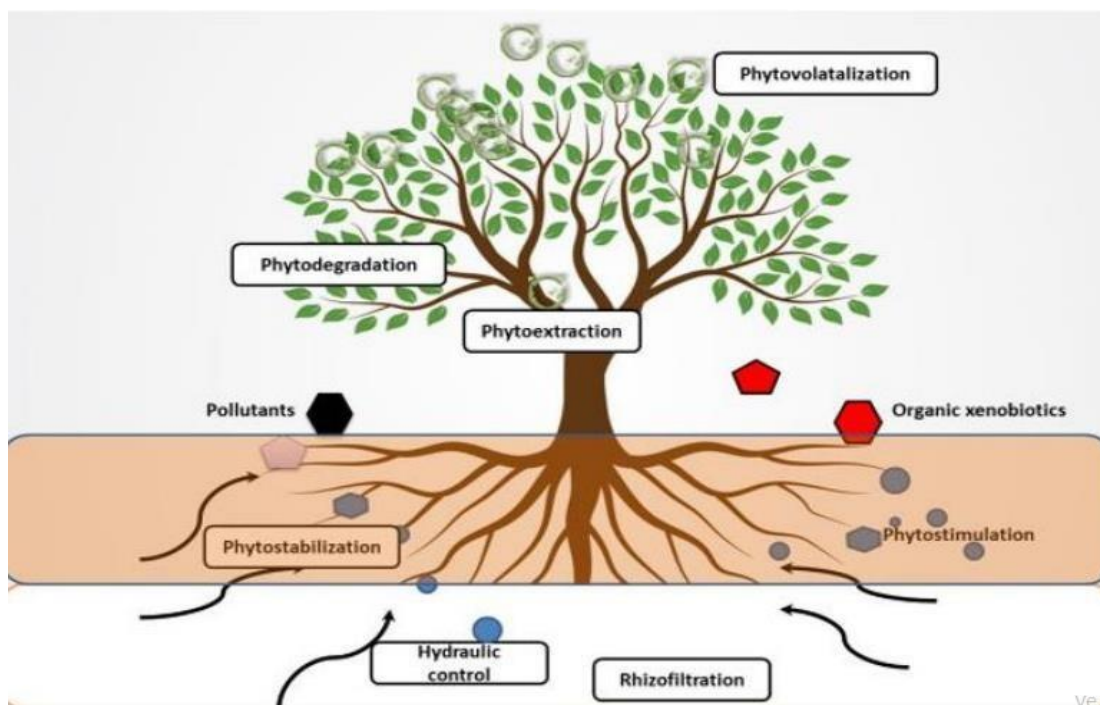
4. **Fitovolatilización:** este mecanismo combina la fitorremediación y la fitodegradación ya que es necesaria la absorción de los contaminantes hacia las partes aéreas de la planta y su futura conversión en compuestos menos tóxicos para finalmente ser eliminados por evapotranspiración. El proceso de fitovolatilización puede subdividirse en dos tipos (60):
 - a. Fitovolatilización directa: denominado simplemente fitovolatilización por ser el proceso mayormente estudiado, siendo un mecanismo muy parecido a las rutas de evapotranspiración del agua, es el resultado de la captación y transferencia de los contaminantes mediante la raíz a la parte aérea y volatilizado por el tronco, tallos y hojas.
 - b. Fitovolatilización indirecta: este proceso se da principalmente por las diferentes reacciones llevadas a cabo en las raíces tales como, bajar el nivel freático, incrementar la permeabilidad del suelo, redistribución hidráulica para el transporte de compuestos químicos, mejorar la captación de las precipitaciones; incluyendo dentro de este proceso todo compuesto volatilizado que fue transformado (fitotransformación) dentro de la planta para una mejor biodegradación.

Es notorio que en los procesos de fitovolatilización, la mayoría logra mejores resultados cuando los contaminantes son de origen orgánico: material particulado (PM) y compuestos orgánicos volátiles (VOC), gracias a su mejor metabolización y degradación, no obstante, encontramos debido a las diversas actividades antropogénicas: contaminantes inorgánicos del aire (IAP) y metales pesados, conllevando a una serie de patologías al ser inhalados por el ser humano (**Tabla 2**). Tenemos el caso del mercurio (Hg^{2+}) en su forma biodisponible para la

absorción mediante las raíces y que mediante mecanismos de reducción al interior de las células de la planta, lo transforman en Hg^0 , el cual siendo una molécula más volátil puede dirigirse al exterior o escapar mediante la evapotranspiración vía los estomas; otro mecanismo para el mismo metal sería: en primer lugar mediante algunas bacterias, arqueas y algunos hongos de la rizosfera con la ayuda de reacciones catalíticas convertir el Hg^{2+} a Hg^0 , el cual es fitoextraído por las plantas y volatilizado (61).

5. **Rizofiltración o fitofiltración:** es una subtécnica de fitorremediación, la cual puede hacer uso tanto de plantas terrestres como de plantas acuáticas con la finalidad de absorber, concentrar y posteriormente precipitar los metales pesados dentro de su biomasa; un requisito indispensable para el uso de esta técnica es que los contaminantes deben estar presentes en el agua o en desechos líquidos que serán absorbidos por las raíces. Según Han Y, et al (2021) evaluaron la capacidad de concentrar uranio de aguas subterráneas contaminadas de 4 plantas: *Latuca sativa*, *Brassica campestris* L., *Raphanus sativus* L. y *Oenanthé javanica*; este experimento fue llevado a cabo bajo sistemas de hidroponía demostrando que las concentraciones de uranio encontradas en las raíces fueron el doble que las encontradas en partes aéreas de todas las plantas, elucidando que los primeros pasos para la rizofiltración de uranio son la adsorción y precipitación en las raíces (62). Según Leblebici Z, et al (2019) evaluaron la capacidad de rizofiltración de la planta acuática *Pistia stratiotes* frente a concentraciones de níquel, demostrando que posee un potencial efecto acumulador, especialmente en las raíces, convirtiéndose en una promisoría planta para la remediación de aguas residuales domésticas e industriales (63). Según Liópez-Chuken; et al (2012) trabajando con *Nicotiana tabacum* más la adición de sales de cloro en agua contaminadas con cadmio, evidenciando su potencial uso para la rizofiltración, concentrando elevadas cantidades de cadmio (185 a 280 mg/kg) (64).

Figura 3. Mecanismos de fitorremediación.



Nota: Tomado de Tomar PC, et. 2020 (49).

Tabla 2. Casos de estudio de contaminantes del aire

País	Contaminante	Patologías	Referencias
China	Material particulado	Enfermedades cardiovasculares	(65)
China	Material particulado	Autismo	(66)
China	Material particulado	Desórdenes mentales	(67)
Estados Unidos	Material particulado	Daño mitocondrial en leucocitos y daños en el ADN	(68)
Estados Unidos	VOCs	Incrementa riesgo de cáncer	(69)
India	Material particulado	Daño vascular	(70)
Vietnam	VOCs	Incrementa riesgo de cáncer	(71)
Senegal	BTEX*	Daño ADN por estrés oxidativo e inflamatorio	(72)
Singapur	Smog	Enfermedades cardiovasculares	(73)
Kuala Lumpur y Malasia	Smog	Enfermedades cardiovasculares	(74)

*Acrónimo para benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos

Nota: Tomado de Lee BXY, et al, 2020 (75)

Se evidencia que las técnicas de fitorremediación no poseen elevadas tasas de descontaminación por si solas, siendo necesario el uso de métodos combinados para poder restaurar u obtener niveles no tóxicos en los terrenos donde se implementarán, del mismo modo dentro de esta tecnología quedan mecanismos por dilucidar, tomando como ejemplo, las rutas físicas, bioquímicas y procesos moleculares por los cuales las plantas absorben, almacenan y procesan los metales pesados. Se necesitan mayores estudios para poder identificar nuevas plantas hiperacumuladoras simultáneamente con los metales pesados que son capaces de acumular, pero también investigar nuevas perspectivas que contribuyan a mejorar la eficacia de las fitorremediaciones. Otro factor limitante a tener en cuenta, es la posible contaminación de los niveles superiores en la cadena trófica si algunos animales llegasen a consumir plantas con niveles perjudiciales de metales. Finalmente, toda tecnología de fitorremediación es un proceso de larga duración, por lo cual, no son capaces de ofrecer una solución inmediata y se requiere de procedimientos posteriores de manejo de la biomasa y metales pesados (13).

2.1 Nuevas perspectivas y tecnologías para mejorar los procesos de fitorremediación

- **Fitorremediación asistida por lombrices de tierra:** en suelos contaminados y no contaminados, podemos encontrar diferentes organismos vivos tales como: diversos microorganismos, anélidos, nemátodos y gusanos de tierra, los cuales poseen funciones específicas dentro del ecosistema. En este caso, los gusanos de tierra ayudan a mejorar las propiedades del suelo, así como interactuar con la microbiota con la finalidad de favorecer el crecimiento de las plantas, actuando principalmente como “bio-agentes” en la descomposición de residuos orgánicos y de desechos industriales (76). Se evaluó el proceso de fitorremediación de *Neyraudia reynaudiana* cultivada bajo condiciones de estrés por plomo y zinc proveniente de áreas cercanas a una mina, agregando posteriormente lombrices de tierra (*Eisenia fétida*) más ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) como compuesto quelante; logrando incrementar así la biomasa aérea y aumentar la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo, demostrando que las lombrices de tierra mejoran las propiedades del suelo, incrementando la disponibilidad de nutrientes (77). Según Ji P; et al (2020), se demostró que la adición de lombrices de tierra mejora la biomasa de *Solanum nigrum* L. del mismo modo que la capacidad de concentrar cadmio en sus partes aéreas (incrementando su factor de bio concentración sin alterar el factor de transferencia), concluyendo que *S. nigrum* puede ser usada como planta hiperacumuladora de Cd y que las lombrices de tierra mejoran los procesos de fitorremediación (78). Para Wang G, et al; Mahohi A;

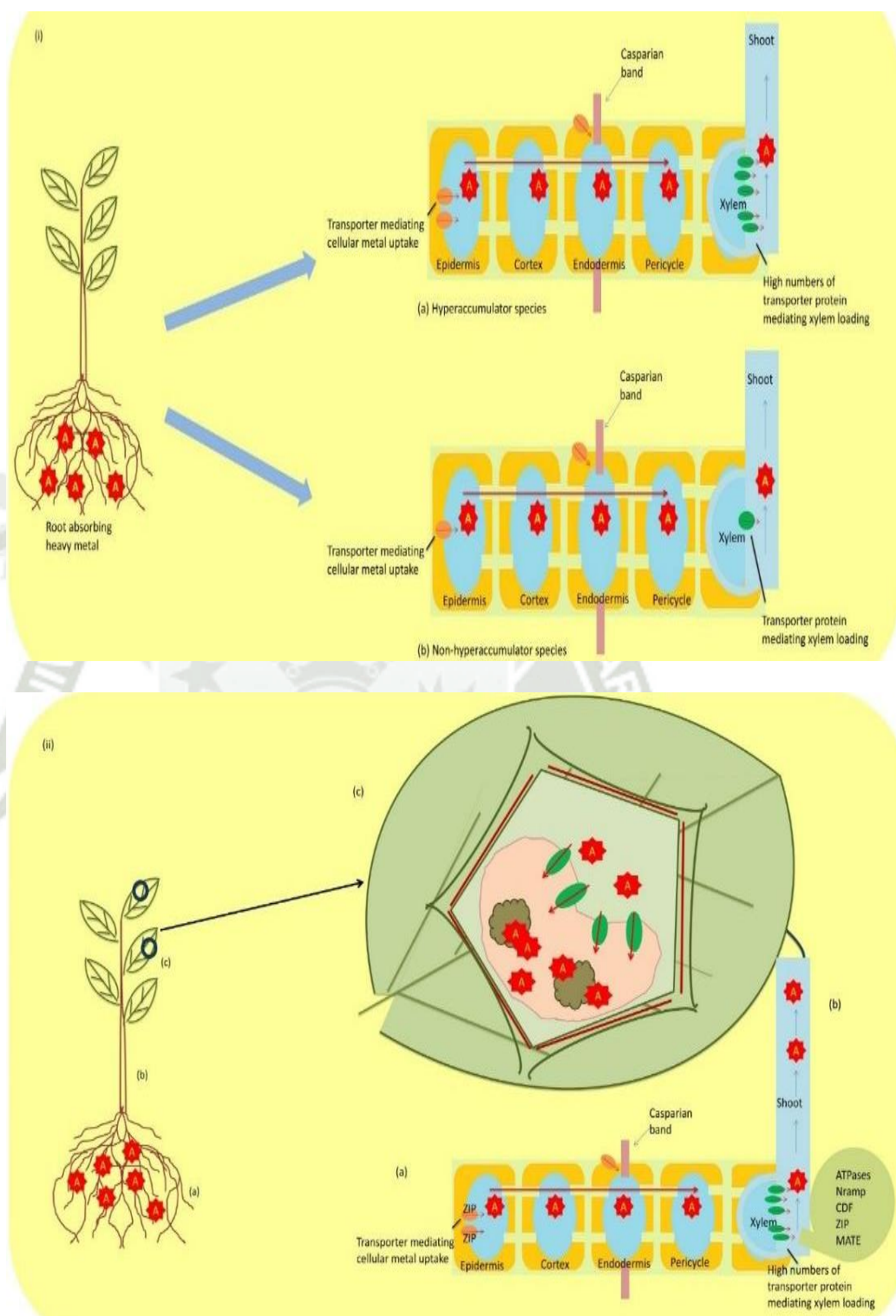
Santana NA, et al; se observaron que haciendo uso de lombrices de tierra más la inoculación de diferentes plantas acumuladoras o hiperacumuladoras con hongos micorrízicos arbusculares se lograron incrementar las eficiencias en los procesos de fitorremediación frente a diferentes metales pesados, mejorando el crecimiento de las plantas, confiriéndoles mayor tolerancia frente a los metales, permitiendo una mayor absorción de nutrientes o metales, pese a obtener buenos rendimientos combinados, la presencia de efectos antagónicos entre los AMF y las lombrices de tierra hacen necesario mayores estudios al respecto (79; 80; 81).

- Fitorremediación asistida por microorganismos:** plantas y microorganismos coexisten en la naturaleza y en muchas ocasiones logran establecer relaciones mutualísticas, conociendo que en los procesos de fitorremediación se usan las plantas para remover contaminantes de las tierras (82). Las plantas secretan ácidos orgánicos de bajo peso molecular, los cuales son capaces de degradar, inmovilizar o transformar compuestos tóxicos, estas moléculas a su vez son una de las principales fuentes de alimentación para los microorganismos rizosféricos, aumentando así su cantidad y variedad, con lo cual se logran acelerar los procesos de fitorremediación; dentro de la relación de simbiosis, los microorganismos son capaces de secretar sustancias promotoras del crecimiento de las plantas, permitiéndoles crecer adecuadamente bajo condiciones desfavorables (83). Según Nurzhanova A, et al (2021), se aislaron dos cepas bacterianas (*Bacillus vallismortis* y *Bacillus aryabhattai*) presentes en la rizosfera de *Curcubita pepo* L. y *Xanthium strumarium*, las cuales fueron capaces de crecer en medio de cultivo suplementado con diclorodifenildicloroetileno (DDE) como la única fuente de carbono, siendo un contaminante presente en diversos pesticidas; es así que cuando se inocularon plantas con las cepas aisladas, estas permitieron evidenciar un menor estrés frente al DDE consecuentemente con un mayor desarrollo aéreo y de las raíces, incrementando la capacidad fitorremediadora de ambas plantas, en particular la fitoestabilización (84). Según García-Sánchez M (2018) compararon la efectividad de 4 métodos de remediación para suelos contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), remediación de manera natural, bioaumentación, fitorremediación y fitorremediación asistida por microorganismos, demostrando que el uso conjunto de plantas con microorganismo propios del suelo fue el mecanismo más eficaz para la degradación de hidrocarburos (85). Se observa que la mayoría de microorganismos poseen diversas rutas metabólicas que les confieren la posibilidad de transformar o degradar compuestos tóxicos orgánicos al igual que confieren a las plantas mayores

niveles de tolerancia y mejores índices de crecimiento, igualmente que reducen los índices de toxicidad ocasionados por metales pesados, además de intervenir en la toma de nutrientes por las raíces de manera sustentable.

- **Fitorremediación asistida por fitohormonas:** este mecanismo de fitorremediación permite que las plantas puedan acumular mayores cantidades de metales pesados tanto en las raíces como en las partes aéreas, las principales fitohormonas conocidas por poseer efectos sobre el crecimiento y desarrollo son: auxinas (IAA), giberelinas, citocinas y el ácido abscísico (ABA) (86). Diversos metales pesados son capaces de alterar las rutas metabólicas de estas hormonas, con lo cual desencadena mecanismos de respuesta y defensa, siendo fundamentales para la producción de diversas moléculas con propiedades quelantes, que contribuyen a combatir las especies reactivas de oxígeno conjuntamente con moléculas antioxidantes, haciendo posible que cuando la toxicidad por el metal se haya desvanecido, sean las fitohormonas las encargadas de la reactivación del crecimiento (87).
- **Fitorremediación con plantas hiper acumuladoras:** las plantas pueden categorizarse en tres grupos respecto a sus habilidades para absorber metales: indicadoras, excluidoras e hiper acumuladoras. Las primeras son plantas que concentran los metales en las partes aéreas en concentraciones proporcionales a los niveles de los suelos y son usadas en su mayoría para la exploración de suelos mineralizados, las segundas son plantas que acumulan de moderadas a altas cantidades de metales pesados, sin embargo, solo realizan procesos de fitoestabilización y finalmente las plantas hiper acumuladoras (**tabla 3**), que son aquellas capaces de acumular hasta 100 veces las concentraciones frente a especies no acumuladoras, sin sufrir los efectos negativos de los metales pesados (**figura 4**). Las interacciones entre las plantas con metales pesados se ven influenciadas por: los flujos de absorción de nutrientes, la interacción de los metales con moléculas funcionales y la generación de especies reactivas de oxígeno. Las especies de plantas hiper acumuladoras muy aparte de su extraordinaria capacidad para concentrar los metales (**Figura 4**), deben poseer tasas de crecimiento y desarrollo elevadas (53; 88). Dentro de las estrategias para incrementar la capacidad de las plantas (hiper acumuladoras y no acumuladoras) para concentrar metales pesados se encuentra la ingeniería genética que nos permite sobre expresar ciertos genes (reguladores de proteínas transportadoras o canales iónicos) (**tabla 3**) responsables en los procesos de fitorremediación, siendo así la manipulación de pequeños fragmentos de ADN una técnica promisorio (49).

Figura 4. Mecanismos de captación y defensa frente a metales pesados.



Nota: Tomado de Singh S, et al, 2016 (89).

En la figura 4 (i), se esquematiza la expresión de genes reguladores de diversos transportadores iónicos en los procesos de hiperacumulación mediados por la presencia de metales pesados, siendo notoria la diferencia entre especies hiper

acumuladoras (a) y no acumuladoras (b). En la figura 4 (ii) profundizamos en los mecanismo de tolerancia a metales pesado por parte de plantas hiper acumuladoras, en (a) la absorción mediada por ZIP (proteínas transportadoras de Zn) a través de todas las capas celulares, en (b) gracias a diferentes proteínas no específicas se da su transporte mediante el xilema a las diferentes partes de la planta (ATPasas, Nramps, CDF, ZIP, MATE), finalmente en (c) se muestra una de los principales mecanismos de almacenamiento de metales pesados u otros contaminantes: su inserción dentro de las vacuolas.

- **Fitorremediación asistida por hongos micorrízicos arbusculares (AMF):** las micorrizas se clasifican en micorrizas arbusculares, micorrizas de orquídeas, ectomicorrizas y micorrizas ericoides; donde las primeras son capaces de establecer relaciones de simbiosis con aproximadamente el 80% de las plantas vasculares. La principal interacción se da en las raíces, mejorando así los recursos del suelo y ayudando frente a las limitaciones medioambientales. Los AMF favorecen la absorción de nutrientes y agua, recibiendo como beneficio pequeñas cantidades de carbohidratos para su correcto crecimiento y desarrollo, los AMF incrementan el área radicular de la planta, convirtiéndose en una barrera física para los diversos xenobióticos presentes en el suelo, logrando retener diversos contaminantes (fitoestabilización). En suelos contaminados con metales pesados, diversos estudios han reportado la presencia de hongos micorrízicos arbusculares en asociación con plantas endógenas, sugiriendo así su aplicación en la optimización del desarrollo y la eficiencia de la planta con recursos limitados, del mismo modo, que los procesos de fitorremediación asistida por AMF han recibido una atención especial al ser una técnica respetuosa con el medio ambiente, poseer costos bajos de implementación y no poseer efectos contaminantes secundarios (90).

Tabla 3. Proteínas transportadoras y canales iónicos para metales pesados.

Transportados	Metal	Planta	Transportados	Metal	Planta
MTP1		<i>Arabidopsis</i>	CAX1		
MTP3		<i>thaliana</i>	CAX2		
ZIP1		<i>Medicago</i> ,	IRT1		
ZIP4		<i>Oriza sativa</i>	NRAMP3		
IRT1	Zn	<i>Arabidopsis</i>	NRAM4	Mn	<i>Arabidopsis</i>
ZRT1-4		<i>Arabidopsis</i>	VIT1		<i>thaliana</i>
YS/YSL1		<i>Maie, rice, etc</i>	ECA3		
ZIF3		<i>Arabidopsis</i>	MTP8		
AMF2		<i>Oriza sativa</i>	MTP11		
IRT1			ECA1		
YS/YSL1			CAX1		
NRAMP3			CAX2		
NRAM4		<i>Arabidopsis</i>	IRT1		
NRAMP5	Fe	<i>thaliana</i>	NRAMP3		
ZIF3			NRAMP4		
ZRT1-4			NRAMP5		
VIT1			VIT1	Cd	<i>Arabidopsis</i>
COPTR5		<i>Arabidopsis</i>	ABCC1		<i>thaliana</i>
AMF5		<i>thaliana</i>	ABCC2		
AMF7/RAN1			AMF3		
AMF1					
AMF6	Cu				
AMF8					
			CNGC 1-6		
			IREG2	Ni	<i>Arabidopsis</i>
					<i>thaliana</i>

Abreviaciones: MTP (proteína de tolerancia a metales), ZIP (proteína transportadora de Zn y Fe), YS (yellow stripe), YSL (yellow stripe 1), IRT (proteína transportadora regulada por Fe), ZRT (proteína transportadora regulada por Zn), AMF's (ATPasas para metales pesados), COPT (proteína transportadora de cationes de cobre), NRAMP's (proteínas de resistencia natural a HM asociada a macrófagos), CDF (facilitador de la difusión de cationes), ABC (proteínas de unión a ATP), VIT1 (transportadores vacuolares de Fe), CAX (intercambiadores de Ca), ECA (Ca-ATPasa del retículo endoplasmático), CNGC (canales controlados por nucleótidos cíclicos), IREG2 (proteína de transporte regulada por Fe).
Nota: Tomado de Thakur M, et al 2022 (91)

2.2 Fitorremediación de metales pesados por hongos micorrízicos arbusculares

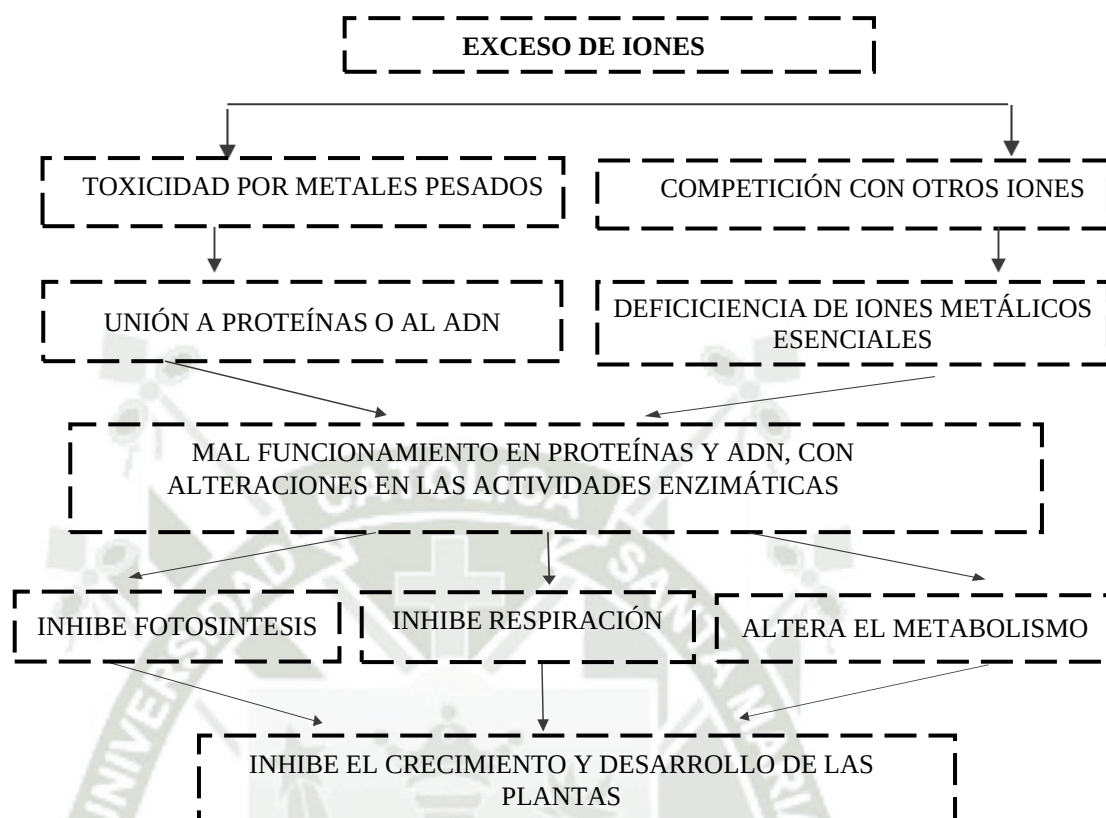
Toxicidad en plantas por metales pesados

Los suelos contaminados por metales pesados se pueden dividir en tres categorías, dependiendo fundamentalmente de su procedencia y ocurrencia (7):

- Primarios: son aquellos suelos habitados por especies de plantas metalofitas, aquellas que han desarrollado mecanismos para contrarrestar los efectos negativos de HM y por ende pueden sobrevivir incluso en presencia de elevadas concentraciones (92).
- Secundarios: debido a las diferentes actividades antropogénicas mencionadas en la figura 1, los suelos considerados inicialmente primarios se ven alterados (incrementando las concentraciones iniciales y diversificando las especies de metales presentes), convirtiéndose así en suelos secundarios.
- Terciarios: este tipo de suelo se ve contaminado o por deposición atmosférica proveniente de las fundiciones de metales (contaminación antropogénica) o por deposición aluvial proveniente de sedimentos enriquecidos con metales.

En función del metal, los daños hacia las células vegetales pueden ser distintos. De manera que, a nivel celular y molecular se ven alterados procesos fisiológicos como: inactivación y desnaturalización de enzimas, proteínas e incluso del material genético (ADN), un segundo aspecto donde se ve reflejada la toxicidad por metales es en el bloqueo de grupos funcionales de varias moléculas metabólicamente importantes, la sustitución de iones esenciales por iones metálicos provoca cambios en sus estructuras y daño a las paredes celulares; ambas alteraciones influyen reduciendo el metabolismo de las plantas (fotosíntesis, respiración, producción de enzimas claves, etc.) e incrementan la producción de radicales libres y la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (93).

Figura 5. Efecto de los metales en el crecimiento de las plantas.



Nota: Tomado de Krishnamoorthy R et al, 2019 (93)

A propósito de la ya conocida relación perjudicial de los metales pesados hacia los ecosistemas y sobre todo para los suelos agrícolas, evidenciando sus efectos negativos en la calidad de los suelos, en la productividad lograda, además de poder introducirse en la cadena alimentaria, menoscabando la salud de animales y seres humanos, se hace necesario poder determinar con que magnitud se da la transferencia trófica de metales pesados hacia las plantas (94) del mismo modo que conocer algunas definiciones que nos permitirán comprender con mayor facilidad los temas desarrollados posteriormente.

- Bio transferencia o mejor conocida como transferencia trófica, hace referencia al paso de un contaminante de un nivel trófico a otros, teniendo como ejemplo el consumo de pescados contaminados con mercurio o el consumo de arroz contaminado con cadmio (95).
- Bioconcentración: es la acumulación de contaminantes dentro de los seres vivos debido a su absorción proveniente del medio ambiente abiótico, su determinación se base en el factor de bioconcentración (96).

- Bioacumulación: hace referencia a la acumulación de contaminantes dentro de los seres vivos sumando como fuentes de contaminación al medio ambiente como a la dieta (97; 98).
- Biomagnificación: este proceso ocurre cuando existe un incremento en la concentración de un contaminante a lo largo de por lo menos dos niveles tróficos en la cadena alimentaria, en caso las concentraciones se vean disminuidas, recibirá el nombre de biodilución (99).
- Trofodinámica: hace referencia al estudio de cualquier transferencia de contaminantes o compuestos químicos entre niveles tróficos (100).

2.3 Cuantificación de la transferencia trófica para metales pesados

- Factor de transferencia trófica (TTF por sus siglas en inglés)

$$TTF = \frac{\text{Concentración de metales en los diferentes tejidos}}{\text{Concentración de metales en la comida del organismo}}$$

- Factor de transferencia (TF por sus siglas en inglés)

$$TF = \frac{\text{Concentración de metales en los tejidos de la planta}}{\text{Concentración total en el suelo}}$$

- Factor de transferencia de metales (MTF por sus siglas en inglés) en base seca

$$MTF = \frac{\text{Concentración de metales en la planta}}{\text{Concentración de metales en el suelo}}$$

- Factor de acumulación (AF por sus siglas en inglés)

$$AF = \frac{\text{Concentración de HM en las partes comestibles de la planta}}{\text{Concentración total en el suelo}}$$

- Factor de bioacumulación (BAF por sus siglas en inglés)

$$BAF = \frac{\text{Concentración de metales en los tejidos del organismo}}{\text{Concentración total en el medio abiótico}}$$

donde el medio abiótico para animales acuáticos es el agua (los sedimentos están incluidos) y para los animales terrestres es el suelo.

- Factor de biomagnificación (BMF por sus siglas en inglés)

$$BMF = \frac{\text{Concentración de metales en el organismo}}{\text{Concentración de metales en la dieta del organismo}}$$

2.4 Mecanismos moleculares de tolerancia a metales pesados en plantas

La habilidad de ciertas plantas para crecer y desarrollarse bajo la presencia de metales pesados da a entender que existen mecanismos para combatirlos, donde evitar o limitar su captación por las células y su resistencia nata junto con procesos de detoxificación son lo más estudiados.

- **Transportadores de metales (Tabla 3):** son proteínas transmembrana con un papel fundamental en el transporte de iones metálicos esenciales para las células vegetales, del mismo modo que su mal funcionamiento (excesiva acumulación) o la entrada de iones no deseados (metales pesados) conducirían a daño y muerte celular, por consiguiente, son necesarios para la homeostasis de iones esenciales y no esenciales, así como para la tolerancia a metales pesados (101; 102). En plantas existen múltiples familias de transportadores comprometidos con la captación, distribución y compartimentalización, a nivel de la membrana plasmática encontramos las ATPasas transportadoras de metales pesados denominados también AMF's, las proteínas similares a los transportadores regulados por hierro, las ZIP o ZRT/IRT, la familia de facilitadores de la difusión de cationes (CDF), la familia de proteínas de macrófagos asociadas a la resistencia natural frente a metales (NRAMPs), etc.; por otro lado, dentro de los transportadores de metales pesados en los tonoplastos localizamos a los complejos de fitoquelatinas con diversos transportadores de metales pesados y los transportadores tipo ABC (103).
- **Amino ácidos y ácidos orgánicos:** los ácidos orgánicos son moléculas originadas principalmente en el ciclo de Krebs y el ciclo del glioxilato (variante del ciclo del ácido cítrico para células vegetales), han recibido especial atención en su capacidad de modular la adaptación de las plantas al medio ambiente, donde la detoxificación de metales pesados se da debido a la capacidad de los ácidos (malato, citrato, oxalato, malonato, tartrato, etc.) en formar complejos de quelación con diversos metales, usando sus grupos carboxilo (donante de oxígeno para los ligandos metálicos), los ácidos orgánicos son secretados por las raíces, lo que permite reducir la cantidad y biodisponibilidad de iones en la rizosfera, evitando su absorción y distribución por la planta (104; 105). Los aminoácidos protegen a las células vegetales mediante la regulación del pH, en la desintoxicación de ROS, actuando como moléculas señal para la defensa

frente a metales pesados y directamente como quelantes (106).

- Fitoquelatinas (PC):** son pequeños péptidos, que se unen a metales, poseen generalmente las siguientes estructuras $(\gamma\text{-glu-cys})_n\text{-gly}$, $(\gamma\text{-glu-cys})_n\text{-}\beta\text{-ala}$, $(\gamma\text{-glu-cys})_n\text{-ser}$, $(\gamma\text{-glu-cys})_n\text{-glu}$, $(\gamma\text{-glu-cys})_n\text{-gln}$ o $(\gamma\text{-glu-cys})_n$; donde el amino terminal es por lo general la glicina y en menor incidencia alanina, glutamina, serina y glutamato, la n representa el número de veces que se repite la cadena (en la mayoría de casos es de 2 a 11 veces). Su síntesis, se da a partir de glutatión, homo glutatión, hidroximetil glutatión o γ - glutamylcisteína, además de una transpeptidasa denominada fitoquelatina sintasa, la cual se activa en presencia de metales pesados (Cd, Ag, Pb, Cu, Hg, Zn, Sn, Au y Ag), es, por tanto, la determinación de fitoquelatinas como indicadores de la presencia de dichos metales o metaloides. Estas moléculas se encuentran en diversos compartimientos sub celulares, son quelantes de metales gracias al grupo tiol de las cisteínas formando $M\text{-PC}_n$ y posteriormente, estos complejos son conducidos al interior de vacuolas haciendo uso de proteínas transportadoras (**Tabla 3**); de igual forma que con los genes codificadores de proteínas transportadoras, la sobre expresión de la fitoquelatina sintasa ayudaría a incrementar los niveles de resistencia a metales pesados (107; 108; 109)
- Metalotioneínas (MT):** se caracterizan por ser proteínas de bajo peso molecular de unión a metales y ser muy ricas en cisteínas (20 – 30%), por lo regular poseen dos dominios predominantes en cisteína confiriéndoles una apariencia de mancuerna; las metalotioneínas de clase I tienen 20 o más residuos de cisteínas bien conservados, las MT clase II incluyen todas aquellas provenientes de plantas, hongos y animales no vertebrados y bajo este sistema de clasificación las fitoquelatinas se incluyen dentro de la clase III (110). MT secretadas por las plantas son vitales para la homeostasis de metales pesados por su captura y consiguiente almacenamiento dentro de vacuolas, protegiendo de esta forma contra la toxicidad a nivel intracelular mediada por HM (91; 103; 111).
- Sideróforos (PS):** estas moléculas son consideradas como los agentes quelantes por naturaleza, los cuales son producidos por especies de plantas gramíneas en especial cuando se presentan deficiencias de hierro. Los sideróforos están conformados por ácido mugineico (MA), ácido 2 desoximugineico (DMA),

ácido 2 epihidroximugineico (epi-AMF) y por el ácido 3 epihidroxi 2 desoximugineico (epi- DAMF); y son secretados por las plantas no solo para atrapar hierro, sino que poseen también la capacidad de quelar metales como Zn, Cu, Mn y Cd, convirtiéndose en moléculas de gran importancia en procesos de tolerancia a metales pesados como para procesos de fitorremediación (91; 111; 112).

2.5 Hongos micorrízicos arbusculares

Diversos microorganismos se encuentran presentes en los suelos alrededor del planeta, incluso en aquellos lugares con condiciones extremas, muchos de ellos desarrollan estrategias para poder tolerar factores ambientales contraproducentes con un óptimo desarrollo. Estos microorganismos generan una relación de simbiosis con las plantas a través de sus raíces intercambiando una serie de moléculas señal, con lo cual contribuyen a la protección, estabilidad, productividad y crecimiento de las plantas, además de favorecer, en muchos casos, los procesos de fitorremediación de distintos contaminantes. Por ejemplo, los mecanismos de resistencia a los metales pesados y sus características en la promoción del crecimiento vegetal, es una de las estrategias eco amigables y costo efectivas prometedoras para la remediación de los ecosistemas, donde los hongos son capaces de establecer conexiones mutualistas con varias plantas terrestres muy aparte de ser un componente fundamental para fomentar ecosistemas sostenibles (113). Los hongos micorrízicos arbusculares (AMF), también denominados de forma más simple como micorrizas, son parte de los microorganismos rizosféricos, y han estado presentes en los ecosistemas durante los últimos 600 millones de años, y es debido quizás a las interacciones con diversas plantas dadas en un inicio que han perdido toda capacidad de prosperar sin ella. Los AMF son capaces de colonizar y establecer relaciones de simbiosis con aproximadamente el 80% de las plantas terrestres, dentro de las cuales se incluyen diversos cultivos agrícolas de gran interés económico; como se mencionó líneas arriba, el proceso de simbiosis se da posterior a interacciones moleculares entre ambas partes desencadenando cambios fisiológicos tanto para la planta como para los hongos, cabe resaltar que la colonización se da exclusivamente en las raíces a través de esporas, hifas o arbúsculos (114).

Tradicionalmente, los AMF se han clasificado en base a las diferencias observadas tanto por su forma de infectar las células hospedadoras (**Figura 5**) como por la

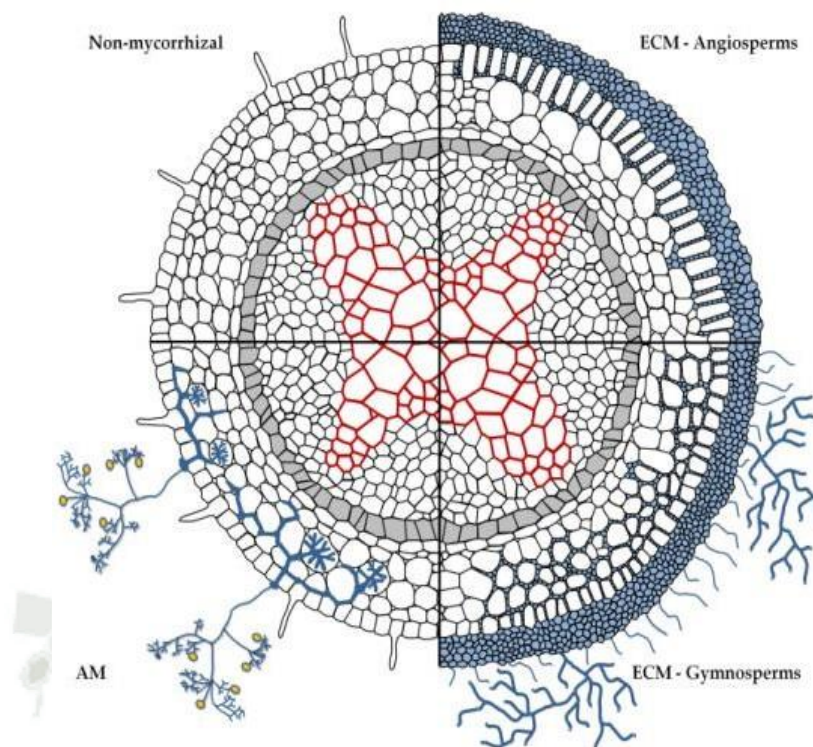
morfología de sus esporas (pared celular, color, tamaño), esporocarpos, suspensores de esporas y subtipos de hifas; pero recientemente y gracias al desarrollo de nuevas herramientas moleculares, reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y sus modificaciones del mismo modo que la secuenciación de la subunidad de ARm ribosomal (18S), nos permiten su identificación con un mayor grado de confiabilidad (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de Hongos micorrízicos arbusculares Según Schüßler & Walker (2010) and Redecker et al. (2013).

Filo		Clase	
Glomeromicota		Glomeromicetes	
Orden	Familia	Género	
Glomerales	Glomeraceae	Glomus	
		Funneliformis (ex grupo Glomus Aa y Glomus mossaea	
		Rhizofagus (ex Glomus grupo Ab y Glomus intraradices)	
		Sclerosystis (basado en el ex grupo Glomus Aa)	
		Septoglomus	
	Claroideoglomeraceae	Clairoideoglomus (ex Glomus del grupo B y Glomus claroideum)	
Diversisporales	Gigasporaceae	Cetraspora	
		Dentiscutata	
		Gigaspora	
		Intraomatospora	
		Paradentiscutata	
		Racocetra	
		Scutellospora	
		Acaulosporaceae	Acaulospora (incluye a la ex Kuklospora)
		Pacisporaceae	Pacispora
		Diversisporaceae	Corymbiglomus
	Diversispora (ex Glomus del grupo C) Otospora		
	Redeckera		
	Tricispora		
	Sacculosporaceae	Sacculospora	
Paraglomerales	Paraglomeraceae	Paraglomus	
Archaeosporales	Geosiphonaceae	Geosiphon	
	Ambisporaceae	Ambispora	
	Archaeosporaceae	Archaeospora (incluye a la ex Intraspora)	

Nota: Tomado de Piliarová M, et al 2019 (114).

Figura 6. Diferencias en la colonización de AMF. En la parte inferior izquierda notamos que los AMF son capaces de penetrar tanto de forma intra e intercelular a diferencia de la Ectomicorizas (derecha).



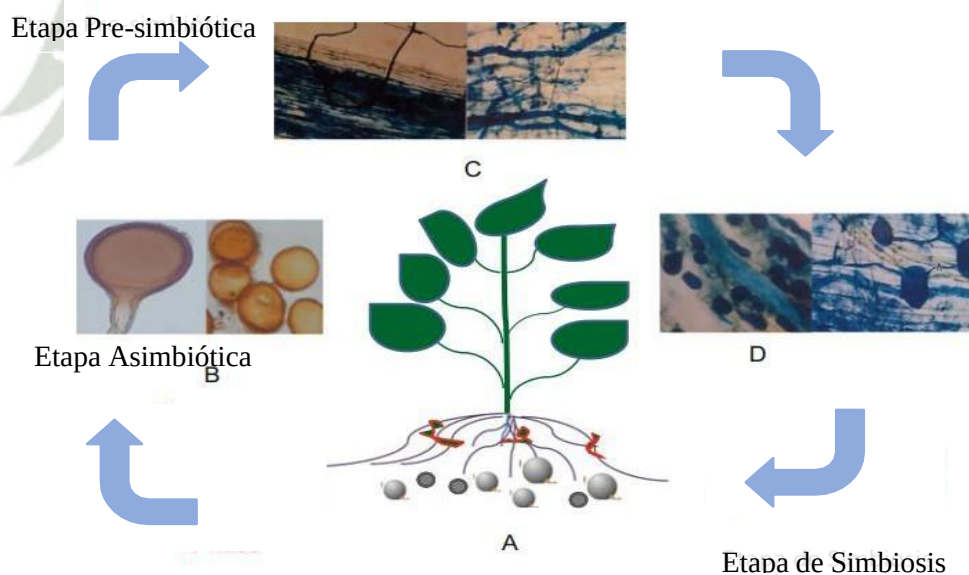
Nota: Tomado de Bucking H, et al 2012 (115).

El crecimiento y desarrollo de hongos micorrizicos arbusculares es un proceso rápido y dinámico, su reproducción es de manera asexual la cual se da en tres etapas, asimbiótica, pre simbiótica y simbiótica (116; 117) claramente establecidas:

- a) La primera etapa o denominada también etapa asimbiótica, donde debido a la no presencia de células corticales hospedadoras, los tubos germinales de longitud entre 20 – 30 milímetros generados después de 15 a 20 días por las diversas esporas de AMF cesan su crecimiento, posteriormente la espora es capaz de producir un nuevo tubo germinal o simplemente permanecer inactiva hasta su germinación. Se puede considerar que, durante este periodo, las esporas muestran los niveles más bajos de actividad metabólica.
- b) En la etapa pre simbiótica, son los metabolitos secretados por las raíces los encargados de la germinación de las esporas, lo que desemboca en el óptimo crecimiento del tubo germinal; estableciendo múltiples puntos de entrada. Cuando los suelos poseen las condiciones óptimas para el desarrollo de las plantas, las esporas pasan a un segundo plano en cuanto a la efectividad de la colonización, siendo así los fragmentos de raíces micorrizadas y los entramados de hifas los de mayor eficiencia.

- c) Una vez las moléculas señal son intercambiadas y se establecen los puntos de entrada, las hifas sufren modificaciones morfológicas para formar el apresorio y establecer así el aparato de penetración hacia las células corticales, estableciendo por lo tanto la etapa de simbiosis propiamente dicha, dentro de estas células se establecen diferentes estructuras especializadas: arbúsculos (los cuales toman lugar en la pared celular y la membrana celular) y vesículas (formados a partir de las hifas) inter e intracelulares; siendo los arbúsculos los encargados del intercambio de nutrientes entre las plantas y los AMF, específicamente entre las membranas celulares de las raíces y la superficie de los arbúsculos.

Figura 7. Representación del ciclo de vida de AMF. En el punto (A) da inicio la germinación de las diferentes esporas presentes, en (B) se desarrollan las hifas intra y extra radicales, en (C) se forma el apresorio para iniciar la colonización y finalmente en (D) se da la reproducción mediante vesículas y arbúsculos.



Nota: Tomado de Srivastava P, et al 2018 (117)

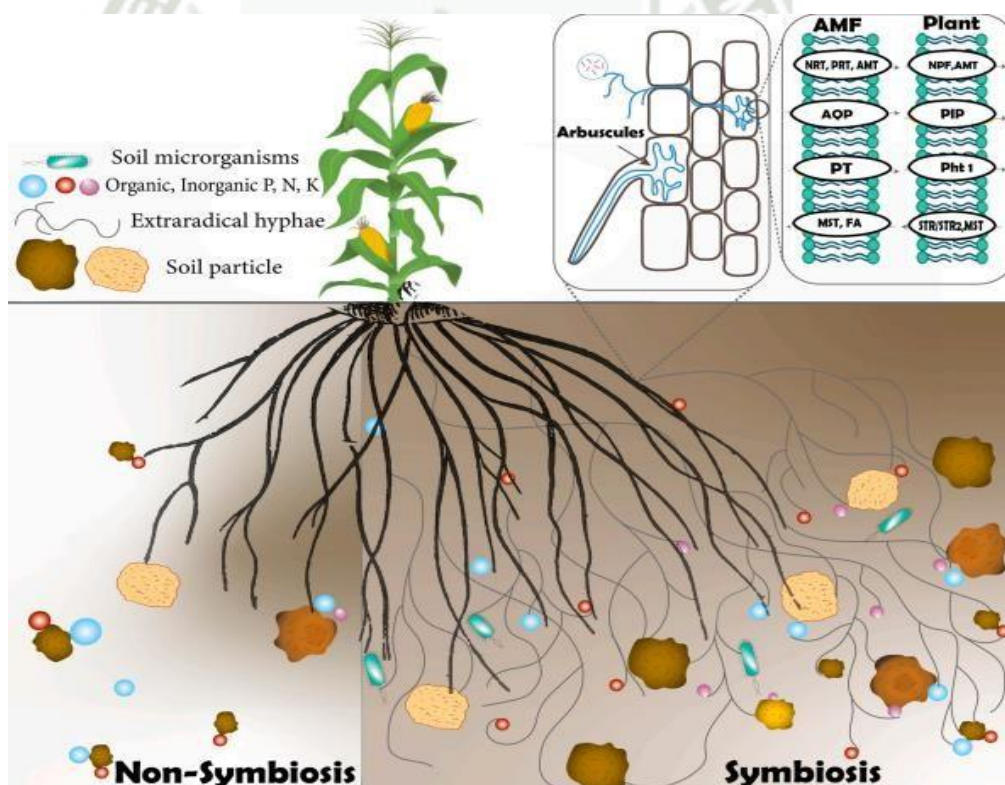
Hongos micorrízicos arbusculares y sus mecanismos de tolerancia/resistencia a metales pesados

Dentro de todos los procesos de fitorremediación, el uso de AMF como potenciadores de la capacidad innata de las plantas en absorber o fijar metales pesados, ha ganado mucha importancia en los últimos años debido a ser una tecnología prometedora, sin efectos adversos para el medio ambiente, de fácil

y rápida aplicación y de bajo costo. Los AMF son fundamentales para el correcto funcionamiento de los ecosistemas por su participación en procesos como: captación de nutrientes, captura de moléculas de carbón, contribuyen al mantenimiento de la estabilidad del suelo mediante la producción de moléculas como “glicoproteínas” (118). Las raíces que han sido colonizadas por los AMF, incrementan el área de contacto con la rizosfera por la gran cantidad de hifas generadas, permitiendo incrementar la toma de agua y la captación de nutrientes, principalmente fósforo, del mismo modo que otros micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, etc.). Para que se den de forma adecuada los procesos de simbiosis entre los AMF y las plantas hospedadoras, es necesario considerar algunos factores tanto bióticos como abióticos: (i) las propiedades físicas y químicas del suelo, permiten la existencia de gran diversidad de esporas; sin embargo, elevadas concentraciones de materia orgánica como de fósforo desencadenan en una menor colonización, el pH del suelo es un criterio fundamental a considerar para la movilidad y disponibilidad de iones metálicos, por lo tanto, suelos con pH fuera del rango 4.5 – 7.5 establecen condiciones negativas para la simbiosis, afectando ante todo las etapas de esporulación y germinación (119), (ii) la baja disponibilidad de agua e incluso periodos relativamente cortos de ausencia total, permiten una mejor colonización por parte de las micorrizas, favoreciendo la captación de nutrientes que bajo dichas condiciones (sequías) son de difícil acceso para plantas no micorrizadas; las hifas producidas durante la infección, actúan como barrera para la no translocación de metales pesados del suelo hacia la planta (inmovilizándolos en las raíces), además de reducir la producción de glicoproteínas por las plantas (120), (iii) cabe mencionar, que el tipo de planta hospedadora influye en la especie y número de esporas que podrán colonizar, esto debido principalmente al área radicular que interactúa con la rizosfera, (iv) al igual que el pH ácido, las etapas iniciales de germinación y formación de las hifas son extremadamente sensibles a metales pesados, los cuales pueden reducir o incluso eliminar parcialmente la colonización (121) y (v) el manejo de los suelos agrícolas puede generar condiciones favorables o desfavorables para el desarrollo y colonización de los AMF, del mismo modo que condiciones climáticas extremas (temperaturas) reducen el número y tipo de AMF (122). Adicionalmente, al ser los hongos micorrizicos arbusculares organismos que

requieren de plantas hospedadoras para poder completar su ciclo de vida, estos compiten con los microorganismos patógenos presentes en el suelo por los nutrientes, además de evitar que estos puedan infestar las raíces de la planta; los AMF poseen mecanismos por los cuales captan mejor los metabolitos fotosintéticos producidos a comparación de los fitopatógenos (evitando su propagación); la colonización de las raíces por AMF trastorna los metabolitos secretados por las mismas con la finalidad de favorecer a los microorganismos benéficos de la rizosfera; una vez lograda la colonización por AMF, prácticamente prohíbe la colonización por otros microorganismos (123).

Figura 8. Papel de los AMF en la absorción de nutrientes. Observamos que una planta micorrizada (lado derecho), a nivel microscópico la formación de vesículas y arbuscúlos permiten un mayor transporte de minerales y a nivel macroscópico un mayor desarrollo del área radicular y la biomasa aérea.



Nota: Tomado de Riaz M et al, 2021 (124).

Siendo establecidos ya los parámetros que alteran el proceso de colonización y por ende, disminuyen las ventajas competitivas frente a plantas no micorrizadas (menor crecimiento y menor tolerancia a factores abióticos), fue primordial para este caso de estudio, enumerar o dilucidar qué mecanismos intrínsecos o cuales son los procesos metabólicos capaces de conferir mejores estrategias por parte de los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) a ser usados en las diferentes técnicas de fitorremediación, combatiendo de esta manera la contaminación por metales pesados.

Mecanismo de tolerancia/resistencia durante la simbiosis AMF-plantas

- a) Inhibir la captación de metales pesados: la generación de hifas en las plantas micorrizadas por parte de los AMF, se convierten en la primera barrera de protección al incrementar el tamaño del área radicular, motivo por el cual, las raíces tendrán mayor superficie de contacto para la toma de nutrientes de zonas no contaminadas por HM; con el objetivo de mejorar el trabajo de los micelios y favorecer la interacción con diversas redes miceliales (anastomosis), las vesículas y las esporas poseen mayor capacidad de almacenamiento de HM. Los AMF de la familia *Glomeraceae*, son los de mayor potencial en tolerar la presencia de metales pesados, por desarrollar redes miceliales más extensas, poseen mayores ratios de esporulación (colonizando en periodos más cortos) y finalmente por poseer un ciclo de vida distinto a otras especies, es decir poseen la capacidad de propagarse no solo mediante esporas sino también por hifas y fragmentos de raíces micorrizadas (118; 125).
- b) Mejoran la captación de agua y nutrientes: cuando se da la simbiosis entre los AMF y las células corticales, ambos sufren alteraciones fisiológicas, por ejemplo, la generación de hifas permite incrementar el área radicular de las plantas, lo cual incrementa la superficie de búsqueda para la toma de agua y nutrientes esenciales, permitiendo aumentar la producción de biomasa en escenarios desfavorables. El fósforo (P), es el nutriente principal favorecido en su absorción por los AMF, seguido por el nitrógeno y diversos micronutrientes; en un primer momento las hifas localizan los nutrientes, los cuales son absorbidos y transportados hasta llegar al apesorio, introduciéndolos a las células de la planta para posteriormente y gracias a proteínas transportadoras llevar todos los minerales al resto la planta, el xilema es el encargado de distribuir el agua captada (126; 127).

- c) Compartimentalización de metales pesados: los AMF poseen la habilidad, en suelos con altas concentraciones de metales pesados, de capturarlos y almacenarlos tanto en vacuolas (orgánulos especializados) como en el citosol de las hifas y esporas principalmente; para captarlos es necesaria la producción de moléculas como ácidos orgánicos, aminoácidos, glutatión, fitoquelatinas (PC) y metalotioneínas (MT), posteriormente para almacenarlos y compartimentalizarlos, se hacen uso de una serie de proteínas transportadoras de metales pesados (NRAMP, ABC, IRT, etc.). Ambos procesos, se dan tanto a nivel de AMF como en las células de la planta, compartiendo así la responsabilidad de almacenar equitativamente los iones metálicos; sin embargo, la inmovilización y reducción del transporte de los metales pesados no siempre se ve favorecido por la colonización, puesto que muchos metales son translocados cómodamente por su similitud a los nutrientes esenciales (128; 129).
- d) Adsorción y quelación de metales pesados: si las concentraciones de metales pesados en el suelo son muy elevadas, su secuestro y posterior almacenamiento no serán suficientes para evitar su fitotoxicidad, así surge una nueva estrategia donde los AMF pueden secretar Glomalina, una glicoproteína capaz de inactivar y reducir la biodisponibilidad de los metales pesados, formando agregados glomalina-HM, inmovilizándolos en los alrededores de la rizosfera. Otras moléculas secretadas por los AMF, que cumplen funciones similares a la glomalina son citratos y oxalatos, diferentes componentes de la pared celular de los AMF (quitina, celulosa, derivados de celulosa y melaninas), en las hifas (quitina, glucanos, polímeros de galactosamina, proteínas y péptidos) son capaces de formar uniones con metales como Cu, Pb, Cd, etc. (20; 130).
- e) Sistemas antioxidantes: los metales pesados, debido a su elevada toxicidad, alteran diferentes rutas metabólicas y procesos enzimáticos al incrementar la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). Las plantas poseen mecanismos intrínsecos por los cuales contrarrestar los efectos negativos de los ROS, por ejemplo enzimas tales como catalasas (CAT), superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión reductasa (GR) y glutatión peroxidasa (GPX); muchas veces la generación de dichas enzimas es superada por las concentraciones de HM presentes en el suelo, haciendo posible que los AMF al colonizar mejoren la producción de enzimas antioxidantes, permitiéndoles

combatir mejor la presencia de HM (128; 131).

- f) Interacción de AMF con otros microorganismos: en la rizosfera encontramos una variedad de microorganismos capaces de infectar las raíces, estos microorganismos pueden o no interactuar con los AMF, las características del suelo, las plantas presentes y sus exudados son fundamentales para dichas interacciones. Por lo tanto, podemos diferenciar dos posibilidades: (i) cuando las células corticales de la raíz han sido colonizadas por AMF, presentando un entorno estable y poco contacto con los demás microorganismos; (ii) cuando los AMF se encuentran presentes en el suelo, en la denominada etapa asimbiótica, durante la cual deben competir por los nutrientes con los demás organismos de la rizosfera (130; 132; 133).

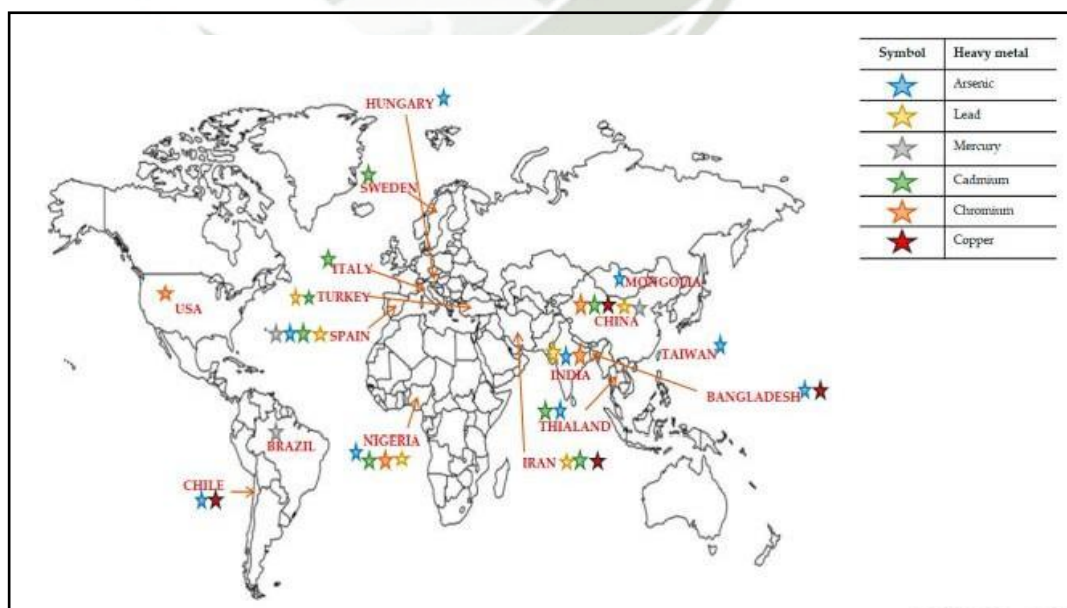
Haciendo uso de los diferentes mecanismos adaptativos desarrollados por los hongos micorrizicos arbusculares (AMF) para poder prosperar frente a la toxicidad ocasionada por los metales pesados, que se encuentra en el medio ambiente en calidad de contaminantes, se logra otorgar a las plantas, ya usadas en procesos de biorremediación o aquellas que recientemente están siendo evaluadas en sus habilidades de captación de metales (esenciales y no esenciales), en su absorción o inmovilización por medio de las raíces, la transferencia y distribución de metales del área radicular a las partes aéreas (hojas, flores, frutos) y en diferentes estrategias de detoxificación, mediante la capacidad (principalmente del género *Glomercota*) de establecer relaciones simbióticas mutualistas entre AMF – plantas, mejorar los niveles de tolerancia, resistencia de las propias plantas frente a los metales pesados, además de proporcionarle mecanismos complementarios de ayuda con el fin de poder obtener mejores resultados cuando los procesos de fitorremediación (fitoextracción, fitodegradación, fitotransformación, fitovolatilización, etc.) sean utilizados en suelos contaminados con un metal pesado determinado o con la presencia de un conjunto de ellos; convirtiéndose de esta manera en una técnica multidisciplinaria para la cual, diversas características del suelo (pH y contenido orgánico principalmente) deben ser igualmente consideradas para su optimización. De este modo, cada vez son más recurrentes los estudios (en invernaderos y en menor proporción en campo) de fitorremediación asistida por hongos micorrizicos arbusculares, dilucidando poco a poco aquellas

simbiosis óptimas en reducir, remediar o eliminar ciertos metales pesados presentes en determinadas áreas.

2.6 Fitorremediación asistida por Hongos micorrizicos arbusculares

Estando bien establecido que los suelos son uno de los recursos naturales de mayor importancia para la humanidad, principalmente para la implementación de sistemas de agricultura y ganadería, de la misma forma que, las diversas actividades antropogénicas generan grandes cantidades de residuos (conteniendo metales pesados y metaloides), los cuales pueden depositarse en los ecosistemas alterando el correcto desarrollo y funcionamiento de los micro y macroorganismo dependientes del mismo. Por ejemplo en Europa central y oriental existen más de 1,7 millones de sitios contaminados por metales pesados, en Estados Unidos, alrededor de 600 mil tierras sin poder usarlas debido a estar contaminadas, China posee 1/6 de sus tierras cultivables contaminadas por HM (134), varios países en vías de desarrollo así como los ya mencionados están canalizando sus esfuerzos en investigación con el claro objetivo de obtener una solución para esta gran problemática, no obstante el tipo y la concentración de metales pesados varía entre las áreas contaminadas.

Figura 9. Mapa de los países donde se observa un impacto significativo por la presencia de mételas pesados.

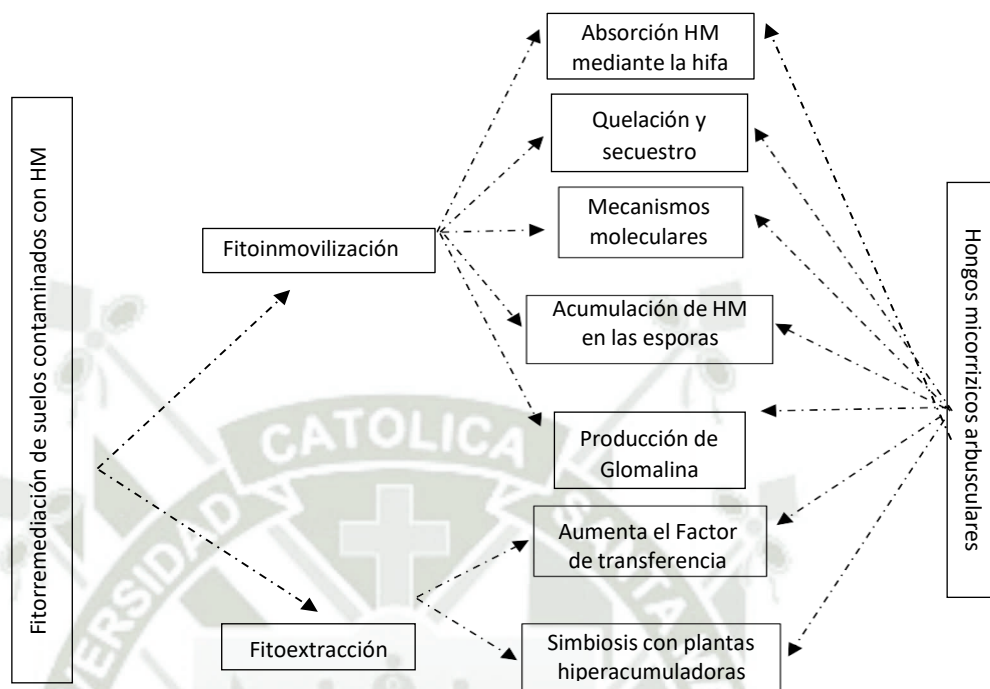


Nota: Tomado de Dhalaria R, et al, 2020 (135).

Dejando de lado los procesos naturales de contaminación de metales pesados (figura 1), la rápida industrialización y urbanización vista en los últimos 50 años, así como la agricultura intensiva (uso en grandes cantidades de agroquímicos) contribuyen de manera significativa en la contaminación de los ecosistemas con metales pesados (Pb, Hg, Cd, Cr, As, Se, Sb). Es debido a los diversos contaminantes, en nuestro estudio: los metales pesados, que diversos microorganismos, por ejemplo, los hongos micorrízicos arbusculares, que han evolucionado para poseer mecanismos o estrategias que les confieran la capacidad de crecer bajo la presencia de los compuestos dañinos para el medio ambiente y que incluso son capaces de formar relaciones de simbiosis con plantas vasculares promoviendo su mejor crecimiento y desarrollo e incrementando su tolerancia/resistencia a los metales pesados, permitiéndoles lograr mejores rendimientos en procesos de fitorremediación (estrategia de descontaminación mediado por plantas). En resumen, los AMF pueden asociarse con la mayor parte de plantas terrestres colonizando sus raíces y formando posteriormente filamentos denominados micelios, que actuaran como intermediarios entre el suelo y la planta, otorgándoles mejor capacidad de captar nutrientes para su desarrollo (especialmente en condiciones adversas), producir diversos metabolitos (sideróforos, ácidos orgánicos, etc.) con beneficios para la planta hospedadora, otra ventaja proporcionada por los AMF, es su habilidad de mejorar las características del suelo, generando agregados donde los nutrientes fundamentales para la planta se encontraran en mayores concentraciones, de igual forma que mejorarán las condiciones fisicoquímicas (pH, textura, potencial redox, contenido total de materia orgánica), tornándolas beneficiosas para un óptimo crecimiento de las plantas y reduciendo la microbiota patógena presente.

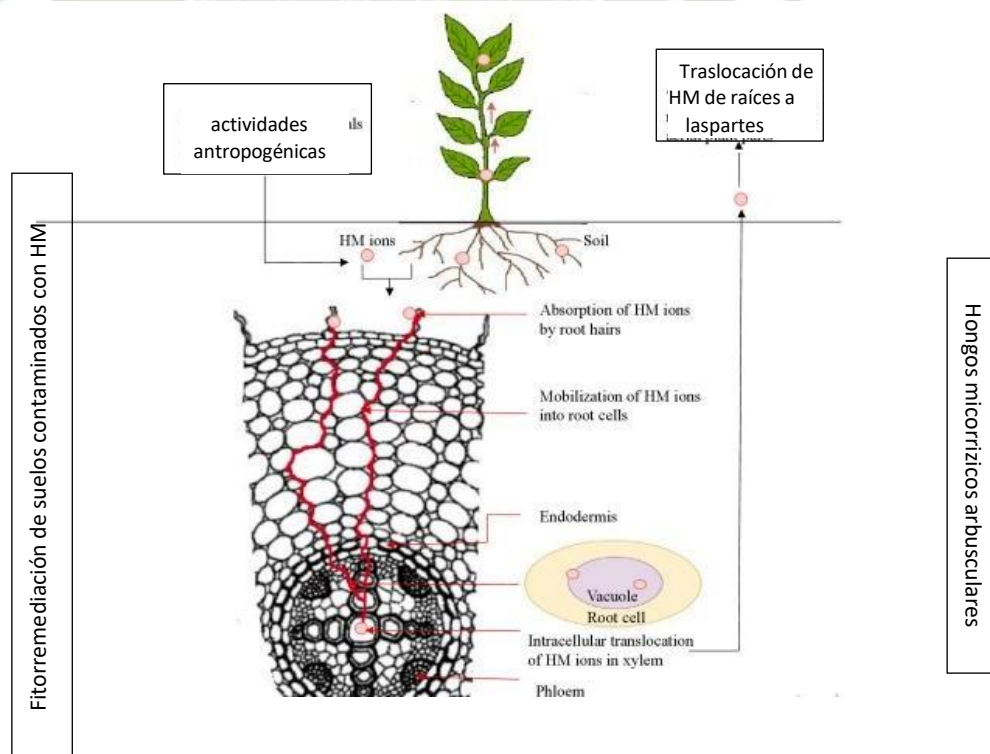
Para los fines de este estudio, nos basamos en los dos principales tipos de fitorremediación para metales pesados, al ser los más simples (operacionalmente hablando), viables económicamente y por no alterar la estética de los ecosistemas a remediar: fitoestabilización o fitoinmovilización y fitoextracción, ambas complementadas con la colonización por AMF.

Figura 10. Esquematización de las principales técnicas de fitorremediación con la interacción con los hongos micorrizicos arbusculares (AMF).



Nota: Tomado de Meier S, et al, 2012 (136).

Figura 11. Representación gráfica de las interacciones entre la planta y los AMF.

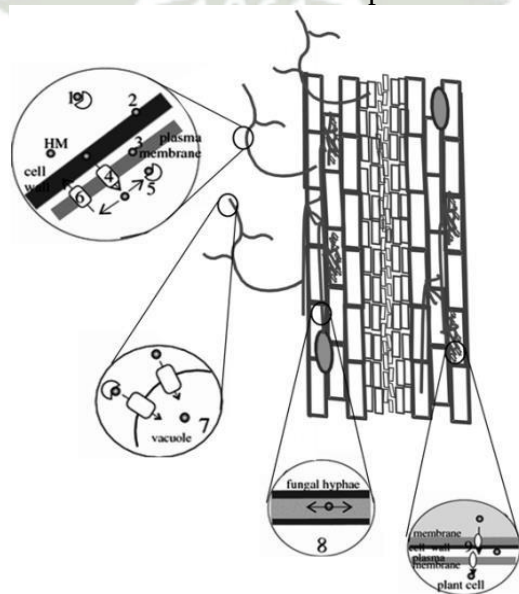


Nota: Tomado de Meier S, et al, 2012 (136).

2.7 Fitoestabilización o Fitoimmobilización

Es una técnica de aplicación “in situ” que necesariamente hace uso de la capacidad de algunas plantas en tolerar ciertas concentraciones de HM, de igual forma que el uso de sustancias, denominadas enmiendas, son empleadas para mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo, lo cual incrementará la fijación de los HM en la rizosfera reduciendo la transferencia de HM al aire, a cuerpos de agua (superficiales y subterráneos) y reduce los efectos tóxicos al suelo. Los AMF son capaces de potenciar la inmovilización de los HM presentes en el suelo y por ende mejoran la fitoestabilización, esta inmovilización se da mediante la producción de metabolitos que precipitan los HM, formando agregados en el suelo que luego pueden ser adsorbidos o quelados por las paredes celulares de los AMF; otras especies de micorrizas pueden reducir la biodisponibilidad de los metales a través de procesos de precipitación, alcalinización o formando complejos HM-glomalina, los metales se pueden unir a las paredes celulares de los hongos (principalmente con las moléculas de quitina), reduciendo de igual forma su biodisponibilidad. En las plantas, encontramos organelos llamados vacuolas, que se encargan de almacenar contaminantes, de modo que se convierte en una ruta alterna en procesos de detoxificación; y de forma semejante en los AMF tenemos las vesículas para incrementar la tolerancia a metales pesados.

Figura 12. Mecanismos de los AMF para la fitoestabilización.

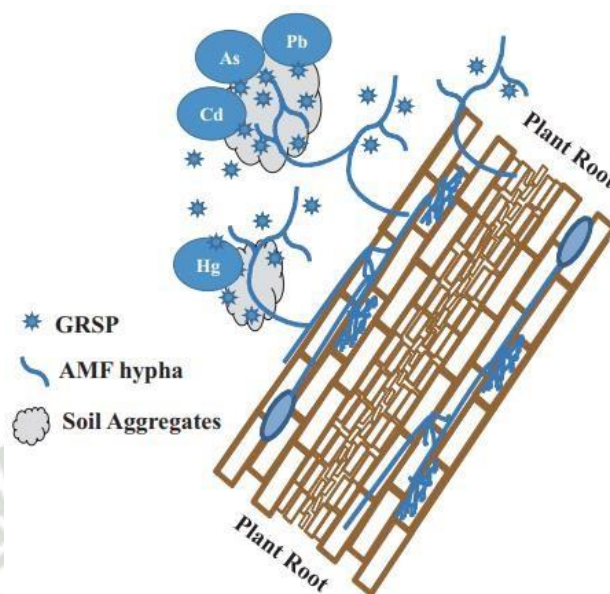


Nota: Tomado de Krishnamoorthy R, et al, 2019 (93).

2.8 Fitoextracción

A esta técnica se la considera como la más atractiva y efectiva en cuanto a la fitorremediación de suelos con presencia de metales pesados, este proceso se basa en la capacidad innata de la gran mayoría de plantas en captar y absorber los metales pesados para posteriormente concentrarlos en sus partes aéreas. La fitoextracción depende en primer lugar del tipo de planta a usar, de preferencia que posean: elevada producción de biomasa, extensa área radicular y buenos coeficientes tanto para los factores de transferencia como de bioacumulación, siendo las mejores opciones toda aquella planta considerada como hiperacumuladora, en segundo lugar, se debe evaluar las condiciones del suelo a remediar, así como el tipo y forma (biodisponibilidad) del metal pesado presente (137). Como se mencionó anteriormente, los rendimientos obtenidos por los procesos de fitorremediación aún son bajos, por lo tanto, cuando se emplea la fitoextracción, esta debe ser realizada durante varios ciclos (dependiendo del tipo de HM), incluyendo las etapas de cosecha y manejo de los residuos, pudiendo mencionar que existen dos maneras de realizar la fitoextracción: 1) De forma natural o continua, donde se busca utilizar planta autóctonas, además de evitar modificar las condiciones del suelo y 2) Fitoextracción inducida, donde lo que se busca gracias a la adición de agentes quelantes es incrementar la biodisponibilidad de los HM en el suelo, sobre todo en aquellos (Pb y Cr) que por su naturaleza son insolubles o se unen y precipitan con diversas moléculas del suelo (138). Hay que mencionar que en los procesos de fitoextracción existen algunas limitaciones, tales como: se requieren periodos largos de tiempo, el limitado número de metales que pueden ser extraídos, la poca profundidad alcanzada por las raíces, gran dificultad por las plantas para generar biomasa, el riesgo potencial de que las plantas se introduzcan en la cadena alimentaria (139).

Figura 13. Proceso de fitoextracción mediante Glomalina secretada por AMF.



Tomado de Krishnamoorthy R, et al, 2019 (93).

En la fitoextracción inducida, muy aparte de poder producirse un proceso de lixiviación por la adición de compuestos quelantes, muchos de los agentes usados no son biodegradables, convirtiéndose así en compuestos contaminantes tras un mal manejo; por consiguiente, la fitoextracción de forma continua es la mejor opción y más aún, si a esta la complementamos con el uso de hongos micorrízicos arbusculares. Los AMF poseen un papel crucial al momento de modificar la biodisponibilidad de los metales pesados, esto es debido en gran parte a procesos en los cuales se rectifican los valores de pH, la textura y el potencial redox de la rizosfera; moléculas de poco peso molecular (sideróforos, metalotioneínas, ácidos orgánicos, etc.) son fundamentales a la hora de incrementar los rendimientos en los procesos de fitoextracción (118). El uso de plantas nativas para los procesos de fitoextracción sería de gran utilidad, debido a su adaptabilidad a las condiciones medioambientales de la región, habiendo un continuo interés en la búsqueda de plantas nativas que sean resistentes a metales pesados (139).

A continuación, se describe con más detalle los mecanismos brindados por los AMF a las plantas para incrementar la tolerancia a metales pesados y potenciar la fitoestabilización (140).

- Retención de HM en las raíces micorrizadas y las hifas externas: una de

las principales ventajas de la colonización por AMF es que estos hongos poseen mecanismo por los cuales retienen y concentran grandes cantidades de metales sobre todo en los micelios y al interior de las vesículas (su cantidad aumenta a mayores concentraciones de HM), para lograr estos efectos son secretados agentes quelantes (metalotioneínas, fitoquelatinas, ácidos orgánicos, glomalina, etc.) de metales. La red micelar al ocupar mayor área que el propio sistema radicular de la planta, le permite capturar con mayor eficiencia los HM, aminorando la cantidad de metales que son traslocados para la parte superior resguardándolos de los efectos tóxicos, siendo fundamental la correlación: mayor biomasa micelar más mayor porcentaje de colonización, resultará en mayor tolerancia a los metales pesados.

- La glomalina es una glicoproteína producida por las hifas de los AMF, siendo considerada un potente agente en la formación de agregados en el suelo; esta proteína secretada exclusivamente en cantidades significativas por hongos del género *Glomeromicota*, es un compuesto estable, insoluble en agua y resistente a la degradación por calor. Recientemente, se busca la identificación del gen encargado de la producción de glomalina, con la finalidad de poder usarlo en la identificación de las diferentes especies de AMF (141; 142).
- AMF promueven una mejor captación de nutrientes: las micorrizas modifican las características y propiedades del suelo, permitiendo que las plantas se desarrollen incluso en terrenos desfavorables, esto debido a que durante la colonización una gran cantidad de nutrientes son captados por los micelios de los hongos y de manera directa intercambiados en la interfase planta-hongo. La interacción AMF-planta afecta en la actividad, concentración y cantidad de enzimas presentes en el suelo, las cuales mejoran la toma de nutrientes. De igual modo que la presencia de proteínas transportadoras, permite mejorar la absorción de micronutrientes (N, K y P) mediante los micelios extraradiales.
- Los AMF almacenan HM en vacuolas y vesículas: permiten limitar los efectos perjudiciales de los HM al encapsularlos, este mecanismo se da por las bombas de H^+ y por los protones de ATPasa y protones de piro

fosfatasa ubicados en las vacuolas. Es gracias a la mejor captación de nutrientes, en especial es fosforo (P), el cual se usa para producir mayor cantidad de ATP y así obtener mayores niveles de energía metabólica y ayudar en los procesos de toma y almacenamiento de HM, previniendo que estos últimos sean trasladados a otras partes. Si el almacenamiento se da en vacuolas, nos referimos a fitoextracción caso contrario si la concentración se lleva a cabo en vesículas, hablamos de fitoinmovilización.

- Unión de HM en la pared celular de los AMF: se conoce que la pared celular de las micorrizas consiste mayoritariamente de quitina y diversos polisacáridos, los cuales contienen grupos funcionales que proveen sitios de unión, convirtiéndose en una especie de barrera frente a iones de metales pesados; durante la colonización y en presencia de elevadas concentraciones de metales pesados, los AMF estimulan una mayor síntesis de la pared celular en las células corticales de la raíz así como un incremento en su espesor, inhibiendo el paso de los HM al citoplasma y su traslado a las partes aéreas.
- Los AMF favorecen la fotosíntesis y el intercambio gaseoso: los metales pesados que son trasladados a diferentes partes de planta, afectan negativamente el metabolismo de la fotosíntesis ante todo al fotosistema II, por otro lado, tenemos que en las plantas micorrizadas se incrementan las concentraciones de clorofila a, molécula responsable de la fotosíntesis, proceso que se puede explicar por un incremento en la síntesis de novo de proteínas, que favorece la absorción de minerales esenciales (Mg y Fe) que son indispensables para la estructura activa de la clorofila; como consecuencia secundaria de mejorar los procesos fotosintéticos, se ve incrementado el intercambio gaseoso a través de los estomas.
- Metales pesados incrementan la respuesta antioxidante: las planta como mecanismo de defensa ante factores adversos, incluidos los metales pesados, generan diversas enzimas: GPX, CAT, SOD, GR, POD y APX que protegen a las células vegetales, diversos estudios encontraron que

los AMF con capaces de potenciar la producción de dichas enzimas bajo la presencia de HM como factor de estrés.

- Los AMF potencian la quelación de HM: diversas moléculas con gran afinidad a metales son sintetizadas siempre y cuando las concentraciones de HM rebasan la tolerancia máxima de las células, este proceso permite disminuir su solubilidad y reactividad volviéndolos menos biodisponibles una vez son llevados hacia el interior de las células (mediante proteínas transportadoras) y depositados en el citosol. Moléculas como metalotioneínas, fitoquelatinas (péptidos con grupos tiol), ácidos orgánicos y aminoácidos son cruciales para la tolerancia/resistencia a metales pesados; para la síntesis de fitoquelatinas, se usa glutatión como sustrato en la presencia de la enzima fitoquelatina sintasa, la cual es exclusivamente activada en presencia de micorrizas, finalmente los complejos son almacenados al interior de vacuolas celulares.

2.9 Actualidad de la fitorremediación a nivel nacional

Se sabe que, en Perú, la minería es uno de los pilares fundamentales de nuestra economía; tanto así que para el año 2018 representó el 10% del producto bruto interno y aproximadamente el 61% de todas las exportaciones, además de ser el segundo productor de cobre, plata y zinc y el primer productor de oro, plomo y estaño en Latinoamérica, según datos del Ministerio de Economía y Minas. El manejo inadecuado de los residuos generados por la minería y la falta de regulaciones rígidas y claras por parte del estado, generan la acumulación de Pasivos Ambientales Mineros (MEL), los cuales, poseen un riesgo potencial para el medioambiente y el ser humano; a nivel nacional hay como mínimo 8848 áreas bajo esta denominación, encontrándose principalmente en departamentos como Ancash, Apurímac, Arequipa, Cajamarca, Huancavelica, Junín, Cerro de Pasco y Puno (143). Al existir gran cantidad de Pasivos Ambientales Mineros, dicha contaminación puede expandirse debido al viento o a la erosión por agua perjudicando zonas aledañas, es necesario el estudio de plantas nativas presentes en dichos suelos contaminados con metales pesados como posibles candidatas para procesos de fitorremediación (fitoextracción y fitoinmovilización), tomando como parámetros los factores de bioacumulación y translocación, muy aparte de su notoria capacidad para sobrevivir en presencia de

elementos tóxicos. Es así que según Piliarová M et al, 2019 evaluaron el TF y BAF de dos especies vegetales autóctonas de la provincia de Hualgayoc – Cajamarca, *Bidens triplivernia* y *Senecio sp.*, presentes en áreas contaminadas con plomo y zinc en cantidades que exceden los límites de toxicidad, teniendo concentraciones en suelo de $13,105 \pm 3127$ mg/Kg y $28,393 \pm 3458$ mg/Kg respectivamente; obteniendo como resultado que *Bidens triplivernia* es capaz de almacenar más de 5000 mg/Kg y 9000 mg/Kg de Pb y Zn respectivamente, en tanto que *Senecio sp.* acumula prácticamente las mismas concentraciones de Pb y Zn (~4000 mg/Kg); observándose complementariamente que para *Senecio sp.* la mayores concentraciones de ambos HM se encuentran en las partes aéreas y para *B. triplivernia*, tanto en raíces como en las partes superiores supera las concentraciones almacenadas por *Senecio sp.* a pesar de su gran absorción, no pueden ser consideradas plantas hiperacumuladoras (144). Posteriormente en 2015 otro estudio realizado en la misma localidad de Cajamarca, donde las concentraciones de HM en suelo fueron para arsénico entre 279,5 y 1029,5 mg/Kg, cobre entre 256 y 2070 mg/Kg, plomo entre 3992 y 16060 mg/Kg y para zinc entre 11550 y 28058 mg/Kg, se analizó los factores de translocación y de bioacumulación para seis plantas presentes en la zona de estudio, *Achyroclinealata*, *Ageratina sp.*, *Cortaderia hapalotricha*, *Trifolium repens*, *Epilbium denticulatum* y *Taraxacum officinale*; todas estas plantas arrojaron tener un factor de translocación mayor a 1, pudiendo considerarlas como especies hiperacumuladoras de estos HM, especialmente para la fitoinmovilización de plomo (145). En el departamento de Ancash se encuentran la gran mayoría de MEL de todo Perú, motivo por el cual en (146) se buscó evaluar el BAF y TF de nueve plantas nativas de la zona cultivadas en vivero en suelos con presencia de cadmio, cobre, níquel, plomo y zinc, con el fin de identificar aquellas con mayor eficacia para procesos de fitorremediación; los resultados sugieren que *Achyroclinealata alata*, *Calamagrostis recta*, *Cortaderia jubata*, *Festuca glyceriantha*, *Juncus bufonius*, *Medicago lupulina*, *Pennisetum clandestinum*, *Stipa ichu* y *Werneria nubigena* son posibles candidatas para fitorremediar zonas contaminadas con HM, sin embargo, solo *Werneria nubigena* y *Juncus bufonius* son capaces de acumular grandes cantidades de Cd, Cu, Ni y Zn en zonas aéreas y área radicular respectivamente, por lo tanto *W. nubigena* sería usada para procesos de fitoextracción y para fitoinmovilización, *J. bufonius*, ambas especies con coeficientes BAF y BCF mayores a uno respectivamente. Según Martínez-Manchego L, et al, 2021 (147) se buscó determinar la presencia de plantas

nativas presentes en la zona de relaves mineros de la empresa El madrigal en la provincia de Caylloma – Arequipa, encontrando que: *Cortaderia jubata*, *Baccharis sp.*, *Stipa ichu* y *Juncus sp.* fueron las especies con más abundancia en suelos contaminados principalmente con arsénico, bario, mercurio, cadmio y plomo; considerándolas para su uso en fitorremediación, sin embargo, no se llevaron a cabo estudios para determinar sus BAF, BCF y TF. Según Wang J, et al (2018), se considera a *Mirabilis jalapa* Linn. como herramienta para la fitoestabilización de plomo, para lo cual evaluaron los efectos causados por dicho metal pesado a diferentes concentraciones (0 – 1000 $\mu\text{mol/L}$), notando ligeros decesos en la generación de biomasa respecto a los controles, a pesar de la presencia de plomo, esta planta fue capaz de crecer incluso en altas concentraciones de Pb, con un factor de translocación de 0,04, consecuentemente los mayores niveles de plomo fueron encontrados en las raíces (148). Como se mencionó al inicio de este trabajo, la contaminación por metales pesados proviene de diferentes fuentes, por lo tanto, según Obeso-Obando A, (2020) se evaluó el uso de *Pelargonium zonale* para la fitorremediación de suelos contaminados principalmente con arsénico, cadmio y cobre provenientes del botadero municipal El Milagro en el departamento de Trujillo, trascurrido 6 semana de cultivo en invernadero se observa que las concentraciones disminuyen considerablemente, logrando reducir en 74% la presencia de As, 79% Cd y 55% Cu, se evidencia también la afinidad de *Pelargonium zonale* por el arsénico (metal no esencial) al no disminuir significativamente su tasa de crecimiento (149).

Tabla 5. Plantas nativas de Perú y los metales que absorben

PLANTA	METAL	PLANTA	METAL
<i>Bidens triplivernia</i>	Zn - Pb	<i>Taraxacum officinale</i>	As – Cu – Pb - Zn
<i>Senecio sp.</i>	Zn - Pb	<i>Achyroclinealata alata</i>	Cd – Ni – Pb – Cu - Zn
<i>Achyroclinealata</i>	As – Cu – Pb – Zn	<i>Calamagrostis recta</i>	Cd – Ni – Pb – Cu - Zn
<i>Ageratina sp.</i>	As – Cu – Pb – Zn	<i>Cortaderia jubata</i>	Cd – Ni – Pb – Cu - Zn
<i>Cortaderia haplotricha</i>	As – Cu – Pb – Zn	<i>Festuca glyceriantha</i>	Cd – Ni – Pb – Cu - Zn
<i>Trifolium repens</i>	As – Cu – Pb – Zn	<i>Juncus bufonius</i>	Cd – Ni – Pb – Cu - Zn
<i>Epilbium denticulatum</i>	As – Cu – Pb – Zn	<i>Medicago lupulina</i>	Cd – Ni – Pb – Cu - Zn
<i>Pennisetum clandestinum</i>	Cd – Ni – Pb – Cu - Zn	<i>Stipa ichu</i>	Cd – Ni – Pb – Cu - Zn
<i>Werneria nubigena</i>	Cd – Ni – Pb – Cu - Zn	<i>Cortaderia jubata</i>	As – Ba – Hg – Cd - Pb
<i>Baccharis sp</i>	As – Ba – Hg – Cd - Pb	<i>Juncus sp</i>	As – Ba – Hg – Cd - Pb
<i>Mirabilis jalapa</i>	Pb	<i>Pelargonium zonale</i>	As – Cd - Cu

PLANTA	METAL	PLANTA	METAL
--------	-------	--------	-------

Linn.

Nota. Tabla de elaboración propia

Es notorio la falta de investigación en el área de fitorremediación de metales pesados a nivel nacional, sin embargo, si accedemos al repositorio del Consejo Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), ALICIA; utilizando el motor de búsqueda “fitorremediación” + “metales pesados” encontramos que desde el año 2018 se incrementan las investigaciones, donde el año 2020 fue el de mayor producción científica sobre este tema con 6 artículos; pese al aumento, se hace necesario mayores estudios con la finalidad de encontrar especies de plantas nativas con potencial uso en fitorremediación. Por el contrario, las investigaciones sobre el uso de hongos micorrizicos arbusculares como microorganismos capaces de mejorar los rendimientos de fitorremediación de plantas con tolerancia a metales pesados, es nula a nivel nacional; no obstante, encontramos diversas publicaciones sobre hongos micorrizicos arbusculares cumpliendo otras funciones en la rizosfera (150–152), por otra parte, encontramos publicaciones sobre el descubrimiento de nuevas especies de AMF dentro del territorio nacional, principalmente realizadas por la Universidad Nacional de San Martín .

Tabla 6. Estudios de Fitorremediación Asistida por Hongos micorrícicos arbusculares

AMF	PLANTA HOSPEDADORA	LUGAR DE ESTUDIO	CASO DE ESTUDIO	BENEFICIOS	REFERENCIA
<i>Glomus moseae</i> -2 (GMH), <i>Glomus mosea</i> (GMA), <i>Glomus intradices</i> PH5, <i>Glomus claroideum</i> Chomutov (CT), <i>Glomus moseae</i> BEG95, <i>G. intradices</i> SAR/G, <i>G. microageregatum</i> BEG, <i>G. Claroideum</i> BEG 210 (HH), <i>Mycorrhiza for vegetable</i> (VT) (<i>Claroideoglomus</i> sp., <i>Funneliformis</i> sp., <i>Diversispora</i> sp., <i>Glomus</i> sp. and <i>Rhizophagus</i> sp.)	Plantas de sandía (<i>Citrullus lanatus</i> L. cv. Qilin)	Invernadero, Beijin - China	Mejorar la resistencia frente a <i>Rhizoctonia solani</i> (hongo patógeno)	Mayor producción de biomasa, mejor índice fotosintético, mayor producción de fitohormonas.	(153)
<i>Ambisporaceae</i> , <i>Archaeosporaceae</i> , <i>Gigasporaceae</i> , <i>Glomeraceae</i> y <i>Paraglomeraceae</i>	Plantas nativas: <i>Bidens pilosa</i> L., <i>Tagetes minuta</i> L. and <i>Sorghum halepense</i> (L.) Pers	Campo (antigua fábrica de reciclaje de baterías)	Capacidad de las esporas de AMF para acumular plomo	<i>S. biornata</i> acumula más plomo que <i>G. decipiens</i> , cuando están colonizando <i>S. halepense</i> ; mientras que sucede lo inverso en la rizosfera de <i>B. pilosa</i> .	(154)
Diversas micorrizas del género <i>Glomus</i> , <i>Funneliformis mosseae</i> , <i>Acaulospora laevis</i> y <i>Claridioglomus etinucatum</i>	Diversos cultivos agrícolas: <i>Medicago sativa</i> , <i>Lactuca sativa</i> , <i>Pelargonium graveolens</i> , <i>Stevia rebaudiana</i> , <i>Cucumis sativus</i> , <i>Capsicum annuum</i> , <i>Solanum lycopersicum</i>	Invernaderos	Interacción entre AMF y diversas especies de <i>Bacillus</i> para mejorar las condiciones del suelo en cultivos agrícolas.	Mejorar el crecimiento de las plantas, proteger las plantas frente a patógenos, aliviar el estrés causado por factores abióticos; de forma más eficiente con AMF + <i>Bacillus</i> spp.	(155)
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Mung bean</i>	Invernadero	Evaluar la acción sinérgica entre <i>Funneliformis mosseae</i> y una bacteria gran negativa del suelo <i>Bradyrhizobium</i> para mejorar los mecanismos de respuesta frente a un nematodo	Mejora la eficiencia para la fijación de nitrógeno, incrementa la biomasa y el rendimiento de las semillas	(156)

AMF	PLANTA HOSPEDADORA	LUGAR DE ESTUDIO	CASO DE ESTUDIO	BENEFICIOS	REFERENCIA
			patógeno: <i>Pratylenchus thornei</i>		
<i>Rhizophagus intraradices</i>	Soybean (<i>Glycine max</i> L.)		Estudiar los efectos del AMF en el crecimiento de la planta y la captación de fósforo, en suelos contaminados con plomo, cobre y zinc.	Mejora el crecimiento de la planta, incrementa la captación de P e incrementa el rendimiento de las semillas en suelos contaminados, además de fitoinmovilizar metales.	(157)
<i>Glomus mosseae</i> , <i>G. clarum</i> , <i>G. claroideum</i> , <i>G. etunicatum</i> , and <i>G. intraradices</i>	<i>Phragmites australis</i>	Invernadero	Evaluar si los peligros ecológicos ocasionados por metales pesados se pueden evitar haciendo uso de AMF.	Elevado grado de colonización, incremento en la longitud de las raíces y mayor tolerancia HM tales como P, Cd, Cu, Pb	(158)
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Zea mays</i>	Invernadero	Estudiar la respuesta de plantas de maíz micorrizadas frente a HM (Pb, Zn, Cd)	Promueven el crecimiento, aumentan la actividad fotosintética y desencadenan los sistemas antioxidantes.	(159)
<i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Funneliformis mosseae</i> , <i>Acaulospora</i> sp.	<i>Robinia pseudoacacia</i>	Campo	Evaluar la colonización por AMF en suelos contaminados con HM.		(160)
AMF endógenas	<i>Populus purdomii</i> Rehd, <i>Robinia pseudoacacia</i> Linn. and <i>Populus simonii</i> Carr	Campo	Evaluar la colonización por AMF y la acumulación de HM (Pb, Zn, Cu, Cd) en los tejidos de la planta.	Se obtuvieron buenos factores de transferencia y bioacumulación.	(161)
<i>Rhizophagus fasciculatus</i> , <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Funneliformis mosseae</i> and <i>Glomus aggregatum</i>	<i>Zea mays</i> L	Invernadero	Evaluar las diferentes interacciones entre AMF y <i>Zea mays</i> , para mejorar su crecimiento y fitorremediación de Cd, Cr, Ni, Pb	<i>F. mosseae</i> presentó los mejores rendimientos para el crecimiento de raíces y brotes, así como un buen BCF.	(162)
<i>G. mosseae</i> , <i>G. intraradices</i>	<i>Populus alba</i> L	Invernadero (163)	Evaluar como el porcentaje de colonización mejora el crecimiento en suelos contaminados como HM, así como su regulación en la captación y traslocación.	La presencia de AMF permite recuperar la biomasa de <i>Populus alba</i> L en suelos contaminados con Cu y Zn.	(163)
<i>Glomus macrocarpum</i> , <i>Paraglomus occultum</i> , and	<i>Acacia mangium</i> , <i>Sorghum bicolor</i> y	Invernadero	Evaluar el efecto de AMF en el crecimiento de diferentes	Se observó mejoras en las concentraciones de clorofila,	(164)

AMF	PLANTA HOSPEDADORA	LUGAR DE ESTUDIO	CASO DE ESTUDIO	BENEFICIOS	REFERENCIA
<i>Glomus sp.</i>	<i>Urochloa brizantha</i>		plantas en suelos contaminados con Zn, Pb, Cu y Cd.	incremento la longitud de las raíces y el peso de la biomasa.	
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Eichhornia crassipes</i>	Invernadero	Evaluar el efecto de las AMF sobre el potencial de fitorremediación sobre diferentes concentraciones de cadmio.	Gracias a la interacción con AMF, se incrementa la capacidad fitorremediadora de cadmio, convirtiéndose en una planta hiperacumuladora.	(165)
<i>Glomus versiforme</i>	<i>Oriza sativa</i> y <i>Sphagneticola calendulacea</i>	Invernadero	Evaluar los efectos de intercalar cultivos ambos cultivos más la inoculación con AMF	Mejora el crecimiento y rendimiento de los cultivos, mejora la absorción de P y los procesos de fotosíntesis. Aumenta la captación de cadmio (fitorremediación).	(166)
AMF	<i>Solanum melongena</i> L.	Invernadero	Evaluar la aplicabilidad de AMF en cultivos agrícolas para evitar la absorción de HM o para su fitorremediación.	Mejora el crecimiento, la producción de biomasa y la respuesta antioxidante en condición de estrés por metales (Pb, Cd y As)	(167)
<i>Claroideoglomus etunicatum</i>	<i>Zea mays</i>	Invernadero	Evaluar el crecimiento y la captación de nutrientes bajo condiciones de estrés por lantano.	AMF incrementa el crecimiento de raíces y brotes, mejora la captación de nutrientes (K, P, Mg) y promueve el crecimiento de bacterias benéficas en la rizosfera.	(168)
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Sphagneticola calendulacea</i>	Invernadero	Investigar los efectos de AMF en el crecimiento y acumulación de cadmio.	AMF incrementa el poder de bioacumulación de Cd, se observó procesos de fitotransformación.	(169)

CAPITULO III

1. PERSPECTIVAS A FUTURO

Uno de los principales objetivos muy aparte de combatir la contaminación por metales pesados, sería encontrar el camino hacia una agricultura mucho más sostenible; esto se puede lograr con el uso de microorganismos rizosféricos, dentro los cuales los hongos micorrizicos arbusculares jugarán un papel fundamental para mejorar las condiciones fisicoquímicas del suelo así como interactuar con diversas plantas y bacterias benéficas, mejorando su crecimiento, productividad y adaptabilidad a ambientes desfavorables. Teniendo en cuenta que los procesos de fitorremediación están siendo ampliamente estudiados debido a sus índices de eficacia, su relativo modo de empleo y sobre todo su bajo costo de implementación, hay algunas limitaciones que se deben tener en cuenta: se requieren periodos largos, las concentraciones de metales pesados son cruciales para los efectos de fitotoxicidad, el poco conocimiento de plantas nativas hiperacumuladoras (**Tabla 5**) así como que especies de AMF interactúan eficientemente con ellas reduce su aplicabilidad directamente en campo. Con la implementación de las nuevas técnicas dentro de la biología molecular, por ejemplo, utilizando el silenciamiento génico (en plantas hiperacumuladoras), puede lograr una mayor sensibilidad en lo que respecta a los procesos de colonización de las raíces por parte de las micorrizas y por ende aprovechar mejor sus beneficios (170), buscar nuevas estrategias que permitan incrementar los rendimientos de fitorremediación, no solo depende de la especie de material vegetal utilizado, sino que, optimizar las condiciones bajo las cuales los AMF puedan tener una eficacia mucho mayor se vuelve fundamental, por ejemplo, en procesos de fitorremediación ex situ, utilizar elevadas concentraciones de CO₂ permite incrementar la cantidad como la diversidad de micorrizas (171) o el uso de nanotecnología, complementando los procesos de fitoinmovilización asistida por AMF con nanopartículas permitirían incrementar la eficacia y el rendimiento del proceso (172); al ser estrategias recientes se hace necesario incrementar los casos de estudio con la finalidad de obtener una base sólida que respalde los resultados obtenidos, permitiendo zanjar los inconvenientes presentes hasta el momento y su aplicación futura se pueda implementar.

CONCLUSIONES

Los hongos micorrizicos arbusculares, son parte de los microorganismos benéficos presentes en la rizosfera, los cuales son capaces de establecer relaciones de simbiosis con aproximadamente el 80% de las especies vegetales, siendo necesario para una correcta colonización tener en cuenta algunos parámetros fisicoquímicos del suelo (pH, potencial redox, cantidad de materia orgánica y concentración de los metales pesados), del mismo modo y como se menciona en (79; 160) la deficiencia de fósforo ayuda a elevar el porcentaje de colonización en las raíces, sin olvidarnos, que es imprescindible tomar en consideración tanto las especies de AMF y plantas que pueden complementarse con mayor eficiencia. Dentro de las técnicas de fitorremediación, se determina que tanto la fitoinmovilización como la fitoextracción son los procesos más usados al momento de remediar ecosistemas contaminados por metales y metaloides, esto es debido a su bajo costo de implementación, su facilidad de aplicación en áreas extensas o de difícil acceso sin distorsionar el lugar donde son empleadas. Las interacciones entre planta – AMF, permiten obtener mejores rendimientos en el crecimiento y desarrollo de las plantas hospedadoras, del mismo modo que estas producen moléculas como fuentes de carbono para el desarrollo de las micorrizas; para los procesos de fitorremediación asistida por AMF encontramos principalmente 6 estrategias por las cuales la eficacia y rendimiento son mejoradas: 1. Inhibición de la captación de metales pesados por la red micelar producida por las micorrizas, 2. Mejorar la captación de nutrientes (principalmente el fósforo) y agua, 3. Almacenar y compartimentalizar eficientemente los metales pesados absorbidos tanto en las esporas de los AMF (fitoinmovilización) o en las vacuolas de las células vegetales (fitoinmovilización y fitoextracción), 4. Quelación de diversos metales pesados gracias a la producción de metabolitos secundarios para formar complejos en el suelos, reduciendo así la biodisponibilidad de los HM para ser captados por las plantas, 5. Los AMF bajo la presencia de metales pesados, son capaces de estimular los sistemas antioxidantes de las plantas y 6. Existe una interacción positiva en cuanto a la presencia de AMF y la mayor incidencia de bacteria benéficas en la rizosfera, bacterias promotoras del crecimiento de plantas. Finalmente, las especies más investigadas de AMF pertenecen a la familia Glomeromicota (por su abundancia en la rizosfera) y dentro de ella encontramos *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus intraradices*, *Rhizophagus irregularis*, *Glomus versiforme*, *Glomus intraradices*, *Gigaspora intraradices*, las cuales tuvieron como plantas hospedadoras a *Zea mays*, *Solanum lycopersicum*, *Nicotiana tabaccum*, *Arabidopsis thaliana*, *Latuca sativa*,

Medicago sativa, *Acacia mangium*, *Sorghum sp* y *Robinia pseudoacacia*, adicionalmente, la falta de estudio sobre las interacciones AMF – planta, la poca evidencia de plantas nativas hiperacumuladoras son limitantes para la aplicación de procesos de fitorremediación más eficaces.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Li Q, Li J, Jiang L, Sun Y, Luo C, Zhang G. Diversity and structure of phenanthrene degrading bacterial communities associated with fungal bioremediation in petroleum contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*. 2021 Feb 5;403.
2. Yang Y, Song Y, Scheller H v., Ghosh A, Ban Y, Chen H, et al. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi associated with Robinia pseudoacacia in uncontaminated and heavy metal contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2015 Jul 1;86:146–58.
3. Khade SW, Adholeya A. Feasible bioremediation through arbuscular mycorrhizal fungi imparting heavy metal tolerance: A retrospective. Vol. 11, *Bioremediation Journal*. 2007. p. 33–43.
4. Alekseenko VA, Bech J, Alekseenko A v., Shvydkaya N v., Roca N. Environmental impact of disposal of coal mining wastes on soils and plants in Rostov Oblast, Russia. *Journal of Geochemical Exploration*. 2018 Jan 1;184:261– 70.
5. Zhao H, Wei Y, Wang J, Chai T. Isolation and expression analysis of cadmium-induced genes from Cd/Mn hyperaccumulator *Phytolacca americana* in response to high Cd exposure. *Plant Biology*. 2019 Jan 1;21(1):15–24.
6. Turan V. Confident performance of chitosan and pistachio shell biochar on reducing Ni bioavailability in soil and plant plus improved the soil enzymatic activities, antioxidant defense system and nutritional quality of lettuce. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019 Nov 15;183.
7. Tomović G, Buzurović U, Đurović S, Vicić D, Mihailović N, Jakovljević K. Strategies of heavy metal uptake by three *Armeria* species growing on different geological substrates in Serbia. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018 Jan 1;25(1):507–22.
8. Dilks RT, Monette F, Glaus M. The major parameters on biomass pyrolysis for hyperaccumulative plants - A review. Vol. 146, *Chemosphere*. Elsevier Ltd; 2016. p. 385–95.
9. Riaz M, Kamran M, Fang Y, Wang Q, Cao H, Yang G, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. Vol. 402, *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V.; 2021.
10. He W, Megharaj M, Wu CY, Subashchandrabose SR, Dai CC. Endophyte-assisted phytoremediation: mechanisms and current application strategies for soil mixed

- pollutants. Vol. 40, Critical Reviews in Biotechnology. Taylor and Francis Ltd; 2020. p. 31–45.
11. Tomar PC, Chapadgaonkar SS, Panchal V, Ghosh A. Heavy metal phytoremediation: Potential and advancement. Asia-Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology. 2020;28(4):81–93.
12. Pajević S, Borišev M, Nikolić N, Arsenov DD, Orlović S, Župunski M. Phytoextraction of heavy metals by fast-growing trees: A review. In: Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 3. Springer International Publishing; 2016. p. 29–64.
13. Khan AG, Kuek C, Chaudhry TM, Khoo CS, Hayes WJ. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation.
14. Yang Y, Liang Y, Ghosh A, Song Y, Chen H, Tang M. Assessment of arbuscular mycorrhizal fungi status and heavy metal accumulation characteristics of tree species in a lead–zinc mine area: potential applications for phytoremediation. Environmental Science and Pollution Research. 2015 Sep 28;22(17):13179–93.
15. Vilela LAF, Barbosa MV. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in promoting cadmium tolerance in plants. In: Cadmium Tolerance in Plants: Agronomic, Molecular, Signaling, and Omic Approaches. Elsevier; 2019. p. 553– 86.
16. de Fátima Pedroso D, Barbosa MV, dos Santos JV, Pinto FA, Siqueira JO, Carneiro MAC. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Favor the Initial Growth of Acacia mangium, Sorghum bicolor, and Urochloa brizantha in Soil Contaminated with Zn, Cu, Pb, and Cd. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2018 Sep 1;101(3):386–91.
17. Hu ZH, Zhuo F, Jing SH, Li X, Yan TX, Lei LL, et al. Combined application of arbuscular mycorrhizal fungi and steel slag improves plant growth and reduces Cd, Pb accumulation in Zea mays. International Journal of Phytoremediation. 2019 Jul 29;21(9):857–65.
18. Singh G, Pankaj U, Chand S, Verma RK. Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Assisted Phytoextraction of Toxic Metals by Zea mays L. From Tannery Sludge. Soil and Sediment Contamination. 2019 Nov 17;28(8):729–46.
19. Zheng S, Wang C, Shen Z, Quan Y, Liu X. Role of Extrinsic Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Heavy Metal-Contaminated Wetlands with Various Soil Moisture Levels. International Journal of Phytoremediation. 2015 Mar 4;17(3):208–14.

20. Coninx L, Martinova V, Rineau F. Mycorrhiza-Assisted Phytoremediation. *Advances in Botanical Research*. 2017;83:127–88.
21. Liu C, Dai Z, Cui M, Lu W, Sun H. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate boron toxicity in *Puccinellia tenuiflora* under the combined stresses of salt and drought. *Environmental Pollution*. 2018 Sep 1;240:557–65.
22. Pourret O, Hursthouse A. It's time to replace the term "heavy metals" with "potentially toxic elements" when reporting environmental research. Vol. 16, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. MDPI AG; 2019.
23. Duffus JH. "HEAVY METALS"-A MEANINGLESS TERM? (IUPAC Technical Report). Vol. 74, *Pure Appl. Chem*. W. A. Temple; 2002.
24. López-Pacheco IY, Silva-Núñez A, Salinas-Salazar C, Arévalo-Gallegos A, Lizarazo-Holguin LA, Barceló D, et al. Anthropogenic contaminants of high concern: Existence in water resources and their adverse effects. Vol. 690, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V.; 2019. p. 1068–88.
25. Román-Ochoa Y, Choque Delgado GT, Tejada TR, Yucra HR, Durand AE, Hamaker BR. Heavy metal contamination and health risk assessment in grains and grain-based processed food in Arequipa region of Peru. *Chemosphere*. 2021 Jul 1;274.
26. Yang Q, Li Z, Lu X, Duan Q, Huang L, Bi J. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. Vol. 642, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V.; 2018. p. 690–700.
27. Zhu D, Wei Y, Zhao Y, Wang Q, Han J. Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment of the Agriculture Soil in Xunyang Mining Area, Shaanxi Province, Northwestern China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2018 Aug 1;101(2):178–84.
28. Liu X, Zhong L, Meng J, Wang F, Zhang J, Zhi Y, et al. A multi-medium chain modeling approach to estimate the cumulative effects of cadmium pollution on human health. *Environmental Pollution*. 2018 Aug 1;239:308–17.
29. Fu Z, Xi S. The effects of heavy metals on human metabolism. Vol. 30, *Toxicology Mechanisms and Methods*. Taylor and Francis Ltd; 2020. p. 167–76.
30. Chen AYY, Olsen T. Chromated copper arsenate-treated wood: a potential source of arsenic exposure and toxicity in dermatology. Vol. 2, *International Journal of Women's Dermatology*. Elsevier Inc; 2016. p. 28–30.

31. Pulford ID, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees - A review. Vol. 29, *Environment International*. Elsevier Ltd; 2003. p. 529–40.
32. Rubio C, Paz S, Tius E, Hardisson A, Gutierrez AJ, Gonzalez-Weller D, et al. Metal contents in the most widely consumed commercial preparations of four different medicinal plants (Aloe, Senna, ginseng, and ginkgo) from Europe. *Biological Trace Element Research*. 2018 Apr 13;186(2):562–7.
33. Clarkson TW, Magos L. The toxicology of mercury and its chemical compounds. Vol. 36, *Critical Reviews in Toxicology*. 2006. p. 609–62.
34. Rodrigues SM, Henriques B, Reis AT, Duarte AC, Pereira E, Römkens PFAM. Hg transfer from contaminated soils to plants and animals. *Environmental Chemistry Letters*. 2012 Mar;10(1):61–7.
35. Zulfiqar U, Farooq M, Hussain S, Maqsood M, Hussain M, Ishfaq M, et al. Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. Vol. 250, *Journal of Environmental Management*. Academic Press; 2019.
36. Etteieb S, Magdoui S, Zolfaghari M, Brar SK. Monitoring and analysis of selenium as an emerging contaminant in mining industry: A critical review. Vol. 698, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V.; 2020.
37. Vardhan KH, Kumar PS, Panda RC. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. Vol. 290, *Journal of Molecular Liquids*. Elsevier B.V.; 2019.
38. Leyssens L, Vinck B, van der Straeten C, Wuyts F, Maes L. Cobalt toxicity in humans—A review of the potential sources and systemic health effects. Vol. 387, *Toxicology*. Elsevier Ireland Ltd; 2017. p. 43–56.
39. Almeida JC, Cardoso CED, Tavares DS, Freitas R, Trindade T, Vale C, et al. Chromium removal from contaminated waters using nanomaterials – A review. Vol. 118, *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. Elsevier B.V.; 2019. p. 277–91.
40. Schaumlöffel D. Nickel species: Analysis and toxic effects. Vol. 26, *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2012. p. 1–6.
41. Lu Q, Xu X, Liang L, Xu Z, Shang L, Guo J, et al. Barium concentration, phytoavailability, and risk assessment in soil-rice systems from an active barium mining region. *Applied Geochemistry*. 2019 Jul 1;106:142–8.
42. Nelson M, Adams T, Ojo C, Carroll MA, Catapane EJ. Manganese toxicity is targeting an early step in the dopamine signal transduction pathway that controls

- lateral cilia activity in the bivalve mollusc *Crassostrea virginica*. Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology. 2018 Nov 1;213:1–6.
43. Mironyuk I, Tatarchuk T, Vasylyeva H, Naushad M, Mykytyn I. Adsorption of Sr(II) cations onto phosphated mesoporous titanium dioxide: Mechanism, isotherm and kinetics studies. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019 Dec 1;7(6).
44. Awa SH, Hadibarata T. Removal of Heavy Metals in Contaminated Soil by Phytoremediation Mechanism: a Review. Vol. 231, Water, Air, and Soil Pollution. Springer; 2020.
45. Rao PSC, Davis GB, Johnston CD. 2 Technologies for enhanced remediation of contaminated soils and aquifers: overview, analysis, and case studies. 1996.
46. Song B, Zeng G, Gong J, Liang J, Xu P, Liu Z, et al. Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals. Vol. 105, Environment International. Elsevier Ltd; 2017. p. 43–55.
47. Song Y, Jin L, Wang X. Cadmium absorption and transportation pathways in plants. International Journal of Phytoremediation. 2017 Feb 1;19(2):133–41.
48. Shikha D, Singh PK. In situ phytoremediation of heavy metal–contaminated soil and groundwater: a green inventive approach. Vol. 28, Environmental Science and Pollution Research. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2021. p. 4104–24.
49. Tomar PC, Chapadgaonkar SS, Panchal V, Ghosh A. Heavy metal phytoremediation: Potential and advancement. Asia-Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology. 2020;28(4):81–93.
50. Wang X, Fernandes de Souza M, Li H, Tack FMG, Ok YS, Meers E. Zn phytoextraction and recycling of alfalfa biomass as potential Zn-biofortified feed crop. Science of the Total Environment. 2021 Mar 15;760.
51. Yu G, Jiang P, Fu X, Liu J, Sunahara GI, Chen Z, et al. Phytoextraction of cadmium-contaminated soil by *Celosia argentea* Linn.: A long-term field study. Environmental Pollution. 2020 Nov 1;266.
52. Zhang Y, Li F, Xu W, Ren J, Chen S, Shen K, et al. Enhanced Phytoextraction for Co-contaminated Soil with Cd and Pb by Ryegrass (*Lolium perenne* L.). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2019 Jul 15;103(1):147–54.

53. Dinh T, Dobo Z, Kovacs H. Phytomining of noble metals – A review. Vol. 286, Chemosphere. Elsevier Ltd; 2022.
54. Al-Baldawi IA, Abdullah SRS, Anuar N, Hasan HA. Phytotransformation of methylene blue from water using aquatic plant (*Azolla pinnata*). Environmental Technology and Innovation. 2018 Aug 1;11:15–22.
55. Li Y, Zhang J, Zhu G, Liu Y, Wu B, Ng WJ, et al. Phytoextraction, phytotransformation and rhizodegradation of ibuprofen associated with *Typha angustifolia* in a horizontal subsurface flow constructed wetland. Water Research. 2016 Oct 1;102:294–304.
56. Li M, Cheng Y, Ding T, Wang H, Wang W, Li J, et al. Phytotransformation and Metabolic Pathways of ¹⁴C-Carbamazepine in Carrot and Celery. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2020 Mar 18;68(11):3362–71.
57. Zhao L, Li T, Zhang X, Chen G, Zheng Z, Yu H. Pb Uptake and Phytostabilization Potential of the Mining Ecotype of *Athyrium wardii* (Hook.) Grown in Pb-Contaminated Soil. Clean - Soil, Air, Water. 2016 Sep 1;44(9):1184–90.
58. Sylvain B, Mikael MH, Florie M, Emmanuel J, Marilyne S, Sylvain B, et al. Phytostabilization of As, Sb and Pb by two willow species (*S. viminalis* and *S. purpurea*) on former mine technosols. Catena. 2016 Jan 1;136:44–52.
59. RoyChowdhury A, Sarkar D, Datta R. A combined chemical and phytoremediation method for reclamation of acid mine drainage–impacted soils. Environmental Science and Pollution Research. 2019;
60. Limmer M, Burken J. Phytovolatilization of Organic Contaminants. Vol. 50, Environmental Science and Technology. American Chemical Society; 2016. p. 6632–43.
61. Tiodar ED, Văcar CL, Podar D. Phytoremediation and microorganisms-assisted phytoremediation of mercury-contaminated soils: Challenges and perspectives. Vol. 18, International Journal of Environmental Research and Public Health. MDPI AG; 2021. p. 1–38.
62. Han Y, Lee J, Kim C, Park J, Lee M, Yang M. Uranium rhizofiltration by *lactuca sativa*, *brassica campestris* l., *raphanus sativus* l., *oenanthe javanica* under different hydroponic conditions. Minerals. 2021 Jan 1;11(1):1–14.
63. Leblebici Z, Dalmiş E, Andeden EE. Determination of the potential of *Pistia Stratiotes* L. in removing nickel from the environment by utilizing its rhizofiltration

- capacity. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2019; 62:1–12.
64. Liópez-Chuken UJ, López-Domínguez U, Parra-Saldivar R, Moreno-Jiménez E, Hinojosa-Reyes L, Guzmán-Mar JL, et al. Implications of chloride-enhanced cadmium uptake in saline agriculture: Modeling cadmium uptake by maize and tobacco. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2012 Jan;9(1):69–77.
65. Lee BXY, Hadibarata T, Yuniarto A. *Phytoremediation Mechanisms in Air Pollution Control: a Review*. Vol. 231, Water, Air, and Soil Pollution. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2020.
66. Chen G, Jin Z, Li S, Jin X, Tong S, Liu S, et al. Early life exposure to particulate matter air pollution (PM1, PM2.5 and PM10) and autism in Shanghai, China: A case-control study. *Environment International*. 2018 Dec 1;121:1121–7.
67. Zhang P, Zhou X. Health and economic impacts of particulate matter pollution on hospital admissions for mental disorders in Chengdu, Southwestern China. *Science of the Total Environment*. 2020 Sep 1;733.
68. Wang X, Hart JE, Liu Q, Wu S, Nan H, Laden F. Association of particulate matter air pollution with leukocyte mitochondrial DNA copy number. *Environment international*. 2020 Aug 1;141:105761.
69. Scott PS, Andrew JP, Bundy BA, Grimm BK, Hamann MA, Ketcherside DT, et al. Observations of volatile organic and sulfur compounds in ambient air and health risk assessment near a paper mill in rural Idaho, U. S. A. *Atmospheric Pollution Research*. 2020 Oct 1;11(10):1870–81.
70. Ranzani OT, Milà C, Sanchez M, Bhogadi S, Kulkarni B, Balakrishnan K, et al. Personal exposure to particulate air pollution and vascular damage in peri-urban South India. *Environment International*. 2020 Jun 1;139.
71. Ly BT, Kajii Y, Nguyen TYL, Shoji K, Van DA, Do TNN, et al. Characteristics of roadside volatile organic compounds in an urban area dominated by gasoline vehicles, a case study in Hanoi. *Chemosphere*. 2020 Sep 1;254.
72. Ndong Ba A, Verdin A, Cazier F, Garcon G, Thomas J, Cabral M, et al. Individual exposure level following indoor and outdoor air pollution exposure in Dakar (Senegal). *Environmental Pollution*. 2019 May 1;248:397–407.
73. Ho AFW, Wah W, Earnest A, Ng YY, Xie Z, Shahidah N, et al. Health impacts of the Southeast Asian haze problem – A time-stratified case crossover study of the relationship between ambient air pollution and sudden cardiac deaths in Singapore.

- International Journal of Cardiology. 2018 Nov 15;271:352–8.
74. Othman J, Sahani M, Mahmud M, Sheikh Ahmad MK. Transboundary smoke haze pollution in Malaysia: Inpatient health impacts and economic valuation. *Environmental Pollution*. 2014;189:194–201.
 75. Lee BXY, Hadibarata T, Yuniarto A. Phytoremediation Mechanisms in Air Pollution Control: a Review. Vol. 231, *Water, Air, and Soil Pollution*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2020.
 76. Kaur P, Bali S, Sharma A, Vig AP, Bhardwaj R. Role of earthworms in phytoremediation of cadmium (Cd) by modulating the antioxidative potential of *Brassica juncea* L. *Applied Soil Ecology*. 2018 Mar 1;124:306–16.
 77. Li Y, Luo J, Yu J, Xia L, Zhou C, Cai L, et al. Improvement of the phytoremediation efficiency of *Neyraudia reynaudiana* for lead-zinc mine- contaminated soil under the interactive effect of earthworms and EDTA. *Scientific Reports*. 2018 Dec 1;8(1).
 78. Ji P, Huang X, Jiang Y, Zhao H. Potential of enhancing the phytoremediation efficiency of *Solanum nigrum* L. by earthworms. *International Journal of Phytoremediation*. 2020 Apr 15;22(5):529–33.
 79. Wang G, Wang L, Ma F, You Y, Wang Y, Yang D. Integration of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi into phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Solanum nigrum* L. *Journal of Hazardous Materials*. 2020 May 5;389.
 80. Mahohi A, Raiesi F. The performance of mycorrhizae, rhizobacteria, and earthworms to improve Bermuda grass (*Cynodon dactylon*) growth and Pb uptake in a Pb-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021 Jan 1;28(3):3019–34.
 81. Santana NA, Ferreira PAA, Tarouco CP, Schardong IS, Antonioli ZI, Nicoloso FT, et al. Earthworms and mycorrhization increase copper phytoextraction by *Canavalia ensiformis* in sandy soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019 Oct 30;182.
 82. Chang Kee J, Gonzales MJ, Ponce O, Ramírez L, León V, Torres A, et al. Accumulation of heavy metals in native Andean plants: potential tools for soil phytoremediation in Ancash (Peru). *Environmental Science and Pollution Research*. 2018 Dec 1;25(34):33957–66.
 83. Dotaniya ML, Rajendiran S, Dotaniya CK, Solanki P, Meena VD, Saha JK, et al. Microbial assisted phytoremediation for heavy metal contaminated soils. In: *Phytobiont and Ecosystem Restitution*. Springer Singapore; 2018. p. 295–317.

84. Nurzhanova A, Mukasheva T, Berzhanova R, Kalugin S, Omirbekova A, Mikolasch A. Optimization of microbial assisted phytoremediation of soils contaminated with pesticides. *International Journal of Phytoremediation*. 2021;23(5):482–91.
85. García-Sánchez M, Košnář Z, Mercl F, Aranda E, Tlustoš P. A comparative study to evaluate natural attenuation, mycoaugmentation, phytoremediation, and microbial-assisted phytoremediation strategies for the bioremediation of an aged PAH-polluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018 Jan 1;147:165– 74.
86. Nedjimi B. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. Vol. 3, *SN Applied Sciences*. Springer Nature; 2021.
87. Nguyen TQ, Sesin V, Kisiala A, Emery RJN. Phytohormonal Roles in Plant Responses to Heavy Metal Stress: Implications for Using Macrophytes in Phytoremediation of Aquatic Ecosystems. Vol. 40, *Environmental Toxicology and Chemistry*. Wiley Blackwell; 2021. p. 7–22.
88. Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? Vol. 180, *Plant Science*. 2011. p. 169–81.
89. Singh S, Parihar P, Singh R, Singh VP, Prasad SM. Heavy metal tolerance in plants: Role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. Vol. 6, *Frontiers in Plant Science*. Frontiers Media S.A.; 2016.
90. Riaz M, Kamran M, Fang Y, Wang Q, Cao H, Yang G, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. Vol. 402, *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V.; 2021.
91. Thakur M, Praveen S, Divte PR, Mitra R, Kumar M, Gupta CK, et al. Metal tolerance in plants: Molecular and physicochemical interface determines the “not so heavy effect” of heavy metals. Vol. 287, *Chemosphere*. Elsevier Ltd; 2022.
92. Benidire L, Pereira SIA, Naylo A, Castro PML, Boularbah A. Do metal contamination and plant species affect microbial abundance and bacterial diversity in the rhizosphere of metallophytes growing in mining areas in a semiarid climate? *Journal of Soils and Sediments*. 2020 Feb 1;20(2):1003–17.
93. Krishnamoorthy R, Venkatramanan V, Senthilkumar M, Anandham R, Kumutha K, Sa T. Management of heavy metal polluted soils: Perspective of arbuscular mycorrhizal fungi. In: *Sustainable Green Technologies for Environmental Management*. Springer Singapore; 2019. p. 67–85.

94. Ali H, Khan E. Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs—Concepts and implications for wildlife and human health. Vol. 25, Human and Ecological Risk Assessment. Taylor and Francis Inc.; 2019. p. 1353–76.
95. Liu J, Cao L, Dou S. Trophic transfer, biomagnification and risk assessments of four common heavy metals in the food web of Laizhou Bay, the Bohai Sea. Science of the Total Environment. 2019 Jun 20;670:508–22.
96. Wassenaar PNH, Verbruggen EMJ, Cieraad E, Peijnenburg WJGM, Vijver MG. Variability in fish bioconcentration factors: Influences of study design and consequences for regulation. Chemosphere. 2020 Jan 1;239.
97. Hao Z, Chen L, Wang C, Zou X, Zheng F, Feng W, et al. Heavy metal distribution and bioaccumulation ability in marine organisms from coastal regions of Hainan and Zhoushan, China. Chemosphere. 2019 Jul 1;226:340–50.
98. Cruz ACF, Pauly GFE, Araujo GS, Gusso-Choueri P, Fonseca TG, Campos BG, et al. Metal Bioaccumulation by the Neotropical Clam *Anomalocardia flexuosa* to Estimate the Quality of Estuarine Sediments. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2021 Jul 1;107(1):106–13.
99. Hu C, Shui B, Yang X, Wang L, Dong J, Zhang X. Trophic transfer of heavy metals through aquatic food web in a seagrass ecosystem of Swan Lagoon, China. Science of the Total Environment. 2021 Mar 25;762.
100. Souza I da C, Arrivabene HP, Azevedo VC, Duarte ID, Rocha LD, Matsumoto ST, et al. Different trophodynamics between two proximate estuaries with differing degrees of pollution. Science of the Total Environment. 2021 May 20;770.
101. Ivanov R, Vert G. Endocytosis in plants: Peculiarities and roles in the regulated trafficking of plant metal transporters. Vol. 113, Biology of the Cell. Blackwell Publishing Ltd; 2021. p. 1–13.
102. Yang X-E, Jin X-F, Feng Y, Islam E. Molecular Mechanisms and Genetic Basis of Heavy Metal Tolerance/ Hyperaccumulation in Plants [Internet]. Available from: <http://www.blackwell-synergy.com><http://www.chineseplantscience.com>
103. Feki K, Tounsi S, Mrabet M, Mhadhbi H, Brini F. Recent advances in physiological and molecular mechanisms of heavy metal accumulation in plants. Environmental Science and Pollution Research. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2021.
104. Osmolovskaya N, Dung VV, Kuchaeva L. The role of organic acids in heavy metal

- tolerance in plants. Vol. 63, Biological Communications. Saint-Petersburg State University; 2018. p. 9–16.
105. Ló Pez-Bucio J, Nieto-Jacobo F, Ramírez-Rodríguez V, Herrera-Estrella L. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils [Internet]. Vol. 160, Plant Science. 2000. Available from: www.elsevier.com/locate/plantsci
 106. Praveen A, Pandey A, Gupta M. Protective role of nitric oxide on nitrogen-thiol metabolism and amino acids profiling during arsenic exposure in *Oryza sativa* L. *Ecotoxicology*. 2020 Sep 1;29(7):825–36.
 107. Peco JD, Campos JA, Romero-Puertas MC, Olmedilla A, Higuera P, Sandalio LM. Characterization of mechanisms involved in tolerance and accumulation of Cd in *Biscutella auriculata* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020 Sep 15;201.
 108. Xiao Q, Wang Y, Lü Q, Wen H, Han B, Chen S, et al. Responses of glutathione and phytochelatins biosynthesis in a cadmium accumulator of *Perilla frutescens* (L.) Britt. under cadmium contaminated conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020 Sep 15;201.
 109. Schat H, Llugany M, Vooijs R, Hartley-Whitaker J, Bleeker PM. The role of phytochelatins in constitutive and adaptive heavy metal tolerances in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator metallophytes. *Journal of Experimental Botany*. 2002;53(379):2381–92.
 110. Cobbett C, Goldsbrough P. Phytochelatins and metallothioneins: Roles in heavy metal detoxification and homeostasis. Vol. 53, *Annual Review of Plant Biology*. 2002. p. 159–82.
 111. Sharma R, Bhardwaj R, Handa N, Gautam V, Kohli SK, Bali S, et al. Responses of Phytochelatins and Metallothioneins in Alleviation of Heavy Metal Stress in Plants: An Overview. In: *Plant Metal Interaction: Emerging Remediation Techniques*. Elsevier Inc.; 2015. p. 263–83.
 112. Divte P, Yadav P, Jain P kumar, Paul S, Singh B. Ethylene regulation of root growth and phytosiderophore biosynthesis determines iron deficiency tolerance in wheat (*Triticum spp*). *Environmental and Experimental Botany*. 2019 Jun 1;162:1– 13.
 113. Khalid M, Ur-Rahman S, Hassani D, Hayat K, Zhou P, Hui N. Advances in fungal-assisted phytoremediation of heavy metals: A review. *Pedosphere*. 2021 Apr 1;31(3):475–95.
 114. Piliarová M, Ondreičková K, Hudcovicová M, Mihálik D, Kraic J. Arbuscular

- Mycorrhizal Fungi - Their Life and Function in Ecosystem. Vol. 65, Agriculture. De Gruyter; 2019. p. 3–15.
115. Bucking H, Liepold E, Ambilwade P. The Role of the Mycorrhizal Symbiosis in Nutrient Uptake of Plants and the Regulatory Mechanisms Underlying These Transport Processes. In: Plant Science. InTech; 2012.
 116. Willis A, Rodrigues BF, Harris PJC. The Ecology of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. Critical Reviews in Plant Sciences. 2013 Jan;32(1):1–20.
 117. Srivastava P, Saxena B, Giri B. Arbuscular mycorrhizal fungi: Green approach/technology for sustainable agriculture and environment. In: Mycorrhiza-Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration: Fourth Edition. Springer International Publishing; 2018. p. 355–86.
 118. Tiwari J, Ma Y, Bauddh K. Arbuscular mycorrhizal fungi: an ecological accelerator of phytoremediation of metal contaminated soils. Archives of Agronomy and Soil Science. Taylor and Francis Ltd.; 2020.
 119. Ma X, Geng Q, Zhang H, Bian C, Chen HYH, Jiang D, et al. Global negative effects of nutrient enrichment on arbuscular mycorrhizal fungi, plant diversity and ecosystem multifunctionality. New Phytologist. 2021 Mar 1;229(5):2957–69.
 120. Balestrini R, Brunetti C, Chitarra W, Nerva L. Photosynthetic traits and nitrogen uptake in crops: Which is the role of arbuscular mycorrhizal fungi? Vol. 9, Plants. MDPI AG; 2020. p. 1–16.
 121. Khade SW, Adholeya A. Feasible bioremediation through arbuscular mycorrhizal fungi imparting heavy metal tolerance: A retrospective. Vol. 11, Bioremediation Journal. 2007. p. 33–43.
 122. Jamiołkowska A, Książniak A, Gałązka A, Hetman B, Kopacki M, Skwaryło-Bednarz B. Impact of abiotic factors on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: A Review. Vol. 32, International Agrophysics. Walter de Gruyter GmbH; 2018. p. 133–40.
 123. Dowarah B, Gill SS, Agarwala N. Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Conferring Tolerance to Biotic Stresses in Plants. Journal of Plant Growth Regulation. Springer; 2021.
 124. Riaz M, Kamran M, Fang Y, Wang Q, Cao H, Yang G, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. Vol. 402, Journal of Hazardous Materials. Elsevier B.V.; 2021.
 125. Neidhardt H. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate negative effects of arsenic-

- induced stress on crop plants: A meta-analysis. Vol. 3, Plants People Planet. John Wiley and Sons Inc; 2021. p. 523–35.
126. Bhantana P, Shoaib Rana M, Sun X, Moussa MG, Hamzah Saleem M, Syaifudin M, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00756-6>
 127. Adeyemi NO, Atayese MO, Sakariyawo OS, Azeez JO, Olubode A, Ridwan M, et al. A Growth and Phosphorus Uptake of Soybean (*Glycine Max L.*) in Response to Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Rhizophagus Intraradices* Inoculation in Heavy Metal-contaminated Soils. *Soil and Sediment Contamination*. 2021;30(6):698– 713.
 128. Lenoir I, Fontaine J, Lounès-Hadj Sahraoui A. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: A review. Vol. 123, *Phytochemistry*. Elsevier Ltd; 2016. p. 4–15.
 129. Salazar MJ, Menoyo E, Faggioli V, Geml J, Cabello M, Rodriguez JH, et al. Pb accumulation in spores of arbuscular mycorrhizal fungi. *Science of the Total Environment*. 2018 Dec 1;643:238–46.
 130. Garg N, Singh S, Kashyap L. Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants: An insight into physiological and molecular mechanisms. In: *Mycorrhiza - Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration: Fourth Edition*. Springer International Publishing; 2018. p. 75–97.
 131. Wu M, Yan Y, Wang Y, Mao Q, Fu Y, Peng X, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi for vegetable (VT) enhance resistance to *Rhizoctonia solani* in watermelon by alleviating oxidative stress. *Biological Control*. 2021 Jan 1;152.
 132. Gough EC, Owen KJ, Zwart RS, Thompson JP. Arbuscular mycorrhizal fungi acted synergistically with *Bradyrhizobium* sp. to improve nodulation, nitrogen fixation, plant growth and seed yield of mung bean (*Vigna radiata*) but increased the population density of the root-lesion nematode *Pratylenchus thornei*. *Plant and Soil*. 2021 Aug 1;465(1–2):431–52.
 133. Nanjundappa A, Bagyaraj DJ, Saxena AK, Kumar M, Chakdar H. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. In soil enhancing growth of crop plants. Vol. 6, *Fungal Biology and Biotechnology*. BioMed Central Ltd.; 2019.
 134. Shah V, Daverey A. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. Vol. 18, *Environmental Technology and Innovation*. Elsevier B.V.; 2020.

135. Dhalaria R, Kumar D, Kumar H, Nepovimova E, Kuca K, Islam MT, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi as potential agents in ameliorating heavy metal stress in plants. Vol. 10, *Agronomy*. MDPI AG; 2020.
136. Meier S, Borie F, Bolan N, Cornejo P. Phytoremediation of metal-polluted soils by arbuscular mycorrhizal fungi. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2012 Apr 1;42(7):741–75.
137. Singh G, Pankaj U, Chand S, Verma RK. Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Assisted Phytoextraction of Toxic Metals by *Zea mays* L. From Tannery Sludge. *Soil and Sediment Contamination*. 2019 Nov 17;28(8):729–46.
138. Ali H, Khan E, Sajad MA. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. Vol. 91, *Chemosphere*. Elsevier Ltd; 2013. p. 869–81.
139. Bech J, Abreu MM, Chon HT, Roca N. Remediation of potentially toxic elements in contaminated soils. In: *PHEs, Environment and Human Health: Potentially Harmful Elements in the Environment and the Impact on Human Health*. Springer Netherlands; 2014. p. 253–308.
140. Solís-Ramos LY, Coto-López C, Andrade-Torres A. Role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in remediation of anthropogenic soil pollution. Vol. 84, *Symbiosis*. Springer Science and Business Media B.V.; 2021. p. 321–36.
141. Magurno F, Malicka M, Posta K, Wozniak G, Lumini E, Piotrowska-Seget Z. Glomalin gene as molecular marker for functional diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in soil. *Biology and Fertility of Soils*. 2019;
142. Singh PK, Singh M, Tripathi BN. Glomalin: An arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. Vol. 250, *Protoplasma*. 2013. p. 663–9.
143. Cruzado-Tafur E, Torró L, Bierla K, Szpunar J, Tauler E. Heavy metal contents in soils and native flora inventory at Mining Environmental Liabilities in the Peruvian Andes. 2020.
144. Bech J, Duran P, Roca N, Poma W, Sánchez I, Roca-Pérez L, et al. Accumulation of Pb and Zn in *Bidens triplinervia* and *Senecio* sp. spontaneous species from mine spoils in Peru and their potential use in phytoremediation. *Journal of Geochemical Exploration*. 2012 Dec;123:109–13.
145. Bech J, Roca N, Tume P, Ramos-Miras J, Gil C, Boluda R. Screening for new accumulator plants in potential hazards elements polluted soil surrounding Peruvian mine tailings. *Catena*. 2016 Jan 1;136:66–73.

146. Chang Kee J, Gonzales MJ, Ponce O, Ramírez L, León V, Torres A, et al. Accumulation of heavy metals in native Andean plants: potential tools for soil phytoremediation in Ancash (Peru). *Environmental Science and Pollution Research*. 2018 Dec 1;25(34):33957–66.
147. Martínez-Manchego L, Sarmiento-Sarmiento G, Bocardo-Delgado E. Native plant species with potential for phytoremediation of high-andean soils contaminated by residues from mining activity. *Bioagro*. 2021;33(3):161–70.
148. Wang J, Ye S, Xue S, Hartley W, Wu H, Shi L. The physiological response of *Mirabilis jalapa* Linn. to lead stress and accumulation. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2018 Mar 1;128:11–4.
149. Obeso-Obando A, Vejarano R. Geranium cultivation: Potential use for arsenic (As), cadmium (Cd) and copper (Cu) removal from contaminated soils. In: *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions; 2020.
150. Vallejos-Torres G, Arévalo L, Iliquin I, Solis R. Field response of coffee clones to inoculation with consortium of arbuscular mycorrhizal fungi in the Amazonas Region, Peru. *Informacion Tecnologica*. 2019;30(6):73–84.
151. Senés-Guerrero C, Torres-Cortés G, Pfeiffer S, Rojas M, Schüßler A. Potato-associated arbuscular mycorrhizal fungal communities in the Peruvian Andes. *Mycorrhiza*. 2014 Dec 20;24(6):405–17.
152. Davies FT, Calderón CM, Huaman Z, Gómez R. Influence of a flavonoid (formononetin) on mycorrhizal activity and potato crop productivity in the highlands of Peru. *Scientia Horticulturae*. 2005 Oct 3;106(3):318–29.
153. Wu M, Yan Y, Wang Y, Mao Q, Fu Y, Peng X, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi for vegetable (VT) enhance resistance to *Rhizoctonia solani* in watermelon by alleviating oxidative stress. *Biological Control*. 2021 Jan 1;152.
154. Salazar MJ, Menoyo E, Faggioli V, Geml J, Cabello M, Rodriguez JH, et al. Pb accumulation in spores of arbuscular mycorrhizal fungi. *Science of the Total Environment*. 2018 Dec 1;643:238–46.
155. Nanjundappa A, Bagyaraj DJ, Saxena AK, Kumar M, Chakdar H. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. In soil enhancing growth of crop plants. Vol. 6, *Fungal Biology and Biotechnology*. BioMed Central Ltd.; 2019.

156. Gough EC, Owen KJ, Zwart RS, Thompson JP. Arbuscular mycorrhizal fungi acted synergistically with Bradyrhizobium sp. to improve nodulation, nitrogen fixation, plant growth and seed yield of mung bean (*Vigna radiata*) but increased the population density of the root-lesion nematode *Pratylenchus thornei*. *Plant and Soil*. 2021 Aug 1;465(1–2):431–52.
157. Adeyemi NO, Atayese MO, Sakariyawo OS, Azeez JO, Olubode A, Ridwan M, et al. A Growth and Phosphorus Uptake of Soybean (*Glycine Max L.*) in Response to Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Rhizophagus Intraradices* Inoculation in Heavy Metal-contaminated Soils. *Soil and Sediment Contamination*. 2021;30(6):698– 713.
158. Zheng S, Wang C, Shen Z, Quan Y, Liu X. Role of Extrinsic Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Heavy Metal-Contaminated Wetlands with Various Soil Moisture Levels. *International Journal of Phytoremediation*. 2015 Mar 4;17(3):208–14.
159. Yin Z, Zhang Y, Hu N, Shi Y, Li T, Zhao Z. Differential responses of 23 maize cultivar seedlings to an arbuscular mycorrhizal fungus when grown in a metal-polluted soil. *Science of the Total Environment*. 2021 Oct 1;789.
160. Yang Y, Song Y, Scheller H v., Ghosh A, Ban Y, Chen H, et al. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Robinia pseudoacacia* in uncontaminated and heavy metal contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2015 Jul 1;86:146–58.
161. Yang Y, Liang Y, Ghosh A, Song Y, Chen H, Tang M. Assessment of arbuscular mycorrhizal fungi status and heavy metal accumulation characteristics of tree species in a lead–zinc mine area: potential applications for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015 Sep 28;22(17):13179–93.
162. Singh G, Pankaj U, Chand S, Verma RK. Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Assisted Phytoextraction of Toxic Metals by *Zea mays L.* From Tannery Sludge. *Soil and Sediment Contamination*. 2019 Nov 17;28(8):729–46.
163. Cicatelli A, Lingua G, Todeschini V, Biondi S, Torrigiani P, Castiglione S. Arbuscular mycorrhizal fungi restore normal growth in a white poplar clone grown on heavy metal-contaminated soil, and this is associated with upregulation of foliar metallothionein and polyamine biosynthetic gene expression. *Annals of Botany*. 2010 Nov;106(5):791–802.
164. de Fátima Pedroso D, Barbosa MV, dos Santos JV, Pinto FA, Siqueira JO, Carneiro MAC. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Favor the Initial Growth of *Acacia mangium*,

- Sorghum bicolor*, and *Urochloa brizantha* in Soil Contaminated with Zn, Cu, Pb, and Cd. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2018 Sep 1;101(3):386–91.
165. Gunathilakae N, Yapa N, Hettiarachchi R. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the cadmium phytoremediation potential of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. *Groundwater for Sustainable Development*. 2018 Sep 1;7:477–82.
 166. Lei LL, Zhu QY, Xu PX, Jing YX. The intercropping and arbuscular mycorrhizal fungus decrease Cd accumulation in upland rice and improve phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Sphagneticola calendulacea* (L.) Pruski. *Journal of Environmental Management*. 2021 Nov 15;298.
 167. Chaturvedi R, Favas P, Pratas J, Varun M, Paul MS. Assessment of edibility and effect of arbuscular mycorrhizal fungi on *Solanum melongena* L. grown under heavy metal(loid) contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018 Feb 1;148:318–26.
 168. Hao L, Zhang Z, Hao B, Diao F, Zhang J, Bao Z, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alter microbiome structure of rhizosphere soil to enhance maize tolerance to La. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021 Apr 1;212.
 169. Lu RR, Hu ZH, Zhang QL, Li YQ, Lin M, Wang XL, et al. The effect of *Funneliformis mosseae* on the plant growth, Cd translocation and accumulation in the new Cd-hyperaccumulator *Sphagneticola calendulacea*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020 Oct 15;203.
 170. Huang D, Wang Q, Zou Y, Ma M, Jing G, Ma F, et al. Silencing MdGH3-2/12 in apple reduces cadmium resistance via the regulation of AM colonization. *Chemosphere*. 2021 Apr 1;269.
 171. Wang L, Jia X, Zhao Y, Zhang CY, Gao Y, Li X, et al. Effects of elevated CO₂ on arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Robinia pseudoacacia* L. grown in cadmium-contaminated soils. *Science of the Total Environment*. 2021 May 10;768.
 172. Cheng P, Zhang S, Wang Q, Feng X, Zhang S, Sun Y, et al. Contribution of nano-zero-valent iron and arbuscular mycorrhizal fungi to phytoremediation of heavy metal-contaminated soil. *Nanomaterials*. 2021;11(5).