

Revisión bibliográfica sobre la Fitorremediación para la recuperación aguas y suelos expuestos al Mercurio por la minería en Colombia

Juan Camilo Hernández Rodríguez
Nancy Juliana Romero Torres

Especialización en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Opción de Grado

Director
Paulo Germán García Murillo

Universidad Santo Tomás
04 de septiembre de 2023

Tabla de contenido

Índice de Tablas	4
Índice de Figuras.....	4
Índice de Diagramas	4
Resumen.....	5
Introducción	5
Situación del Problema.....	7
Formulación del Problema.....	9
Pregunta Problema	10
Justificación	11
Objetivo Principal.....	13
Objetivo Específicos.....	14
Marco Referencial.....	14
1. Marco normativo a nivel Nacional	20
Marco Teórico	22
1. Minería de Oro	23
2. Mercurio.....	24
3. Toxicidad.....	25
4. Fitorremediación	27
4.1. Efectos intracelulares.....	30
4.2. Efectos extracelulares	31
4.3. Efectos Biológicos y Químicos	32
4.3.1. Fitoextracción	32
4.3.2. Fitovolatilización:	33
4.3.3. Fitodegradación:.....	34
4.4. Efectos Biológicos, Físicos y Químicos	35
4.4.1. Fitoestabilización:.....	35
4.4.2. Rizofiltración	36
Marco Conceptual.....	38
1. Conceptos Generales	38

1.2	Contaminación.....	38
2.	Suelo	39
3.	Técnicas de remediación.....	40
4.	Fenómenos de remediación	41
4.1.	Fenómenos químicos	42
4.2.	Fenómenos físicos	44
	Metodología	47
1.	Tipo de investigación.....	47
2.	Revisión bibliográfica descriptiva	49
3.	Determinación del método según remoción y adaptabilidad	50
	Resultados.....	52
1.	Análisis documental y de datos estadísticos.....	53
1.1.	Procedimiento	53
1.2.	Especies vegetales destacadas en la revisión bibliográfica	58
1.2.1.	<i>Eichornia crassipes</i> Jacinto de Agua.....	60
1.2.1.1.	Taxonomía.....	62
1.2.1.2.	Absorción de mercurio de <i>Eichhornia crassipes</i>	63
1.2.2.	<i>Phragmites australis</i> El Carrizo.....	65
1.2.2.1.	Taxonomía.....	67
1.2.2.2.	Absorción de mercurio de <i>Phragmites Australis</i>	68
1.2.3.	<i>Cecropia peltata</i> El Yarumo	69
1.2.3.1.	Taxonomía.....	70
1.2.3.2.	Absorción de mercurio de <i>Cecropia peltata</i>	71
	Conclusiones	75
	Recomendaciones	77
	Bibliografía	78
	ANEXOS.....	88

Índice de Tablas

Tabla 1. Análisis comparativo de investigaciones sobre Fitorremediación.	54
Tabla 2. Taxonomía planta <i>Eichhornia crassipes</i>	62
Tabla 3. Taxonomía planta <i>Phragmites australis</i>	67
Tabla 4. Taxonomía planta <i>Cecropia peltata</i>	70
Tabla 5. Cronograma del proyecto de investigación de fitorremediación.	89
Tabla 6. Presupuesto inicial valoración del proyecto de fitorremediación Hg.	90

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de la minería ilegal en el territorio nacional.....	17
Figura 2. Mapa de la minería de oro en el territorio nacional	19
Figura 3. Resultados búsqueda bibliográfica.....	53
Figura 4. Clasificación plantas más usadas fitorremediación para absorción de mercurio.	58
Figura 5. Recopilación información sobre fitorremediación.	74

Índice de Diagramas

Diagrama 1. Diagrama metodológico.....	48
---	----

Resumen

Al conocer la problemática actual en el país sobre la degradación de los servicios ecosistémicos por el uso de metales pesados para la extracción aurífera, en este caso mercurio, y el impacto negativo que ésta sustancia produce en el suelo, agua, aire, y seres vivos, se encuentra la oportunidad de realizar una Revisión bibliográfica sobre la técnica de fitorremediación para la recuperación de aguas y suelos donde se depositan residuos de forma no controlada con el ion de mercurio, y cómo esta estrategia biológica, que su fuente principal son las plantas, remueven, estabilizan, transfieren y en forma particular pueden degradar a través de su sistema y con ayuda de microorganismos este metal pesado de los suelos, agua y diferentes sedimentos. Del mismo modo, este documento contempla la recopilación de estudios sobre fitorremediación en Colombia, la identificación de tres plantas que más se usaron por sus características moleculares y biológicas en la diferente bibliografía de investigación recopilado en los artículos científicos donde se expone su eficiencia de la remoción de mercurio en suelo y agua y cual es más óptima para los diferentes pisos térmicos.

Introducción

El estudio se enfocará en comprender las propiedades de las plantas fitorremediadoras y su capacidad para absorber y depurar el ion de Mercurio, lo cual contribuye a la recuperación de cuerpos de agua y suelos contaminados donde son sometidos a impactos negativos por acciones extractivistas, en este caso la explotación aurífera y la utilización de mercurio. Es por esto, que se enfoca en la importancia de la fitorremediación para recuperación de cuerpos de agua y suelos por medios naturales.

La economía del país depende en gran medida de las exportaciones de oro, carbón, hidrocarburos, productos agrícolas y agropecuarios, entre otros. Según un artículo de la agencia nacional de minería

y la revista semana, en el primer trimestre de 2021, Colombia exportó 1.501 millones de dólares en oro; aunque esto representa un aumento del 8% en comparación con el año anterior, también ha llevado a un aumento en la contaminación del agua y del suelo debido a la explotación de oro utilizando mercurio (Semana, 2021; Zapata, 2021). En 2018, el gobierno colombiano prohibió el uso de mercurio en la extracción y procesamiento de oro, de acuerdo con la Ley 1658 de 2013, y se estableció un plazo de 5 años para eliminar el uso de productos químicos peligrosos en la minería y legalizar alternativas más seguras (Zapata, 2021). Sin embargo, hasta la fecha, no se ha producido ese cambio y el mercurio sigue siendo ampliamente utilizado en la extracción de oro. Además, las áreas abandonadas por la minería aún están contaminadas con este metal, convirtiéndolas en zonas peligrosas para la vida debido a su alta toxicidad. Actualmente, hay 21 departamentos gravemente afectados por esta situación. En los últimos 5 años se han registrado dos mil casos de intoxicación grave, sin mencionar los nuevos casos que se presentan diariamente en personas que trabajan en la minería y se exponen a los metales tóxicos (Morante, 2017).

En consecuencia, la extracción de oro resulta en extensas áreas de tierra que no se pueden utilizar para la agricultura, ganadería o asentamientos humanos. Por lo tanto, es fundamental encontrar y utilizar métodos que ayuden a descontaminar las zonas afectadas por mercurio, con el objetivo de restaurar su funcionalidad ecológica y biológica, como también su utilidad, contribuyendo al desarrollo de las regiones afectadas. En este contexto, la fitorremediación surge como una alternativa viable, ya que implica estudiar las plantas y su capacidad para absorber metales pesados, como el mercurio, a través de su estructura. Algunas especies no solo acumulan estos metales, sino que también los transforman y los devuelven al ambiente de manera segura. (Jaramillo y Zapata, 2015)

Este trabajo tiene como propósito investigar las diversas especies de plantas que actúan como

agentes fitorremediadoras para recuperar tierras que han sido expuestas o utilizadas como vertederos en la explotación minera, las cuales aún se encuentran contaminadas.

Situación del Problema

El mercurio es un elemento presente de forma natural en los ecosistemas y es inherente debido a los diferentes estratos rocosos que por su composición fisicoquímica lleva a la formación del ion de mercurio que pertenece y se encuentra en la corteza terrestre. Por lo general al combinarse con el carbón (u otros minerales), los microorganismos toman el mercurio produciendo compuestos orgánicos como el metilmercurio el cual se encuentra en mayor medida en el medio ambiente. Este se encuentra contenido de manera segura en la corteza donde no representa un riesgo.(Ramírez, 2008) No obstante, debido a las actividades humanas en relación a la extracción de oro, grandes cantidades de mercurio son liberadas del subsuelo, contaminando el agua y el lugar donde se ha expuesto, llegando a los afluentes desde cada cuenca hidrográfica donde la minería ilegal y extracción acuífera es desmedida, lo cual, genera una mala disposición del Hg, quedando libre para desplazarse sin control durante períodos extensos hasta llegar al océano, lo que constituye una preocupación por la acumulación excesiva del ion en estas aguas que son tomadas por los organismos acuáticos, como peces, crustáceos y moluscos; es por esto, que la Organización Panamericana de la Salud, ha ideado políticas para la eliminación del mercurio en la minería e industria. (Cano, 2012) Ahora bien, la normal dirección de la cadena trófica plantea una amenaza para la salud humana, dado que el pescado, una de las principales fuentes de proteínas a nivel mundial, alcanza aproximadamente 170 millones de toneladas métricas consumidas anualmente. (FAO, 2020) Por lo cual el incremento poblacional obliga a aumentar la intensidad en la pesca, llevando peces para el consumo con altos niveles de Hg en su interior, desde 0.5 a 1.5 ppm, por

ejemplo: el robalo contiene 0.73 ppm, el Tiburón contiene 0.97 ppm y el Blanquillo 1.4 ppm. El ser humano establece límites de toxicidad en el organismo entre 0.05 a 0.1 mg/día. (UNEP, 2013)

El problema radica en su exposición y en su toxicidad severa, ya que afecta a las especies que entran en contacto con esta sustancia y, posteriormente, puede transmitirse a través de redes tróficas más complejas o mediante el contacto directo con los seres humanos. (Carvajalino, 2021). Una de las mayores preocupaciones que tiene en el foco la Organización Mundial de la Salud, es la bioacumulación en tejidos animales y vegetales, lo cual hace que la sustancia sea mortal después de su contacto. El ser humano posee un contenido entre 1 y 13 miligramos en su sistema en forma de metilmercurio, el cual es necesario para el desarrollo normal de sus funciones: musculares, sanguíneas y cerebrales; si bien aún no se comprende completamente las funciones exactas y la importancia de las cantidades que el mercurio hace en algunas funciones biológicas, este en cantidades muy pequeñas puede participar en algunas funciones, como, por ejemplo, en procesos metabólicos y enzimáticos. Sin embargo, sobrepasar estos niveles, lleva a que el cuerpo padezca problemas digestivos, neurológicos severos, renales y síndromes oftalmológicos. (Ramírez, 2008). Estas consecuencias de salud son crónicas y se incrementan a través del tiempo, como también el deterioro de los órganos y salud mental y cognitiva. El ion es toxico para el funcionamiento del sistema nervioso, daños a nivel cerebral y problemas con el control de funciones motoras, también la OMS señala el deterioro cardiovascular, intestinal y lesiones renales, lo que conlleva la vida del paciente dolorosa y tortuosa. A nivel de mujeres en embarazo, se presenta la deformación del feto, la mayoría de concentración de mercurio va directamente al cerebro, lo que deteriora esta zona causando daños cognitivos, cerebral he inhibido las funciones motoras. (Ramírez, 2008) De igual manera, la contaminación por mercurio del suelo deteriora la microbiología del suelo, alterando los minerales y las propiedades químicas dejando improductiva la tierra. (Sepúlveda, 2021). Es

necesario conocer las afectaciones de algunas comunidades donde la actividad económica principal es la extracción aurífera, por ejemplo: en puerto Inírida, Guanía, hay una población que vive de la extracción del oro, solo el 4,6% de los habitantes estaban por debajo de los límites máximos permisibles de metales pesados para el consumo humano según la Resolución 122 de 2012 , otro ejemplo serio en el municipio de San Marcos en el departamento de Sucre, donde el 95 % de la población excedió los límites del ion de mercurio en el sistema. (Pinzón, 2018). De lo anterior, surge la necesidad de encontrar la forma de manera biológica y en equilibrio con los servicios ecosistémicos el manejo de esta problemática, como lo es la fitorremediación y lo relacionado a actividades biorremediadores.

Formulación del Problema

¿De qué manera la fitorremediación podría mitigar la contaminación por altas concentraciones de mercurio en el territorio nacional debido a la explotación aurífera minera desorganizada e ilegal, la cual ha generado un desequilibrio en todo el ecosistema ?

Según un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la European Enviroment Agency, los niveles de mercurio en todo el mundo han aumentado considerablemente desde el comienzo de la Revolución Industrial en unos cientos de miles de toneladas del ion del metal pesado. Los muestreos dan como resultado un aumento del 500% en los océanos, muy superior a niveles normales o naturales. (EEA, 2020) Lo alarmante es que se han encontrado pequeñas cantidades de este elemento en alimentos y en el cuerpo humano, especialmente en áreas cercanas a actividades mineras. Estas actividades mineras tienen un impacto significativo tanto en la especie humana como en la vida silvestre, tanto acuática como terrestre. (Sepúlveda, & Casallas, 2018)

La explotación ilegal de oro ha causado una grave contaminación de los suelos por la exposición al mercurio, lo que resulta en intoxicación y mutaciones tanto en seres humanos como en otras especies a través de la cadena alimentaria. (Rodríguez et al., 2021) Las personas más afectadas son aquellas que acceden a estas tierras y entran en contacto con residuos del ion de Mercurio en las zonas de extracción, el aire y el agua, los cuales poseen altos niveles de contaminación, lo que provoca el abandono de estos lugares. (Rodríguez et al., 2021) A nivel social, genera problemáticas que establece dinámicas de desplazamientos, violencia, brotes de calamidad pública en temas de salud y orden público. Actualmente, en Colombia, se encuentran 21 departamentos enfrentando esta situación, que está alcanzando niveles cada vez más críticos y se encuentra fuera de control, siendo los principales afectados Antioquia, Caldas, Córdoba y Chocó. (Pinzón, 2018) Por lo anterior, el trabajo se direcciona a generar una revisión bibliográfica de manera descriptiva, sobre la posible implementación de la fitorremediación en el territorio nacional, utilizando plantas de preferencia nativa, que demuestren un alto rendimiento en la bioeliminación del mercurio iónico, ya que este contaminante no puede degradarse por sí solo. La fitorremediación ofrece un enfoque sostenible y natural, permitiendo que las plantas almacenen, eliminen, metabolicen o volatilicen el mercurio presente en el suelo, con el fin de restaurar la utilidad de estas tierras y ayudar al crecimiento económico de la zona. (Sepúlveda, & Casallas, 2018)

Pregunta Problema

¿Qué plantas son adecuadas para llevar a cabo la fitorremediación y controlar la absorción de mercurio en suelos contaminados por la minería subterránea en el territorio nacional colombiano?

Justificación

Como se ha explicado anteriormente la problemática que existe con el uso indebido del mercurio en la minería ilegal y artesanal para la extracción de oro, la cual es una práctica que abarca el 40% de los municipios de Colombia (Morante, 2017). Es necesario entonces, encontrar soluciones que mitiguen estos impactos negativos que dejan sobre los servicios ecosistémicos, los grupos y propietarios de tierras las cuales no cumplen con la debida legalización minera otorgada por la Agencia Nacional de Minería (ANM, 2022), lo que resulta en impactos negativos significativos en el suelo, agua, aire y en todos los aspectos sociales y económicos de la región (Carvajalino, 2021).

Es por eso, por lo que organismos internacionales buscan, por ejemplo, a través del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la formulación de proyectos que contrarresten los efectos nocivos de la utilización de mercurio y su disposición inadecuada que afecta los servicios ecosistémicos, por consiguiente, se ha alertado sobre la necesidad de reducir el uso de mercurio en la extracción de oro a nivel internacional. Lo anterior, ha creado políticas de eliminación de la utilización del Ion de Hg. (PNUMA, 2021). En Colombia, se firmó el Tratado de Minamata el 26 de agosto de 2019, que busca eliminar por completo el uso de mercurio, ya que este elemento causa diversos impactos negativos y con persistencia en la acumulación en el ambiente donde se deposite, afectando los servicios ecosistémicos, las especies de fauna y flora, así como la salud humana. (PNUMA, 2021).

La fitorremediación, un proceso que utiliza plantas para eliminar o inactivar contaminantes en suelos, agua y aire mediante la absorción y metabolización de estos, es una técnica no invasiva y sostenible que ofrece beneficios ambientales significativos, mejorando así la calidad del medio ambiente. Esta técnica, es una clase de biorremediación, que busca la eliminación de contaminantes

y la absorción de gases nocivos para la atmósfera mediante nuevos avances tecnológicos e investigaciones en el medio natural. (Rodríguez, 2008). Consecuentemente estas características incursionan en aspectos biotecnológicos donde la utilización de la misma naturaleza resuelve problemáticas actuales existentes que deja impactos negativos del ion de mercurio. Estas características especiales se encuentran en las plantas, y la investigación de estas últimas décadas han permitido comprender su capacidad de absorción de sustancias y su mismo manejo en su interior a nivel celular, lo cual ha otorgado su utilización para el mejoramiento de los suelos, agua y aire. Ahora se conocen las características especiales de cada especie y su posible aplicación al poder sintetizar, absorber, almacenar, remover y volatilizar el mercurio en sus raíces, tallos y hojas. (Jaramillo, 2015) Este avance biotecnológico se denomina fitorremediación lo que abarca una estrategia esencial y económica para abordar la contaminación de mercurio en suelos, agua y aire. (Alba, 2022) Por lo tanto, realizar un estudio bibliográfico de los estudios de fitorremediación a nivel nacional, representa un componente esencial en la búsqueda de soluciones efectivas y sostenibles para mitigar los impactos ambientales generados por la minería, con el fin de conocer el rendimiento que se ha tenido en la implementación de la técnica de fitorremediación para descontaminación de suelos y cuerpos de agua. El estudio bibliográfico no solo consolida el conocimiento científico existente en esta área, sino que también identifica las especies vegetales más prometedoras para la absorción y eliminación del mercurio del suelo, además de evaluar los factores ambientales y tecnológicos que influyen en su éxito. En última instancia, este aporte nutre la base de conocimiento necesaria para implementar enfoques prácticos y efectivos que mitiguen los impactos negativos de la minería de mercurio en los suelos colombianos, promoviendo la restauración ambiental y la preservación de los ecosistemas para las generaciones. (Sepúlveda, 2018)

En Colombia, se ha observado un aumento en el interés del desarrollo de tecnologías biológicas alternativas para el tratamiento de sedimentos contaminados con hidrocarburos, como el petróleo, en áreas afectadas por derrames o fugas de oleoductos. Estas tecnologías incluyen la fitorremediación y la biorremediación, que han demostrado eficiencias significativas en la limpieza de los sedimentos contaminados. (Jaramillo, 2015) Sin embargo, la cantidad de estudios realizados hasta ahora sobre la implementación de tecnologías biológicas alternativas para el tratamiento de sedimentos contaminados por la minería de oro es limitada y se han centrado principalmente en abordar problemas en un solo sector. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo más investigaciones direccionadas a encontrar alternativas de tratamiento que sean económicas, eficientes y sencillas, como la fitorremediación.

Objetivos

Objetivo Principal

- Realizar una revisión bibliográfica descriptiva sobre la aplicación de la fitorremediación como

una estrategia eficaz para la recuperación de cuerpos de agua y suelos contaminados con mercurio debido a la actividad minera en el territorio nacional colombiano, con el fin de proporcionar una comprensión integral de los métodos, avances, y desafíos en este campo.

Objetivo Específicos

- Identificar las especies vegetales con capacidad de absorción, acumulación, metabolización, volatilización y/o estabilización eficiente de mercurio en cuerpos de agua y suelos contaminados por vertimientos en la minería en Colombia, con el fin de utilizarlas en la fitorremediación para la recuperación de dichos suelos.
- Investigar y analizar los mecanismos mediante los cuales las plantas degradan el mercurio, incluyendo las características morfológicas, fisiológicas y físicas de las especies vegetales elegidas en relación con su capacidad de adaptación a las condiciones presentes en los cuerpos de agua y suelos contaminados por mercurio.
- Evaluar el impacto de la fitorremediación en la recuperación de cuerpos de agua y de suelos contaminados por mercurio en Colombia, considerando parámetros como la concentración de mercurio, la biodiversidad de poblaciones la calidad del suelo y agua, con el propósito de validar su efectividad y sustentabilidad.

Marco Referencial

La historia de la minería en Colombia tiene profundas raíces que se remontan a períodos anteriores a la colonización española. Las diferentes culturas precolombinas que habitaban el territorio

colombiano no solo explotaban oro y piedras preciosas para la orfebrería y actividades rituales, sino también minerales como carbón, arcilla y sal, que eran esenciales para el desarrollo de centros urbanos y constituían elementos importantes de la economía precolombina. (Minambiente, 2018)

Durante la Colonia, la minería de oro en Antioquia y el Chocó experimentó un crecimiento importante, con la ayuda de mano de obra esclava. Esto marcó momentos históricos de la región antioqueña como centro de extracción y acopio de oro. Además, la minería de oro desempeñó un papel crucial en la financiación de los ejércitos libertadores durante la época de la Independencia. A lo largo de la República, la producción de oro y piedras preciosas se consolidó como un sector económico de gran importancia, superando a otros sectores básicos como la agricultura. (Minambiente, 2018)

En la actualidad, la minería de diferentes productos como oro, platino, níquel, entre otros tiene dos modalidades de extracción, la primera es formal y a gran escala, es decir, de una manera más responsable y legal; mientras que la segunda es tradicional y artesanal, es decir de manera informal e ilegal en algunos casos, lo que la hace insegura y ambientalmente insostenible. La minería de oro en Colombia ya sea legal o ilegal, ha estado históricamente vinculada al uso de mercurio, pero existen diferencias significativas en su aplicación y regulación. En la minería legal, los mineros deben obtener concesiones y permisos gubernamentales, y a pesar de que se permite el uso de mercurio, está sujeto a regulaciones estrictas que buscan reducir su impacto ambiental. (Pérez et al., 2012) Las operaciones legales se someten a monitoreo y control ambiental para minimizar la contaminación de ríos y suelos. En contraste, la minería ilegal se lleva a cabo al margen de la ley, sin concesiones válidas ni regulaciones, lo que resulta en un uso indiscriminado e inadecuado de mercurio, causando graves problemas ambientales y de salud. Estas operaciones ilegales a menudo ocurren en áreas ecológicamente sensibles, como reservas naturales, exacerbando la deforestación,

la contaminación de ríos y la degradación del suelo, y también están asociadas con problemas sociales como la explotación laboral y el conflicto armado. (Pérez et al., 2012)

Además, es relevante subrayar que la industria minera y energética ha tenido un impacto considerable en la economía del país, ya que representa aproximadamente el 7% del Producto Interno Bruto nacional. Esta industria también contribuye significativamente a la inversión extranjera, aportando alrededor del 33%, y es responsable del 56% de las exportaciones del país. Además, genera más de medio millón de empleos formales. En 2021, este sector también generó alrededor de 8.8 billones de pesos en concepto de regalías, de los cuales el 26% provino de la minería y el 74% de los hidrocarburos. (Mora, 2023) En la actualidad Colombia cuenta con cerca de 9.602 títulos mineros vigentes, clasificados en tres grupos: pequeños, que tienen 150 o menos hectáreas de uso; medianos que tienen más de 150 hectáreas hasta 5.000; y la minería grande, que tiene más de 5.000 hectáreas hasta 10.000. (Ministerio de Minas y Energía, 2016) La Agencia Nacional de Minería (ANM) informó que la mayoría de los títulos mineros, específicamente el 68% de ellos (6,517 títulos), pertenecen a personas individuales, mientras que el 32% restante (3,085 títulos) está en manos de entidades con personalidad jurídica. (Agencia Nacional de Minería, 2023) La minería ilegal en Colombia se presenta con mayor frecuencia en las zonas de la Amazonía y la región del Pacífico, donde se realizan extracciones no autorizadas de minerales como oro, platino y coltán. Además, la participación de grupos armados ilegales en estas actividades ilegales añade una capa adicional de complejidad y gravedad a esta situación. (Mora, 2023) De acuerdo con organismos internacionales como la Organización Internacional del Trabajo (OIT), se estima que alrededor de 200,000 mineros están operando en Colombia de manera ilegal en la actualidad. (Tarazona, 2023) Esta actividad ilegal se concentra principalmente en tres regiones específicas del país: Antioquia, Bolívar y Chocó, donde se centra en la extracción de minerales como carbón y oro.

(Mora, 2023)

En la figura 1, se puede observar el mapa proporcionado por el Diario La República donde se señalan los municipios que experimentan daños tanto en el ámbito ambiental como en el social debido a la minería ilegal. Como muestra la Figura, alrededor de un tercio de estos municipios están afectados por la minería ilegal. (Mora, 2023)

Figura 1. Mapa de la minería ilegal en el territorio nacional



Nota: Adaptado de “*Mapa de la Minería ilegal en el país*”, de *La República*, 2015, <https://www.larepublica.co/economia/la-mineria-ilegal-afecta-a-307-municipios-del-pais-2311591>

Colombia cuenta con una diversidad geológica considerable, con presencia de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que alberga depósitos de oro. Las regiones montañosas, como la

Cordillera de los Andes y la Serranía del Perijá, son particularmente propicias para la presencia de vetas de oro debido a procesos geológicos que han concentrado minerales en estas áreas. La hidrología también desempeña un papel crucial en la minería de oro. La disponibilidad de agua para la extracción y el procesamiento del mineral es fundamental. (Mora, 2023) Muchas operaciones mineras requieren grandes cantidades de agua para la separación del oro de otros minerales y materiales. Por lo tanto, las zonas con fuentes de agua cercanas y abundantes son preferidas para el desarrollo de la minería acuífera. Además, Colombia cuenta con áreas de relieve montañoso que pueden presentar desafíos logísticos para la extracción, pero también pueden contener depósitos de oro en áreas aluviales y en las laderas de las montañas. La topografía también puede influir en la erosión del suelo y la sedimentación de los ríos, lo que puede tener impactos ambientales significativos. (Mora, 2023)

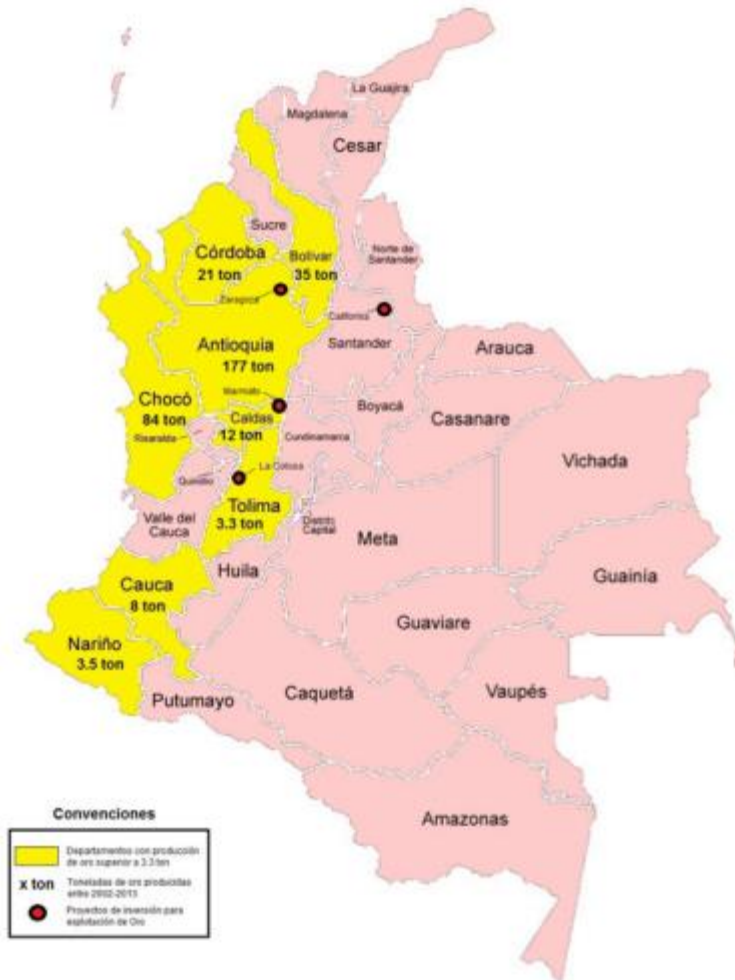
La actividad minera puede proporcionar trabajo a un gran número de personas en áreas donde las oportunidades laborales son limitadas. El empleo en la minería impulsa a la economía regional a través de la demanda de bienes y servicios. Las empresas mineras necesitan equipos, suministros y servicios diversos, lo que puede beneficiar a otros sectores económicos, como el comercio, la construcción y el transporte, en las zonas mineras. (Mora, 2023) La minería de oro puede generar grandes ganancias para las empresas mineras y para los propietarios de los terrenos donde se encuentran los depósitos, pero estas ganancias no siempre se distribuyen de manera equitativa entre la población local. (Mora, 2023)

Es importante reconocer que la minería de oro en Colombia tiene una larga historia que se remonta a épocas precolombinas. Muchas comunidades indígenas y afrodescendientes han estado involucradas en la minería artesanal y tradicional durante generaciones, y esta actividad forma parte integral de su identidad cultural y de sus medios de vida. La minería de oro también ha dado lugar

a la formación de comunidades y culturas mineras únicas en Colombia. En algunas zonas, la minería ha sido el principal motor de desarrollo económico y social. (Mora, 2023)

En la figura 2 se puede observar el mapa de extracción de oro en el territorio nacional por municipios, allí se puede evidenciar que los municipios que extraen más de 3.3. Ton de oro son Nariño, Cauca, Tolima, Caldas, Chocó, Antioquia, Córdoba, y Bolívar; en esta extracción se utiliza el mercurio como metal pesado de la siguiente forma, el mineral que contiene oro se tritura en pequeñas partículas, a menudo en molinos de bolas, para aumentar la exposición del oro; luego el mineral triturado se mezcla con mercurio líquido. El mercurio se combina con el oro presente en el mineral, formando una amalgama de oro-mercurio. Esta amalgama es líquida y puede separarse fácilmente de otros minerales. La amalgama resultante se separa del material no deseado, generalmente mediante procesos de lavado o mediante la fuerza centrífuga en centrifugadoras. La amalgama se recolecta y se somete a procesos de destilación para eliminar el mercurio. Después de la destilación, se recupera el oro a partir de la amalgama, dejando el mercurio como residuo. Este proceso puede realizarse mediante la evaporación del mercurio o utilizando técnicas de calor. (Casallas y Martínez, 2015)

Figura 2. Mapa de la minería de oro en el territorio nacional



Nota: Adaptado de “*Principales departamentos productores de oro en Colombia*”, de Casallas M. & Martínez J., 2015, https://www.researchgate.net/figure/Principales-departamentos-productores-de-oro-en-Colombia-1_fig1_325651096

1. Marco normativo a nivel Nacional

Considerando los análisis legislativos previamente mencionados, en esta sección se persigue la integración y especificación de la normativa definitiva aplicable en situaciones de contaminación del agua, centrándose especialmente en las Estaciones de Servicio (EDS) de combustibles, con el propósito de abarcar todos los aspectos mencionados. La revisión legislativa se llevó a cabo mediante búsquedas en plataformas generales como Google Chrome, priorizando fuentes confiables como las páginas de Entidades Públicas, incluyendo el Ministerio de Minas y Energía y el

Ministerio del Medio Ambiente. Estas fuentes nos conducen a la conclusión de que la normativa esencial y obligatoria para considerar en los procesos de uso, tratamiento y rehabilitación del agua se detalla a continuación. (Chitiva, 2021)

- La normativa principal en Colombia relacionada con la contaminación del agua incluye la Ley 99 de 1993, que establece el régimen de gestión ambiental. Además, la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece los estándares de calidad del agua.
- La minería de oro en Colombia está regulada por la Ley 685 de 2001 (Código de Minas) y la Ley 1382 de 2010. Estas leyes establecen normas para la exploración, explotación y beneficio de minerales, incluido el oro.
- Para abordar la contaminación por mercurio en la minería, la Resolución 1443 de 2014 del Ministerio de Trabajo establece requisitos de seguridad y salud ocupacional en la minería, incluyendo medidas para prevenir la exposición al mercurio.
- La normativa específica sobre los máximos permisibles de contaminación por mercurio en aguas residuales puede encontrarse en la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Esta resolución establece estándares de calidad del agua, incluyendo límites para diversos contaminantes, como el mercurio.

Marco Teórico

Con el objetivo de promover la construcción de un desarrollo sostenible en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se busca abordar varios aspectos clave. En primer lugar, el ODS 3: Salud y Bienestar, que busca eliminar el uso de mercurio como una fuente tóxica y perjudicial para la salud humana. Asimismo, el ODS 6: Agua Limpia y Saneamiento, tiene como objetivo la descontaminación de cuerpos de agua y aguas residuales afectadas por trazas de mercurio. La fitorremediación se relaciona con el ODS 14: Vida Submarina, ya que esta metodología biotecnológica contribuye a la preservación de los ecosistemas acuáticos al eliminar el mercurio del agua y suelos, evitando la transferencia de este metal a través de la cadena alimentaria desde los peces hacia los seres humanos y otros animales. Además, se puede vincular con el ODS 15: Vida de Ecosistemas Terrestres, ya que el presente documento recopila información sobre las plantas más eficientes en la absorción y metabolización del mercurio en el suelo, permitiendo la recuperación de los suelos degradados y la restauración de su productividad mediante la reintegración de microorganismos beneficiosos (United Nations, 2021).

En la búsqueda de soluciones para minimizar los problemas ambientales, particularmente la recuperación de suelos expuestos al mercurio debido a la explotación minera de oro, la fitorremediación se presenta como una herramienta relevante en consonancia con los objetivos de las organizaciones internacionales, como las Naciones Unidas. Es crucial maximizar la eficiencia en el aprovechamiento de los beneficios proporcionados por los ecosistemas, ya que su sobreexplotación acelerada está generando problemas ecológicos irreversibles y una alarmante degradación de la biodiversidad. La destrucción y disminución de áreas ecosistémicas vitales para la supervivencia tanto humana como de otras especies en nuestro planeta es una preocupación central. En este sentido, es crucial promover la adopción de enfoques y tecnologías, como la

fitorremediación, que permitan la recuperación de los suelos contaminados por mercurio y contribuyan a la conservación de los ecosistemas. Estas acciones son necesarias para salvaguardar la sostenibilidad ambiental y asegurar un futuro viable para las generaciones presentes y futuras. (United Nations, 2021)

1. Minería de Oro

Dentro del contexto de la explotación aurífera, el mercurio (Hg) es considerado un metal pesado de alta toxicidad, clasificado como clase I. En este proceso, el mercurio se utiliza debido a su capacidad de formar aleaciones con otros metales, lo que facilita la extracción del oro de la roca. Esta técnica implica la formación de una amalgama, donde el mercurio se combina con el metal precioso. (Sepúlveda & Casallas, 2018) Posteriormente, mediante altas temperaturas, se separa el oro de la amalgama, ya sea evaporando el mercurio o mediante procesos de condensación en casos de explotación industrializada. Sin embargo, estos procedimientos no funcionan de manera óptima, y es durante el momento de separar la amalgama cuando se produce la liberación de mercurio al medio ambiente en forma líquida o gaseosa. En la mayoría de los casos, este mercurio liberado contamina los afluentes que se encuentran cercanos a los vertimientos del proceso, generando una alta presencia de toxicidad en estos recursos hídricos. (Sepúlveda & Casallas, 2018) Esta problemática representa una amenaza para el medio ambiente y la salud pública, ya que el mercurio liberado puede bioacumularse en los organismos y afectar negativamente a los ecosistemas acuáticos y a las especies que dependen de ellos, incluyendo a los seres humanos. Es imperativo abordar esta situación mediante la implementación de medidas y tecnologías adecuadas que minimicen la liberación de mercurio durante la extracción aurífera, así como promover prácticas de gestión y disposición seguras de este metal pesado. De esta manera, se busca proteger los recursos naturales y garantizar la preservación de los ecosistemas afectados por la explotación aurífera.

(Sepúlveda & Casallas, 2018)

2. Mercurio

El mercurio es un elemento químico cuyas propiedades varían dependiendo de su estado, peso específico, número de electrones y dosis-respuesta específicas que se observan en animales, seres humanos y flora. Con un peso atómico de 200.59 y número atómico 80, el mercurio se evapora a 357°C y tiene una densidad de 13.456 g/ml. Es soluble solo en medios oxidantes y su forma elemental, Hg, tiene una oxidación de 0, lo que la hace menos tóxica. Además, puede encontrarse como el ion mercurio Hg^{2+} y el ion mercurioso $(\text{Hg-Hg})^{2+}$ (Durango, 2009).

Es importante destacar la existencia del enlace carbono-mercurio (Hg-C), que no es fuerte, mientras que el enlace mercurio-oxígeno (Hg-O) establece una conexión más equilibrada. Según un estudio realizado por Ferguson, esta propiedad organometálica del mercurio con carbono y oxígeno demuestra una mayor estabilidad y su persistencia en el ambiente y los ecosistemas, lo que afecta los servicios ecosistémicos (Ferguson, 1990).

La presencia de mercurio en el planeta Tierra puede atribuirse a dos condiciones. En primer lugar, se libera de forma natural a la atmósfera o se mezcla con el agua y el suelo a través de procesos como la erosión eólica, la erosión geológica y las erupciones volcánicas de origen geotérmico. En segundo lugar, los seres humanos están expuestos al mercurio debido a acciones realizadas por ellos mismos, tales como la quema de carbón, la quema de combustibles fósiles, la producción de baterías, la industria de los pesticidas, el uso de fertilizantes y, especialmente, la extracción de oro y la minería del mercurio (Durango, 2009).

El desarrollo industrial y el crecimiento demográfico acelerado han llevado al ser humano a una sobreexplotación de los recursos y a una maximización de la producción agrícola para satisfacer la demanda creciente. Estas actividades han contribuido a la liberación y acumulación de mercurio en

el medio ambiente, generando impactos negativos en la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas (Durango, 2009).

3. Toxicidad

En la actualidad, se ha confirmado científicamente que todas las formas de mercurio son tóxicas y pueden ser letales para los seres humanos y otras especies en caso de un contacto con altas dosis y concentraciones. Lo preocupante es que el mercurio posee una característica particular que lo vuelve extremadamente peligroso: su capacidad de bioacumulación y su degradación natural prolongada en el tiempo. Esto significa que, una vez liberado en el medio ambiente, tiende a acumularse en los organismos vivos y persistir durante largos períodos (Brodkin, 2007).

La exposición al mercurio y sus efectos en la salud humana se produce a través de diversas vías, como el consumo de alimentos contaminados a través de la cadena alimentaria, el uso de agua contaminada, la inhalación de trazas de mercurio en el aire y el contacto directo con el ion de mercurio, especialmente en actividades mineras ilegales de extracción de oro. Sin embargo, una de las principales fuentes de exposición es la ingesta de alimentos, como el pescado, que puede contener altas concentraciones de mercurio debido a la contaminación de las aguas por las prácticas mineras no reguladas. Estas aguas residuales, que no son tratadas adecuadamente, contaminan gravemente los cuerpos de agua donde los pescadores obtienen su captura, afectando tanto la salud de las personas como la economía local (Domínguez, 2016). Es importante destacar el impacto ambiental que esto conlleva, tanto aguas abajo como en todo el territorio nacional. Estas trazas de mercurio se acumulan en el cuerpo humano, lo que puede provocar graves trastornos de salud, incluyendo daños en la barrera hematoencefálica que afectan el sistema nervioso y problemas en el desarrollo fetal, como teratogenicidad y cáncer (Brodkin, 2007).

Según las investigaciones realizadas, se ha determinado que el mercurio presente en el suelo se

encuentra en formas Hg^{+2} y Hg^0 . La transformación del mercurio de Hg^{+2} a Hg^0 ocurre de manera natural en condiciones normales, a través de procesos bacterianos y abióticos, como la exposición a la luz solar. Sin embargo, debido a la sobreexposición actual del suelo a la contaminación por mercurio en áreas mineras, se plantea un problema en cuanto a la retención del mercurio en el suelo. Con el paso del tiempo, las formas menos volátiles del mercurio experimentan transformaciones en moléculas orgánicas, lo que resulta en concentraciones de toxicidad más altas. Durante la amalgamación, un proceso utilizado en la oxidación de la pirita, se generan residuos que producen ácidos capaces de alterar el pH de los cuerpos de agua y del suelo, reduciéndolo a valores de 2.5 a 3. Esta situación permite la bioacumulación de otros metales y deteriora diversos minerales presentes en el suelo. Como consecuencia, estos cambios en los parámetros ambientales afectan negativamente los nutrientes, los micronutrientes, las bacterias y los componentes microbianos del suelo, lo que resulta en un impacto negativo para el medio ambiente y la reducción de la capacidad de los suelos para producir económicamente debido a la disminución de la productividad (López, 2011).

4. Biorremediación

Biorremediación se refiere a usar seres vivos como bacterias, hongos o plantas, junto con sustancias derivadas de ellos, para restaurar un ambiente contaminado a su estado natural, aprovechando los procesos naturales de descomposición de sustancias tóxicas. Por ejemplo, se puede agregar nutrientes para acelerar la descomposición de hidrocarburos en el suelo. Es una forma respetuosa con el medio ambiente y efectiva de limpiar áreas afectadas por la contaminación. (Ercolli y Gálvez, 2001). Para que este proceso sea efectivo, se requieren condiciones específicas, como temperatura adecuada, nutrientes y oxígeno. Se pueden agregar microorganismos mediante bioaumentación y mejorar las condiciones mediante la adición de aditivos como melaza, aceite vegetal o aire. Sin

embargo, en algunos casos, las condiciones no son óptimas para la biorremediación in situ, por lo que se pueden excavar los suelos para tratarlos en la superficie. El agua subterránea también puede ser tratada in situ o ex situ, utilizando biorreactores para mezclarla con microorganismos y aditivos antes de ser devuelta al medio ambiente. (Ercolli y Gálvez, 2001).

La biorremediación implica usar reacciones químicas donde se reducen y oxidan contaminantes no deseados. Hay dos tipos principales: aeróbica y anaeróbica. La aeróbica ocurre con oxígeno presente y se usa para degradar contaminantes orgánicos como hidrocarburos. Aquí, microorganismos utilizan los contaminantes para energía, convirtiéndolos en dióxido de carbono y agua. Este proceso es especialmente efectivo en suelos contaminados con compuestos orgánicos, ya que proporciona una fuente de energía para los microorganismos. En cambio, la biorremediación anaeróbica sucede sin oxígeno y se emplea para degradar contaminantes orgánicos e inorgánicos, como metales pesados. Este tipo de biorremediación es útil para tratar contaminantes orgánicos e inorgánicos, como metales pesados, en suelos o aguas subterráneas donde el oxígeno está limitado o ausente. (Aparicio, 2023)

4. Fitorremediación

La fitorremediación es un tipo de biorremediación que busca mejorar la calidad del agua y del suelo al eliminar contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos, metales radioactivos y/o compuestos generados por el petróleo, especialmente metales pesados. Se basa en el uso de plantas que tienen la capacidad de absorber y descomponer estos contaminantes, contribuyendo así a la descontaminación del medio ambiente. (Delgadillo et al., 2011) Esta técnica se basa en el uso de plantas o especies vegetales que, dentro de su metabolismo, presentan características especiales, como la capacidad de tolerar, absorber y volatilizar altas concentraciones de sustancias xenobióticas, es decir, reducir los metales, plaguicidas, hidrocarburos y aguas residuales a formas

más simples y eliminar sus propiedades tóxicas. Además, estas plantas tienen la capacidad de almacenar los contaminantes, lo que facilita su remoción del suelo y del agua. La fitorremediación se ha convertido en una estrategia de investigación cada vez más relevante en la actualidad, especialmente debido a que su implementación no requiere el uso de productos químicos desinfectantes, adsorbentes, oxidantes entre otros, sino que se basa en técnicas de sostenibles que buscan la recuperación de los suelos y la revitalización de sus funciones y microorganismos. (Casallas, 2015, Pág. 22) Es una alternativa prometedora para abordar la contaminación y promover la restauración ambiental de manera más sostenible. La investigación en fitorremediación continúa avanzando con el objetivo de desarrollar métodos más eficientes y adaptados a diferentes tipos de contaminantes y condiciones ambientales. Esta técnica ofrece un enfoque natural y respetuoso con el medio ambiente para hacer frente a los problemas de contaminación química, contribuyendo a la conservación de los recursos naturales y a la construcción de un entorno más saludable y sostenible (Casallas, 2015, Pág. 22).

La fitorremediación es una herramienta de recuperación ecológica de suelos y recursos hídricos que ofrece numerosas ventajas. Una de ellas es su fácil incorporación e implementación *in situ*, lo que significa que no requiere costos de transporte ni adaptación de sistemas complejos. Todo el proceso se lleva a cabo en el campo, directamente en el lugar donde se necesita la descontaminación, lo que lo hace económico en comparación con otros tratamientos que implican procesos costosos y complicados. Además, la fitorremediación utiliza técnicas básicas de siembra y es ambientalmente sostenible, lo que la convierte en una opción favorable. Para lograr la descontaminación, se emplean varios procesos complementarios, como la fitoextracción, la fitoestabilización, la fotovolatilización, la rizofiltración y la fitodegradación. (López, 2011). Cada uno de estos procesos desempeña un papel específico en la eliminación de contaminantes y en la restauración del equilibrio ambiental.

La fitorremediación es una solución prometedora que combina la capacidad de las plantas para absorber y transformar los contaminantes con la simplicidad y la sostenibilidad ambiental. Su aplicación puede contribuir a la recuperación de áreas contaminadas, la mejora de la calidad del suelo y del agua, y la restauración de los ecosistemas afectados. Con una correcta planificación y gestión, la fitorremediación puede ser una herramienta eficaz y rentable para abordar los problemas de contaminación y promover la salud ambiental (López, 2011).

En la fitorremediación, los fenómenos físicos, como la absorción de agua y nutrientes a través de las raíces, influyen en la capacidad de las plantas para movilizar y acumular contaminantes, los procesos químicos, como la fitoextracción y la fitorremediación, contribuyen a la transformación y eliminación de contaminantes tóxicos. Los microorganismos que habitan en la rizosfera, la zona del suelo influenciada por las raíces, desempeñan un papel fundamental al liberar exudados ricos en compuestos orgánicos que pueden llegar a influir en la disponibilidad de nutrientes y la movilización de contaminantes. Los metabolitos resultantes de este proceso de descomposición son captados por las plantas en conjunto con diversas sustancias minerales. (Garbisu et al, 2007)

Los microorganismos que habitan en el suelo son importantes ya que intervienen en las funciones de los ciclos de los elementos de traza, además, son responsables de la movilización de metales y de su acumulación. En la rizosfera los microorganismos desempeñan funciones en relación con los procesos edáficos como la descomposición de materia orgánica y formación de humus, ciclos biogeoquímicos como en el ciclo del nitrógeno, del carbono, del fósforo y otros nutrientes, y la fertilidad de las plantas como en la simbiosis y fijación del nitrógeno, protección frente a patógenos, degradación de compuestos y producción de fitohormonas. (Nogales, 2005)

El microbiota presente en la zona rizosférica ofrece una opción económicamente viable para la

biorremediación de suelos. En particular, las bacterias que estimulan el crecimiento de las plantas, conocidas como Rizobacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (RPCV), micorrizas, hongos como *Trichoderma spp*, *Pleurotus ostreatus*, *Phanerochaete chrysosporium* y *Aspergillus niger*, como también algunos hongos del género *Trichoderma*, entre otros, estos establecen colonias en las raíces de las plantas y proporcionan beneficios significativos a los cultivos. (Umrana, 2006) Los mecanismos microbianos que mejoran el crecimiento de las plantas incluyen la promoción directa e indirecta. La promoción directa implica incrementar la disponibilidad y captación de nutrientes macro, como nitrógeno, fósforo, potasio calcio y magnesio, así como proporcionar sustancias que estimulan el crecimiento. La promoción indirecta se logra al suprimir microorganismos perjudiciales en la zona de las raíces. (Osti, 2004) Los microorganismos simbióticos en las raíces de plantas acumuladoras de metales desempeñan varias funciones clave. Estas incluyen aumentar la movilidad y disponibilidad de metales para las plantas mediante la producción de sideróforos, reducir el pH del suelo mediante ácidos orgánicos sintetizados, solubilizar fosfatos, generar sustancias que promueven el crecimiento de las plantas (fitohormonas) y desarrollar resistencia a metales pesados y antibióticos. (Uroz, 2009) A continuación, se describen los efectos intracelulares, físicos, biológicos y químicos de los mecanismos de la fitorremediación.

4.1. Efectos intracelulares

Dentro del proceso de la fitorremediación, los efectos intracelulares juegan un papel crucial en la eficacia y en la capacidad de las plantas para adaptarse y responder a los contaminantes. A continuación, se detallan los principales efectos intracelulares y su relevancia en la fitorremediación.

4.1.1. Acumulación en las vacuolas celulares

Uno de los efectos intracelulares más significativos en la fitorremediación es la acumulación de contaminantes en las vacuolas celulares. Las vacuolas son orgánulos celulares especializados responsables del almacenamiento de nutrientes, metabolitos y toxinas. En el contexto de la fitorremediación, las plantas tienen la capacidad de absorber contaminantes del suelo o el agua a través de las raíces y transportarlos hacia las vacuolas para su almacenamiento. Este proceso ayuda a reducir la toxicidad de los contaminantes dentro de las células vegetales al mantenerlos segregados de los componentes celulares vitales. Además, la acumulación en las vacuolas puede facilitar la posterior eliminación de los contaminantes a través de mecanismos de excreción o movilización en procesos de fitorremediación basados en la fitoextracción. (López et al., 2005)

4.1.2. Metabolismo y transformación.

Otro efecto intracelular clave en la fitorremediación es el metabolismo y la transformación de los contaminantes dentro de las células vegetales. Las plantas poseen una variedad de enzimas y rutas metabólicas que les permiten degradar, modificar o detoxificar los contaminantes absorbidos. Por ejemplo, algunas plantas pueden bioacumular metales pesados en formas menos tóxicas a través de procesos de quelación o precipitación. Del mismo modo, los contaminantes orgánicos pueden ser metabolizados por enzimas específicas en la planta, convirtiéndolos en productos menos nocivos o volátiles que pueden ser liberados al medio ambiente o excretados por la planta. (López et al., 2005)

4.2. Efectos extracelulares

Los efectos extracelulares pueden influir significativamente en la capacidad de las plantas para absorber, transformar o inmovilizar contaminantes en el medio ambiente. A continuación, se detallan los principales efectos extracelulares y su importancia en la fitorremediación.

4.2.1. Adsorción y precipitación en las paredes celulares

Uno de los efectos extracelulares más importantes en la fitorremediación es la capacidad de las paredes celulares de las plantas para adsorber o precipitar contaminantes. Las paredes celulares están compuestas principalmente de celulosa y otros polisacáridos, y actúan como una barrera física que puede atrapar y retener contaminantes en su superficie. Esta adsorción puede ayudar a reducir la movilidad de los contaminantes en el suelo o el agua, lo que facilita su posterior degradación o inmovilización por microorganismos del suelo. (López et al., 2005)

4.2.2. Quelación y formación de complejos

Otro efecto extracelular relevante en la fitorremediación es la capacidad de las plantas para quelar o formar complejos con ciertos contaminantes. Algunas plantas poseen compuestos orgánicos específicos, como ácidos orgánicos y fitoquelatinas, que tienen la capacidad de unirse a metales pesados y otros contaminantes, formando complejos solubles o insolubles. Esta quelación reduce la disponibilidad de los contaminantes en el suelo o el agua, lo que limita su toxicidad y facilita su eliminación del medio ambiente.

4.3. Efectos Biológicos y Químicos

4.3.1. Fitoextracción

Es una de las características que poseen las plantas utilizadas en la fitorremediación tienen la habilidad de absorber metales pesados dañinos para el medio ambiente a través de sus raíces, y luego los acumulan en sus tallos y hojas. (Avílez, 2017) Este mecanismo tiene efectos biológicos y químicos; en cuanto a los efectos biológicos se relaciona con la capacidad que las plantas tienen para acumular, movilizar y transformar los contaminantes en sus tejidos. Los efectos químicos se producen debido a la interacción de las raíces de las plantas con los contaminantes del suelo o del agua. (Rosas y Rodríguez, 2008)

En México, se llevó a cabo un estudio para evaluar la implementación de la fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados por las actividades mineras y de metalurgia en la Comarca Lagunera, utilizando la especie de quelite (*Amaranthus hybridus* L.). En este proceso, se añadió una mezcla de micorrizas arbusculares, que incluía *Entrophospora columbiana*, *Glomus intraradices*, *G. etunicatum* y *G. clarum*. El estudio comprendió dos experimentos, uno para cada metal en cuestión, en suelos que presentaban una contaminación de $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de plomo y $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de cadmio. Se observó que la planta *A. hybridus*, por sí sola, era capaz de remediar los suelos contaminados con estos dos metales pesados a medida que la planta envejecía, acumulando dichos metales en su tallo y hojas. Además, se constató que la adición de las micorrizas arbusculares mejoraba la capacidad de la planta para extraer plomo de manera más eficiente. (Ortiz et al., 2009)

4.3.2. Fitovolatilización:

Es una capacidad de las plantas para absorber agua contaminada con metales pesados y transportarlos hacia las hojas. Una vez en las hojas, los contaminantes pueden ser transformados en compuestos más simples y liberados hacia la atmósfera a través de un proceso conocido como evapotranspiración. Esta es una estrategia utilizada por muchas plantas en el contexto de la fitorremediación para eliminar contaminantes del suelo y mejorar la calidad del entorno. (Bernal, 2007) Los efectos biológicos de la fitovolatilización son absorber los contaminantes a través de las raíces de las plantas desde el suelo o el agua, además de acumular los contaminantes en los tejidos y transformarlos en compuestos volátiles a través de procesos metabólicos. En cuanto a los efectos químicos, las plantas en la fitovolatilización convierten los contaminantes en formas menos tóxicas, la liberación de estos compuestos tóxicos al aire es un proceso químico llamado volatilización. La volatilización es el proceso mediante el cual una sustancia se convierte en forma gaseosa o vapor desde su estado líquido o sólido a temperatura ambiente. En el caso de la fitovolatilización, los

contaminantes absorbidos por las plantas son metabolizados y transformados internamente en compuestos volátiles, que luego son liberados al aire a través de estructuras como las hojas o durante el proceso de transpiración de la planta. Este proceso es esencialmente una forma de desintoxicación, donde los contaminantes se convierten en formas menos dañinas antes de ser liberados al medio ambiente. (Rosas y Rodríguez, 2008)

A finales de la década de 1970, en el condado de Kesterson, California, se descubrió la contaminación del suelo debido a la liberación de aguas residuales agrícolas que contenían altas concentraciones de selenio. Para mejorar esta situación, se implementó un proyecto con un enfoque de fitovolatilización utilizando plantas de girasol (*Helianthus annuus*). A medida que las plantas crecían, se observaba que estas absorbían el selenio del suelo por medio de sus raíces. Luego, las plantas liberaban el selenio en forma de compuestos volátiles a través de sus hojas y tallos, que se evaporaban en la atmosfera. Este proceso de fitovolatilización redujo considerablemente la concentración de selenio en el suelo, lo que a su vez disminuyó la exposición de la fauna local a niveles tóxicos de selenio. (Camps, 2001)

4.3.3. Fitodegradación:

Es el proceso clave en el cual las plantas transforman los contaminantes absorbidos en su interior en sustancias inofensivas. En algunos casos, estos contaminantes son convertidos en gases como el CO_2 , que son liberados a la atmósfera a través de las hojas, o en agua (H_2O). Este mecanismo es posible gracias a la presencia de enzimas, como la dehalogenasa y la oxigenasa, que se encuentran dentro de los tejidos vegetales y catalizan la degradación de los contaminantes, convirtiéndolos en productos beneficiosos y no perjudiciales. (González, 2008) La fitodegradación tiene efectos biológicos y químicos. La colaboración de las plantas con microorganismos en el suelo para descomponer los contaminantes, la liberación de líquidos orgánicos por parte de las raíces y la

mineralización de los contaminantes orgánicos en formas más simples, son efectos biológicos que tiene la fitodegradación. Los efectos químicos de la fitodegradación se relacionan con la oxidación de los contaminantes por parte de los microorganismos y la formación de productos de degradación que pueden ser menos tóxicos o de mayor facilidad para la degradación. (Rosas y Rodríguez, 2008)

En la planta de Toms River en Nueva Jersey, EE.UU, se utilizó la fitodegradación para abordar la contaminación de mercurio en los sedimentos del río Toms. En este proyecto, se plantaron ciertas especies de plantas que son conocidas por acumular mercurio, como la almeja (*Trifolium repens*) y la cola de caballo (*Equisetum hyemale*). Estas plantas, al crecer en suelos contaminados con mercurio, absorbieron el metal a través de sus raíces y lo acumularon en sus tejidos. Luego, las plantas se cosecharon y se retiraron del sitio, lo que permitió la eliminación del mercurio acumulado de manera controlada y segura. (Parry, 2023)

4.4. Efectos Biológicos, Físicos y Químicos

4.4.1. Fitoestabilización:

Es una característica de las plantas que ayuda a prevenir la dispersión de ciertos contaminantes hacia aguas subterráneas o la atmósfera. En este proceso, las plantas retienen los metales pesados en sus raíces, especialmente en la zona cercana a las raíces llamada rizosfera, evitando que se muevan y se dispersen. Esto ayuda a mantener los contaminantes localizados y evita su propagación a otras áreas del medio ambiente. (Avílez, 2017) La fitoestabilización tiene efectos físicos, biológicos y químicos; los efectos físicos se relacionan con la mejoría de la estructura del suelo por la actividad de las raíces, y por la creación de una barrera física impidiendo que los contaminantes se desplacen. Los efectos biológicos se relacionan con la barrera que se crea con sus raíces para reducir la erosión del suelo y además secretar líquidos orgánicos para mejorar la calidad del suelo. En cuanto a los efectos químicos, se tiene favorecer la formación de complejos químicos entre los

contaminantes e influir en el pH del suelo a través de las raíces. (Rosas y Rodríguez, 2008)

En Buenos Aires, Argentina se encuentra el río Matanza-Riachuelo. Este río, que atraviesa la ciudad Autónoma y la provincia de Buenos Aires, ha sido históricamente uno de los cuerpos de agua más contaminados de América Latina debido a la descarga de residuos industriales y domésticos sin tratar. Los suelos presentan un alto grado de contaminación de cromo, cobre y zinc. En el marco del Plan de Saneamiento del río Matanza-Riachuelo, se implementó la medida de fitoestabilización en las áreas contaminadas a lo largo de sus márgenes. Este proyecto involucró la siembra de vegetación de *Sagittaria montevidensis* y *Tradescantia fluminensis* en la orilla del río para estabilizar los suelos contaminados y reducir la erosión; cabe resaltar, que este proyecto se enfocó en la cuenca baja del río. Las plantas herbáceas fueron capaces de soportar cambios en el nivel del agua y almacenaron estos metales, especialmente en sus raíces y otras partes subterráneas. (Cabo, et al., 2019)

4.4.2. Rizofiltración

Es una característica de las plantas acuáticas en la cual sus raíces se sumergen en medios contaminados. Estas raíces comienzan a absorber los contaminantes, y al mismo tiempo, el organismo de la planta los bioacumula y los descompone en sustancias más fácilmente degradables, liberándolos al entorno. Es una estrategia eficaz para purificar el agua contaminada, ya que las plantas actúan como filtros naturales al absorber y transformar los componentes contaminantes en formas menos perjudiciales. (Avílez, 2017) La rizofiltración tiene efectos biológicos, físicos y químicos. Con respecto a los efectos biológicos se relacionan con la absorción de contaminantes a través de las raíces de las plantas y transformar los contaminantes en menos tóxicas a través de los procesos metabólicos. Los efectos químicos de la rizofiltración pueden influir en la química del agua, como inclusión de la precipitación de algunos contaminantes en las raíces de las plantas o la

formación de complejos químicos entre las raíces y los contaminantes. En cuanto a los efectos físicos, las raíces de las plantas pueden ayudar a filtrar las partículas en suspensión y mejorar la calidad del agua. (Rosas y Rodríguez, 2008)

En la zona minera de Leadville, Colorado, EE. UU la actividad minera había dejado atrás grandes cantidades de aguas subterráneas contaminadas con metales pesados, especialmente plomo y zinc. Para abordar esta contaminación, se implementó un proyecto de rizofiltración en el que se utilizaron plantas nativas, como la hierba dorada (*Solidago sp.*) y la juncia (*Juncus sp.*). Estas plantas se cultivaron en humedales contruidos específicamente para este propósito. A medida que las plantas crecían en estos humedales, sus raíces absorbían los metales pesados presentes en el agua, lo que ayudaba a purificar el agua. Los contaminantes se acumulaban en las raíces y se retiraban del agua subterránea. Desde los aspectos químicos química los fenómenos involucrados en este proyecto fueron el de la absorción de metales pesados por las raíces y la acumulación de metales pesados en las raíces; en cuanto a los fenómenos físicos para este proyecto se involucraron la filtración del agua a través del suelo y las raíces, como también el transporte de agua y nutrientes a través del sistema vascular de las plantas; y finalmente para los fenómenos biológicos se involucraron la interacción planta-metal y la descomposición de materia orgánica. (Oyarzun, et al., 2011) El proyecto de rizofiltración en Leadville ha demostrado ser un enfoque eficaz y rentable para abordar la contaminación de aguas subterráneas con metales pesados en la región minera. (Oyarzun, et al., 2011)

Marco Conceptual

Se presenta un marco conceptual conciso que abarca los términos clave relacionados con la fitorremediación y la contaminación por mercurio. Estos conceptos serán abordados y mencionados a lo largo del documento para proporcionar un conocimiento básico sobre el tema.

1. Conceptos Generales

1.2 Contaminación

La contaminación se refiere a cualquier factor físico, biológico o químico que altera las propiedades y el funcionamiento normal de los ecosistemas, generando cambios en las condiciones ambientales. Estas alteraciones son dañinas y perjudiciales para la salud y representan un riesgo para la vida animal y vegetal. Los impactos de la contaminación pueden ser evaluados como reversibles o irreversibles, teniendo consecuencias en todos los componentes del medio ambiente. En resumen, la contaminación tiene efectos negativos en los ecosistemas y en todos los seres vivos que dependen de ellos. (Ambientum, 2021)

- **Toxicidad**

La toxicidad se refiere al nivel o grado en el que una sustancia química o peligrosa puede ser dañina para los organismos vivos. Ayuda a evaluar el potencial nocivo de una sustancia cuando entra en contacto con seres humanos, animales y plantas. La toxicidad está influenciada por factores como la duración del contacto con la sustancia, la cantidad de sustancia presente y la vía de exposición a los organismos. Las sustancias tóxicas tienen efectos perjudiciales en los ecosistemas y en el medio ambiente en general. Es importante comprender y evaluar la toxicidad de las sustancias para tomar medidas adecuadas de protección y minimizar los impactos negativos en los seres vivos y en el entorno. (Ambientum, 2021)

- **Absorción**

La vía de exposición es el mecanismo a través del cual un organismo entra en contacto con una sustancia. En el caso de las plantas, la absorción de contaminantes ocurre principalmente a través de las raíces, donde las sustancias pueden ser tomadas por la planta y transportadas a través de sus tejidos. Este proceso de absorción de sustancias es fundamental para el funcionamiento de la fitorremediación, ya que se aprovecha la capacidad de las plantas para absorber y eliminar contaminantes del suelo o del agua. (Ambientum,2021)

2. Suelo

La superficie de la Tierra, conocida como suelo, es la capa externa donde tiene lugar la vida y el desarrollo. A lo largo de millones de años, se ha formado a través de procesos minerales, geológicos y la interacción de materia orgánica e inorgánica. En el suelo, se establecen complejas cadenas de microorganismos, agua y diversos elementos que permiten la existencia de la vida en la actualidad. El suelo se considera un recurso renovable que requiere protección y cuidado para mantener su funcionamiento sostenible. (Ambientum, 2021)

- **Suelo Contaminado**

La contaminación del suelo se refiere a la presencia de sustancias químicas o peligrosas en forma líquida, sólida o gaseosa que alteran las características fisicoquímicas del suelo. Esto tiene un impacto negativo tanto en la fauna, los seres humanos como en la flora. Entre las sustancias que pueden afectar adversamente al suelo se encuentran los metales pesados, los hidrocarburos, los ácidos y los residuos sólidos, así como los lixiviados que se generan a partir de estos. La contaminación del suelo es un problema actual que requiere atención y medidas para prevenir y remediar sus efectos perjudiciales. (Ambientum,2021)

- **Tolerancia:**

La tolerancia se refiere a la capacidad de un organismo de ser menos sensible o tener menores efectos frente a una sustancia. Esta tolerancia puede ser el resultado de una adaptación del organismo a la sustancia en cuestión. Incluso si la sustancia es tóxica, las plantas u otros organismos pueden mostrar una tolerancia natural y no experimentar efectos significativos. En resumen, la tolerancia implica una menor susceptibilidad a los efectos adversos de una sustancia y puede variar entre diferentes especies y organismos. (Ambientum, 2021)

3. Técnicas de remediación

6.3.1. Biorremediación

La fitorremediación es un enfoque de remediación que se basa en el uso de microorganismos y las funciones complejas de las plantas para metabolizar y transformar los contaminantes presentes en el suelo, agua o aire en compuestos simples y fácilmente absorbibles. Esta técnica tiene como objetivo descontaminar de manera sostenible diversos tipos de suelos y aguas residuales. La fitorremediación está relacionada con la biotecnología y se centra en la capacidad de las plantas para acumular, degradar y reducir los impactos negativos y el desequilibrio que la contaminación causa en los ecosistemas. En resumen, la fitorremediación utiliza las propiedades de las plantas y los microorganismos para limpiar y restaurar de forma natural el medio ambiente contaminado. (Ambientum, 2021)

- ***In Situ:***

El término "in situ" proviene del latín y significa "en el lugar" o "en el sitio". En el contexto de la biorremediación, se refiere a los procedimientos que se llevan a cabo directamente en el lugar de estudio o de aplicación. En el caso de la fitorremediación, implica aplicar esta técnica directamente en el sitio contaminado, sin realizar modificaciones que alteren el paisaje o el entorno. Es una forma

de abordar la remediación de manera localizada y específica, maximizando la eficacia y minimizando los impactos en el entorno circundante. (Ambientum, 2021)

- **Remoción:**

La remoción implica quitar, eliminar o sacar algo que está causando una alteración en la funcionalidad de un ecosistema, sin importar si se reemplaza o no. En el contexto ambiental, la remoción se refiere a trasladar una sustancia nociva de un lugar a otro, con el objetivo de garantizar el equilibrio en ambas partes. Este proceso busca eliminar o reducir la presencia de elementos o sustancias que están causando un impacto negativo en el medio ambiente, permitiendo restaurar o mantener la salud y el equilibrio del ecosistema afectado. (Ambientum, 2021)

- **Recuperación**

La recuperación se refiere a la aplicación de técnicas y metodologías con el objetivo de restituir un ecosistema alterado a sus condiciones originales o muy similares. Este proceso implica la reparación de los servicios ecosistémicos que han sido negativamente afectados por la actividad humana y su desarrollo progresivo. La recuperación busca revertir los impactos negativos y promover la restauración de la biodiversidad, los procesos naturales y otros componentes esenciales del ecosistema. Su objetivo final es lograr que el ecosistema funcione nuevamente de manera equilibrada y brinde los beneficios necesarios para la vida y el entorno natural. (Ambientum, 2021)

4. Fenómenos de remediación

El proceso de fitorremediación implica una serie de fenómenos tanto químicos como físicos que contribuyen a la descontaminación del medio ambiente. En el aspecto químico, las plantas utilizadas en la fitorremediación pueden inducir procesos de biotransformación, donde los contaminantes son metabolizados y transformados en compuestos menos tóxicos a través de reacciones enzimáticas. Además, las raíces de las plantas pueden secretar exudados orgánicos que pueden quelar o

complejar metales pesados, facilitando su extracción del suelo. En cuanto a los fenómenos físicos, las plantas pueden contribuir a la remediación mediante la absorción y acumulación de contaminantes en sus tejidos, proceso conocido como fitoacumulación. Asimismo, la fitorremediación puede implicar fenómenos físicos como la adsorción, donde los contaminantes se adhieren a la superficie de las raíces o tejidos de las plantas, y la volatilización, donde los contaminantes son absorbidos por las plantas y luego liberados al aire en forma de vapor. Estos mecanismos químicos y físicos se combinan para proporcionar una herramienta efectiva y sostenible para la restauración de sitios contaminados mediante la fitorremediación. (Volke y Velasco, 2002)

4.1.Fenómenos químicos

- **Reacciones de Redox**

Este fenómeno implica la transferencia de electrones entre sustancias químicas, como la oxidación y la reducción. Es fundamental para la remediación, ya que implican la transferencia de electrones entre especies químicas, lo que conduce a la transformación de contaminantes en formas menos tóxicas o móviles. En el contexto de la remediación, estas reacciones pueden ocurrir tanto de manera natural como inducida por intervención humana. Por ejemplo, en el proceso de biorremediación, ciertos microorganismos presentes en el suelo pueden catalizar reacciones redox para metabolizar compuestos orgánicos contaminantes, convirtiéndolos en productos finales más benignos como dióxido de carbono y agua. Además, en técnicas como la permeabilización reactiva, se pueden introducir agentes reactivos que facilitan la transformación de contaminantes mediante reacciones redox, como la reducción de metales pesados o la oxidación de compuestos orgánicos. (Volke y Velasco, 2002)

- **Oxidación**

Es el proceso por el cual una sustancia pierde electrones. En el contexto de la remediación, la oxidación puede ocurrir de diversas maneras y a diferentes escalas. Por ejemplo, en la oxidación química, se pueden utilizar agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno, el permanganato de potasio o el ozono para degradar contaminantes orgánicos en el suelo o el agua. Estos agentes oxidantes pueden reaccionar con los contaminantes, rompiendo sus enlaces químicos y convirtiéndolos en productos finales menos tóxicos o más fáciles de tratar. Este proceso puede ser especialmente efectivo para la degradación de compuestos orgánicos persistentes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) o los compuestos orgánicos volátiles (COV). (Volke y Velasco, 2002)

- **Reducción**

Es el proceso por el cual una sustancia gana electrones. Este proceso puede ocurrir in situ, o ex situ. La reducción química implica la introducción de agentes reductores, tales como el hierro cero valente (Fe^0) o el sulfuro de hierro (FeS), en el medio contaminado. Estos agentes reaccionan con los contaminantes, donando electrones y promoviendo su transformación en productos finales menos tóxicos o móviles. Por ejemplo, en el caso de compuestos orgánicos contaminantes, la reducción puede conducir a la formación de productos finales más estables, como agua y dióxido de carbono, que son menos perjudiciales para el medio ambiente. La reducción química puede ocurrir rápidamente y puede ser controlada y optimizada para adaptarse a las condiciones específicas del sitio contaminado. (Volke y Velasco, 2002)

- **Hidrólisis**

Es una reacción química entre una sustancia y el agua, que puede conducir a la descomposición o transformación de compuestos. En la hidrólisis, las moléculas de agua actúan como reactivo, y su introducción en el medio contaminado promueve la división de los enlaces químicos de los contaminantes. Este proceso puede ocurrir de manera natural, especialmente en presencia de agua y condiciones ambientales adecuadas, o puede ser inducido mediante la adición controlada de agua al medio contaminado. La hidrólisis puede afectar a una amplia gama de contaminantes, incluyendo compuestos orgánicos e inorgánicos. Por ejemplo, en el caso de contaminantes orgánicos, como los ésteres o los anhídridos, la hidrólisis puede conducir a la formación de ácidos carboxílicos o alcoholes, que son productos finales menos tóxicos y más fácilmente biodegradables. Por otro lado, en el caso de contaminantes inorgánicos, como los compuestos de cianuro, la hidrólisis puede resultar en la formación de ácido cianhídrico, que es más fácilmente volátil y menos tóxico que el cianuro original. (Volke y Velasco, 2002)

4.2.Fenómenos físicos

- **Volatilización**

Proceso mediante el cual sustancias químicas se convierten en vapor o gas y se liberan al aire. Este proceso se basa en la capacidad de ciertos compuestos para pasar del estado líquido o sólido al estado gaseoso cuando se alcanzan temperaturas adecuadas. En la volatilización natural, los contaminantes presentes en el suelo, el agua o los sedimentos pueden evaporarse de forma espontánea a medida que la temperatura del medio aumenta. Por ejemplo, los compuestos orgánicos volátiles (COV), como el benceno, el tolueno y el xileno, son propensos a la volatilización debido a su naturaleza química y sus bajos puntos de ebullición. Estos compuestos pueden escapar del suelo o el agua contaminada y transferirse a la atmósfera en forma de vapor. En la volatilización inducida,

se pueden aplicar técnicas específicas para aumentar la tasa de volatilización de los contaminantes. Por ejemplo, en la ventilación del suelo, se pueden instalar sistemas de extracción de aire para promover la circulación de aire en el suelo contaminado, lo que aumenta la transferencia de contaminantes a la atmósfera. (Volke y Velasco, 2002)

- **Adsorción**

Proceso físico en el cual los contaminantes se adhieren a la superficie de un material sólido, como el carbón activado. En este proceso, los contaminantes presentes en el medio contaminado son atrapados y retenidos en la superficie del adsorbente debido a fuerzas de atracción física. La adsorción puede ocurrir tanto en suelos como en aguas subterráneas, y puede ser aplicada para la remediación de una amplia gama de contaminantes, incluyendo compuestos orgánicos e inorgánicos. La adsorción se basa en la capacidad del adsorbente para tener una alta área superficial y una estructura porosa que proporciona sitios de unión para los contaminantes. Por ejemplo, materiales como el carbón activado, arcillas modificadas, zeolitas y óxidos metálicos son comúnmente utilizados como adsorbentes en la remediación ambiental debido a su alta capacidad de adsorción y su capacidad para adsorber una amplia variedad de contaminantes. (Volke y Velasco, 2002)

- **Filtración**

Método de separación física en el cual se pasan fluidos a través de un medio poroso para retener partículas sólidas. La filtración se utiliza para eliminar partículas sólidas y contaminantes suspendidos presentes en el medio contaminado, con el objetivo de purificar el fluido y hacerlo apto para su uso o devolución al medio ambiente. El proceso de filtración funciona de la siguiente manera: el fluido contaminado se hace pasar a través del medio poroso del filtro, que retiene las partículas sólidas y contaminantes suspendidos mientras permite que el fluido limpio pase a través

de él. El tamaño de los poros en el filtro determina qué partículas pueden ser retenidas y cuáles pueden pasar a través de este. Los filtros pueden ser de diferentes tipos, como filtros de arena, filtros de carbón activado, filtros de membrana o filtros de papel, cada uno diseñado para capturar ciertos tipos de contaminantes dependiendo de su tamaño, forma y composición química. (Volke y Velasco, 2002)

- **Destilación**

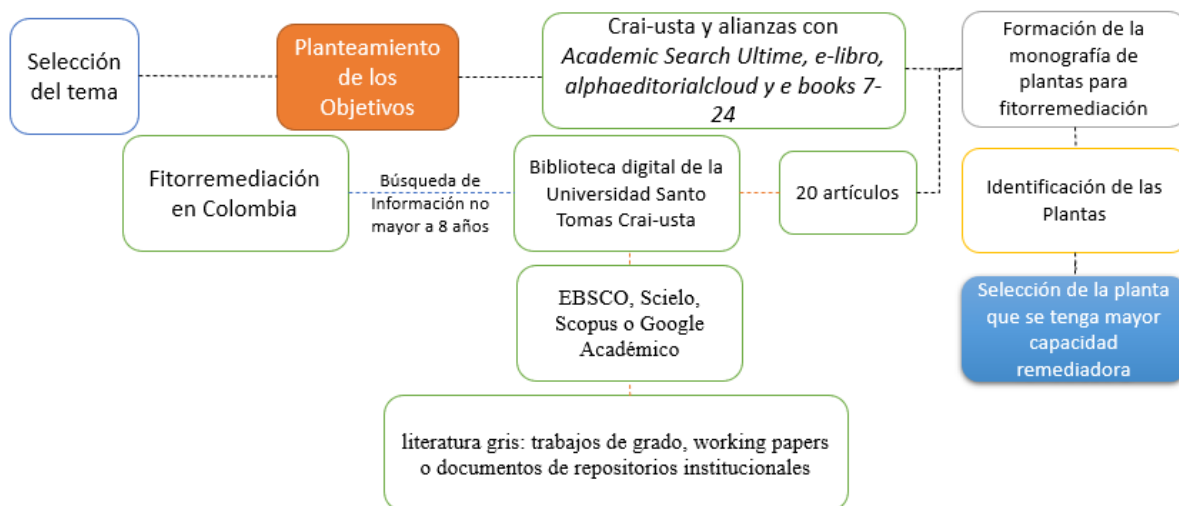
Proceso de separación en el cual los componentes de una mezcla se separan mediante diferencias en sus puntos de ebullición. El proceso de destilación funciona de la siguiente manera: se calienta la mezcla líquida contaminada en un equipo de destilación, lo que provoca que los componentes de la mezcla con puntos de ebullición más bajos se conviertan en vapor. Este vapor es entonces conducido a un condensador, donde se enfría y vuelve a condensarse en forma líquida. Los contaminantes con puntos de ebullición más altos quedan atrapados en el equipo de destilación o son removidos de forma separada. De esta manera, se logra separar los componentes de la mezcla líquida original en sus fracciones individuales, permitiendo la recuperación de sustancias útiles y la eliminación de contaminantes. (Volke y Velasco, 2002)

Metodología

1. Tipo de investigación

La investigación se basó en una metodología descriptiva con énfasis en la explicación de estrategias de biorremediación y biotecnológicas, específicamente la técnica de fitorremediación, para la descontaminación del ion de mercurio en la explotación minera aurífera. Se utilizó una amplia gama de fuentes bibliográficas, incluyendo la biblioteca digital de la Universidad Santo Tomas Craiusta y sus alianzas con Academic Search Utime, e-libro, alphaeditorialcloud y E- books 7-24. También se contó con buscadores especializados en artículos científicos como EBSCO, Scielo, o Google Académico. Es importante recalcar que se buscó en bases de datos trabajos de grado, working papers y documentos de repositorios de las universidades del país como la Universidad Nacional, Universidad de Pereira, Universidad de la Salle y Universidad del Bosque. Seguidamente, los artículos que se encontraron no deben superar el tiempo de publicación de ocho años. Se revisó y recopiló información de 20 artículos especializados que abordaron los aspectos relevantes de la fitorremediación y su aplicación en el territorio colombiano, como también el tipo de plantas que fueron empleadas para la remoción de mercurio en los suelos impactados por la actividad minera. (Chitiva, 2021) Además, se revisaron artículos que evaluaron las consecuencias del ion de mercurio en los ecosistemas y la salud humana, así como los impactos ecosistémicos y sociales causados por la explotación aurífera en la región. La investigación buscó comprender la incidencia del mercurio en el medio ambiente y su impacto en la fauna, flora y en la conducta normal de los seres vivos. En el diagrama 1, se puede observar los pasos llevados a cabo para recopilar, analizar y sintetizar la información relevante de los artículos encontrados.

Diagrama 1. Diagrama metodológico.



Nota: Elaboración propia.

La búsqueda de la información fue conformada por la utilización de indicadores boléanos que resaltaron las palabras claves para agilizar la recopilación de información y artículos útiles para esta monografía. Se utilizó el operador lógico AND, para ser más estricta la búsqueda, consolidando y obteniendo lo más relevante. Es claro que el algoritmo se modificó para mejorar la búsqueda al transcurrir la investigación. (Oller, 2003) El operador lógico para comenzar a seleccionar los artículos fue la siguiente:

"Fitorremediación" AND "mercurio" AND "plantas" AND "Colombia" AND "artículos" AND "Trabajos de grado" AND "Repositorios" AND "Universidad Nacional" AND "Universidad de Pereira" AND "Universidad de la Salle" AND "Universidad del Bosque" AND "Posgrados"

El trabajo también incluyó la elaboración de un presupuesto y un cronograma detallados para garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados, estos se pueden ver en el Anexo 1 y Anexo 2.

2. Revisión bibliográfica descriptiva

La revisión bibliográfica realizada en esta investigación se basó en el proyecto realizado por Chitiva (2021) titulado “*Estudio de procesos de fitorremediación aplicados en suelos contaminados con hidrocarburos por el desarrollo de actividades de las ED.*” En este proceso, se explica cómo se llevó a cabo la metodología para fortalecer el marco de investigación; implicando realizar una búsqueda exhaustiva de los procesos de fitorremediación que han demostrado ser efectivos en la eliminación de contaminantes. La información se extrajo de artículos científicos disponibles en las plataformas digitales mencionadas en la metodología cumpliendo con el requisito de no superar los 8 años de publicación. En total, se recopilaron 25 artículos que abordan los aspectos relevantes de la fitorremediación y su aplicación en el territorio nacional.

En un inicio, se realizaron búsquedas básicas con términos clave como (Fitorremediación, mercurio, Colombia, plantas), obteniendo un total de 20 artículos de acceso abierto. Se seleccionaron 13 de ellos debido a su relevancia en el ámbito de la fitorremediación del mercurio a nivel nacional, considerando factores como el tipo de planta y su adaptabilidad a diversas condiciones climáticas y suelos.

Posteriormente, se llevó a cabo una segunda búsqueda en inglés con nuevas ecuaciones que incluían palabras clave como (phytoremediation, mercury, Colombia, plants, rhizosphere, repositories), resultando en 20 artículos de acceso abierto. Se seleccionaron 5 de ellos, descartando los 15 restantes por duplicados o por estar centrados en otros países.

Finalmente, se realizó una última búsqueda en las bases de datos de diversas universidades colombianas, utilizando la ecuación de la segunda búsqueda. Se obtuvieron 12 artículos, de los cuales se seleccionaron 7 con estudios relevantes sobre la fitorremediación del mercurio. Los 5 restantes fueron descartados por falta de acceso abierto.

Es importante destacar que los documentos no seleccionados se descartaron porque se desarrollaron en otros países, carecían de características suficientes para estudios de fitorremediación, o no tenían acceso abierto. Además, como criterios de exclusión, no se consideraron los artículos cuya metodología se centraba en la fitorremediación de contaminantes distintos al mercurio. Sin embargo, se tuvieron en cuenta los estudios que abordaban otros contaminantes además del mercurio. Otro criterio de exclusión fue el medio a tratar; se excluyeron los artículos donde el medio a tratar difería del suelo y agua. Los documentos seleccionados cumplían con criterios temporales (últimos 8 años, de 2015 a 2023), metodológicos (experimentales), y de resultados (porcentaje de remoción de contaminantes derivados del mercurio). En la metodología, se priorizó el uso de la fitorremediación mediante especies de plantas como método principal.

3. Determinación del método según remoción y adaptabilidad

En la fase conclusiva de la investigación, se buscará determinar un método específico que demuestre tanto una eficiente remoción del mercurio como una destacada adaptabilidad a las condiciones particulares de la minería en Colombia. Basándonos en el análisis bibliográfico previo, se pretende identificar variables clave que incidan significativamente en la efectividad del método, considerando la naturaleza de la contaminación mercurial en entornos mineros. La selección de un método adaptable es esencial para garantizar su viabilidad y éxito en la aplicación práctica, contribuyendo así a la fitorremediación exitosa de la contaminación por mercurio en contextos mineros colombianos. (Chitiva, 2021)

En consonancia con los resultados obtenidos en el estudio bibliográfico, se buscará destacar aquellos métodos que hayan demostrado una sólida capacidad de remoción del mercurio, al tiempo que se evaluará su aplicabilidad en el contexto minero colombiano. La adaptabilidad del método a las condiciones específicas de la minería en el país se considerará un criterio crucial para su

recomendación. La fase de determinación del método se enfocará en establecer un enfoque robusto y eficaz que no solo demuestre eficacia en la remoción del mercurio, sino que también sea práctico y factible para implementar en situaciones de contaminación real.

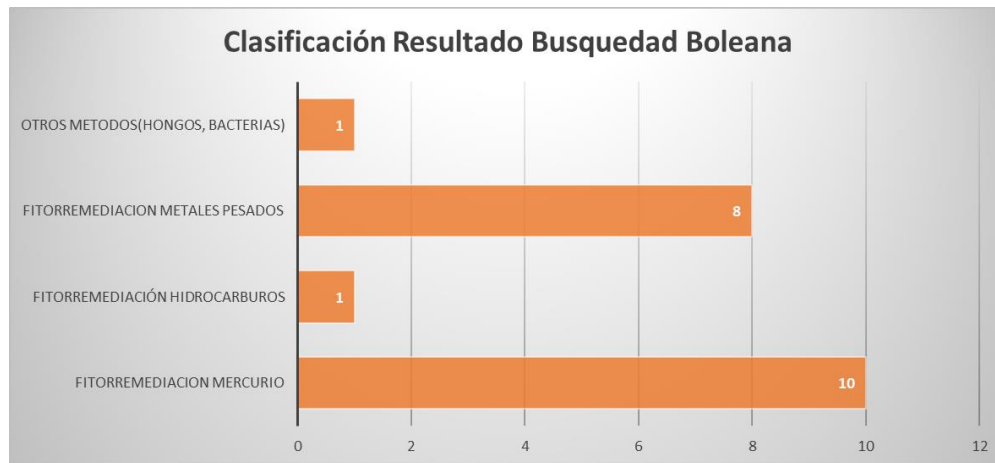
Este análisis crítico permitirá consolidar una recomendación sustentada para la aplicación práctica en casos de contaminación por mercurio en la minería colombiana. Al identificar y destacar las variables más relevantes y los métodos más adaptables, se proporcionará una guía útil para abordar futuros casos de contaminación y se contribuirá a la construcción de estrategias eficientes y sostenibles en el ámbito de la fitorremediación en el contexto minero específico de Colombia.

Resultados

De acuerdo con el estudio bibliográfico sobre fitorremediación para la absorción de metales pesados ion de mercurio en el territorio nacional del país Colombia. Se encontraron 20 artículos que cumplen con lo estipulado en el método de búsqueda con la utilización de indicadores booleanos, los cuales fueron encontrados en los repositorios de la Universidad Nacional, Antonio Nariño, Universidad el Bosque, Universidad de Córdoba, Universidad de Buenaventura, Universidad Santo Tomas, Universidad Nueva Granada, Universidad del Norte, Universidad Católica de Manizales. En Colombia no existe la suficiente documentación en temas sobre recuperación de suelos mediante métodos biológicos como lo es la fitorremediación, sin embargo, el estudio arroja que el tema está cogiendo más relevancia a partir del 2019 en adelante, esto se debe a la necesidad de recuperar espacios estratégicos que se están perdiendo por el alto grado de contaminación existente que allí existe por la explotación aurífera. (Riopedre et al., 2021), Como también por las nuevas políticas que traen reformas agrarias para la optimización de la industrialización del campo y el aumento de producción alimentaria (Aguayo, 2015). Del mismo modo, se da respuesta y se cumple con lo estipulado en el planteamiento del objetivo principal el cual es la búsqueda de toda la información relacionada sobre la fitorremediación con la descontaminación del ion de mercurio, como funciona y cuáles son los efectos en el ecosistema. Sin embargo, se encontraron artículos que utilizaban otros métodos biológicos como bacterias y hongos que no concordaban con los parámetros fijados en la búsqueda. (Ambientum, 2021). A continuación, se muestra la figura 3, donde se observan los resultados de la búsqueda booleana. Para dar cumplimiento a los objetivos específicos, se encontraron que 10 artículos hablan de fitorremediación de mercurio, 8 de fitorremediación con la variación de metales pesados (no solo del mercurio), y por último un estudio de absorción de hidrocarburos en el suelo por medio de fitorremediación, como también la utilización de biorremediación como método para obtener el ion de mercurio por medio de hongos y bacterias;

este último no se descarta por no tener relación con los tres objetivos enmarcados en el comienzo del proyecto.

Figura 3. Resultados búsqueda bibliográfica.



Nota: *Elaboración propia.*

1. Análisis documental y de datos estadísticos

Durante esta etapa, se examinaron los resultados obtenidos de las prácticas de fitorremediación aplicadas en suelos afectados por la minería de oro en el país. Se enfocó en evaluar el porcentaje de eliminación del contaminante, la mejora del entorno contaminado y las características específicas del suelo que se busca descontaminar.

1.1. Procedimiento

Para examinar la eliminación, se analizaron minuciosamente los porcentajes de remoción de cada especie en relación con el contaminante, así como la duración de cada procedimiento. Estos datos se detallan en la tabla 1 que se presenta a continuación.

Tabla 1. Análisis comparativo de investigaciones sobre Fitorremediación.

Plantas utilizadas	Proceso	Periodo de ejecución (días)	Porcentaje de remoción del mercurio	Fuente
Buchón o jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>)	Se tomaron dos muestras integradas, cada una compuesta por cuatro submuestras, en un área contaminada por mercurio. Se realizaron tres fases de alimentación del humedal: con agua potable, mezcla y 100% de agua residual. (Domínguez et al., 2016, p. 227-237).	210 días	70,80%	Domínguez et al., 2016).
<i>Scirpus holoschoenus</i>	Se establecieron tres humedales con distintas configuraciones de suelos y agua en áreas con aproximadamente un 5% de pendiente. Se eligieron 14 plantas para acondicionar el humedal en aguas contaminadas. (Moreno, et al., 2020).	140 días	72%	(Moreno, et al, 2020).
<i>Cyperus papyrus</i>			63%	
<i>Heteranthera reniformis</i>	Se evaluaron pozos mineros, dividiéndolos en tres secciones para examinar las condiciones fisicoquímicas del agua. También se realizaron muestreos en cuatro sitios remanentes de minería, dividiendo cada poza en secciones para recolectar plantas. (Rivas, 2021).	120 días	55%	(Rivas, 2021).
<i>Eleocharis mutata</i>			41%	
<i>Eleocharis interstincta</i>			25%	
<i>Eleocharis sp</i>			5%	
<i>Elodea sp</i>	Se adquirió una planta en un acuario de Medellín y se colocó en el laboratorio en un recipiente con agua y arena. Se preparó una solución stock de 12.5 mg/ml y se realizaron tres diluciones sucesivas (6.25 mg/ml; 1.55 mg/ml; 0.39 mg/ml) para el ensayo. (Jaramillo, et al. 2015, p. 42-45)	90 días	86,20%	(Jaramillo, et al., 2015)
<i>Neptunia oleracea</i> Lour	Se realizaron muestreos aleatorios recolectando 10 plantas de cada especie. Las muestras se etiquetaron y almacenaron a 25°C, procesadas dentro de las siguientes 24 horas. En el laboratorio, se aislaron las especies, se maceraron los tejidos y se incubaron para	31 días	21,70%	(Torres et al., 2019).
<i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms			42,40%	
<i>Paspalum repens</i> Bergius. E. <i>crassipes</i>			17,10%	

	evaluar la resistencia a concentraciones de mercurio (50-200 mg/L). (Torres et al., 2019, p. 36-44).			
<i>Heliconia psittacorum</i>	Se construyeron tres peceras de vidrio cerca del sedimentador de agua residual, plantando <i>Heliconia psittacorum</i> . Se evaluó su desarrollo al alimentar inicialmente el humedal con agua natural y luego con agua residual, realizando muestreos cada 4 días. (Coral y Gómez, 2017).	56 días	65%-99%	(Coral y Gómez, 2017).
<i>Leucaena leucocephala</i>	Se realizó un experimento con suelo de una mina abandonada en Cáceres, Antioquia, a 0-20 cm de profundidad. Después de manipular el suelo, se sembraron semillas de <i>Leucaena leucocephala</i> , germinadas previamente con ácido sulfúrico, plantándose tres por maceta. (Montes et al., 2021).	90 días	80%	(Montes et al., 2021).
<i>Gliricidia sepium</i>	Las muestras se empaquetaron en bolsas de polietileno y se distribuyeron en cuatro parcelas. Se sembraron plantas por semillas, recibieron riego uniforme a través de un sistema de goteo artesanal. Se tomaron muestras al azar a los 45 días y luego cada 30 días durante cinco meses. (Díaz et al., 2017, p. 184-187).	150 días	85%	(Díaz et al., 2017).
<i>Brassicaceae</i> y <i>Apiaceae</i>	Se realizó un muestreo con diseño factorial al azar, variando proporciones de cilantro/brócoli y tiempos de fitorremediación. Se analizaron suelo y tejido vegetal para determinar concentración de metales pesados. (Salamanca et al., 2023)	270 días	85%	(Salamanca et al., 2023).
<i>Acacia Mangium</i>	En un invernadero controlado de 54 m ² , se aplicó un tratamiento pre-germinativo con agua hirviendo durante 5 segundos, incrementando la germinación al 96%. Las	120 días	42%	(Buelvas y Rodríguez, 2017).

	plantas se trasplantaron a suelo contaminado con mercurio, evaluando muestras en varios momentos. (Buelvas y Rodríguez, 2017).			
<i>Jatropha Curcas</i>	El estudio se enfocó en la fitorremediación de suelos en la zona minera El Alacrán utilizando <i>Jatropha curcas</i> . Se realizaron pruebas piloto de 18 meses, tomando muestras de suelo de dos zonas, aplicando análisis fisicoquímicos y pruebas estadísticas para evaluar la eficacia del proceso. (González, 2020)	540 días	95% - 98%	(González, 2020)
<i>Artemisia absinthium</i> Y <i>Lupinus pubescens</i>	La prueba piloto de fitorremediación en suelos de la zona minera El Alacrán demostró que <i>Jatropha curcas</i> L mejoró el suelo durante 18 meses, aumentando materia orgánica, fertilidad y proporcionando cobertura vegetal. A pesar de factores no controlables, eficientemente removió mercurio y cobre, mostrando su idoneidad para la fitorremediación. (Díaz y Sierra, 2017).	158 días	95%	(Díaz y Sierra, 2017).
<i>Helianthus annus</i> (Cobre Cu, Cadmio Cd, Plomo Pb, y Arsénico As)	El material de estudio estuvo constituido por muestras de suelos agrícolas contaminados por el: 25, 50, 75 y 100% de relaves mineros del área de Samne, y por plántulas de “girasol” <i>Helianthus annus</i> L. (Asteraceae) generadas a partir de semillas obtenidas de proveedores agrícolas. (Clemente et al., 2021).	90 días	75%	(Clemente et al., 2021).
<i>Eichhornia crassipe</i> (Magnesio Mn)	Se utilizó agua superficial proveniente de una represa en el corregimiento de Pueblo Bujo, ubicado en la zona rural de Montería, como medio de crecimiento de la planta. Esta misma agua, posteriormente fue empleada en las pruebas de remoción bajo concentraciones crecientes de Mn. El tiempo de exposición definido fue de 7 días para cada	7 días	67%	(Meza, 2022).

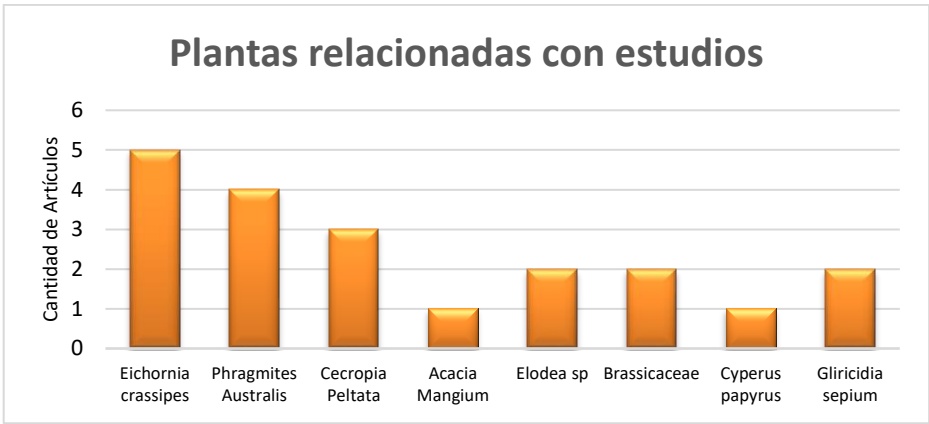
	tratamiento. (Meza, 2022).			
<i>Eichornia Crassipes</i> (Cianuro)	Se emplearon 14 plantas de <i>Eichornia Crassipes</i> en un humedal de 90 L. Se realizaron tres fases: agua normal, agua residual de mina y 100% agua residual, cada fase duró 8 días. Luego, se analizaron los resultados después de 10 días. (Gómez y Guarín, 2020).	10 días	95,23%	(Gómez y Guarín, 2020).
<i>Pistia stratiotes</i> (Plomo Pb, Cadmio Cd y Cromo Cr)	Se realizaron soluciones a diferentes concentraciones de los metales Cadmio ($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), Cromo ($\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$) y Plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), la evaluación se llevó a cabo a 0.5ppm, 1ppm, 3ppm, 5ppm y 7ppm haciendo las diluciones respectivas teniendo en cuenta que la solución matriz tenía una concentración de 1000ppm. (Aguayo, 2015).	23 días	85%	(Aguayo, 2015).
<i>Vaccinium Corymbosum</i> (Cr, Co, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, Cd, As, y Cu)	La preparación de las muestras consistió básicamente en dividir en 4 partes de 10 g de suelo de cada zona, y en 4 partes de 20 g los arándanos de cada zona, para tener un total de 16 muestras, una vez se hace esta clasificación de las muestras son llevadas a un proceso llamado digestión ácida durante 15 días con 10 ml de HCl y 10 ml de HNO_3 , Pasados los 15 días, las muestras son filtradas y traspasadas a recipientes de vidrio de color ámbar. (Mateus, 2020).	30 días	90%	(Mateus, 2020).
<i>Cannabis sativa</i> (Cadmio)	La fase experimental, en la cual en un invernadero in situ con condiciones controladas se sometió a una simulación de contaminación través del agua de riego a 18 plantas de <i>Cannabis sativa</i> spp AK47 al adicionar 2 dosis de sulfato de cadmio (CdSO_4) al 99% de pureza disueltos en agua destilada (6 y 10 mgCd/Kg) y una enmienda orgánica que consistió en la adición de	30 días	89,60%	(Vesga, 2022).

	turba al 2 %. (Vesga, 2022).			
--	------------------------------	--	--	--

Nota: Elaboración propia.

En la figura 4, se puede observar las plantas que más se destacan por su abundancia y adaptabilidad a cualquier piso térmico en los artículos consultados para el estudio de la mitigación y la absorción de metales de mercurio a través de la fitorremediación que contribuyen de manera significativa a la mejora de la calidad del suelo y de los cuerpos de agua, reduciendo la concentración y minimizando el efecto tóxico que causa el mercurio en estos; las plantas destacadas son: el Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) con 5 artículos consultados, el carrizo (*Phragmites Australis*), con 4 artículos consultados, y el yarumo (*Cecropia Peltata*), con 3 artículos consultados. (Rodríguez, 2017), (Durango, 2019). Todos estas, asociadas al cumplimiento de los objetivos propuestos.

Figura 4. Clasificación plantas más usadas fitorremediación para absorción de mercurio.



Nota: Elaboración propia.

1.2. Especies vegetales destacadas en la revisión bibliográfica

La fitorremediación emerge como una poderosa herramienta que aprovecha la combinación de biotecnología y ecología para abordar la rehabilitación de ecosistemas dañados y la recuperación

de suelos degradados. Esta técnica desempeña un papel crucial en la conservación de la diversidad biológica y en la prevención del riesgo de extinción de numerosas especies. Además de su contribución a la preservación del entorno natural, la fitorremediación se revela como un recurso fundamental para incrementar la productividad agrícola. Esto se logra al fortalecer las defensas de los cultivos frente a patógenos, virus y plagas, así como al potenciar la capacidad de absorción de nutrientes y la resistencia a condiciones de escasez de agua. La fitorremediación, por tanto, se presenta como un enfoque multidisciplinario altamente efectivo en la revitalización de ecosistemas y la mejora de la agricultura. (Herrero, 2012)

En el contexto de la restauración ambiental y la gestión sostenible de recursos, la fitorremediación se erige como un componente esencial. Esta técnica, junto con otras como los sistemas de energía renovable y las prácticas de gestión de residuos, se vuelve imprescindible al trasladar estas soluciones al campo, los suelos, los bosques y los ecosistemas en desequilibrio. La actividad humana ha dejado una huella significativa en el medio ambiente, dificultando su capacidad de regeneración y agotando los recursos debido a la sobreexplotación. (Herrero, 2012)

En este último caso las tecnologías como la biorremediación y la fitorremediación utilizan diferentes especies vegetales para recuperar áreas altamente alteradas por la actividad humana. Estas tecnologías permiten restablecer atributos que solo las plantas pueden proporcionar, purificando el suelo y devolviendo los nutrientes necesarios para restablecer la vida en estas áreas abandonadas. Asimismo, posibilitan el regreso de la fauna y flora característica de la región, permitiendo la generación de una nueva biodiversidad mediante la restauración de complejas cadenas celulares, microbiológicas y biológicas, que fomentan la proliferación de nuevas poblaciones y comunidades. (Herrero, 2012)

Cabe anotar que estas plantas llegadas a utilizar, se consideran como plantas invasoras porque no

son propias de la región donde existe el problema, sin embargo, se contemplaría un plan de manejo y un seguimiento al crecimiento y esparcimiento de las especies, sin que ocasionen depredación agresiva o exceso de competencia, esto porque existe la probabilidad que este tipo de plantas demanden más nutrientes y agua para su funcionamiento, lo que deje a otras plantas nativas sin el recurso. Es por esto que luego de identificar que tipos de plantas se van a usar, en el momento de aplicar esta investigación a la práctica se debe entender que la utilización de la fitorremediación es una disciplina transversal ya que esta implica insertar especies nuevas a lugares donde no hayan nunca estado, por lo que se debe tener en cuenta una restauración ecológica, ya sea pasiva, dependiendo que no existan barreras que detengan la regeneración y que se pueda fácilmente eliminar los agentes tensionantes. Sin embargo, como se habla de alta contaminación por mercurio, estos suelos por lo general están muy impactados, sin nutrientes ni especies que se hayan adaptado a este entorno, lo cual lleva, y será una investigación complemento, una regeneración activa del lugar, donde conlleva la utilización de diferentes microorganismos para el mismo desarrollo de las plantas en el suelo y una proliferación de microbiota en los suelos a los que se va implementar la fitorremediación. (U, Nacional. 2017)

1.2.1. *Eichornia crassipes* Jacinto de Agua

Según Correll y Johnston (1970), se trata de una planta invasora originaria de Sudamérica, principalmente en Brasil Colombia, Perú, Ecuador y Venezuela. Es una planta acuática que puede encontrarse en dos estados: flotando en el agua o fija al sustrato. Su tamaño varía, generalmente alcanza alrededor de 35 cm. Tiene un tallo reducido, pero se extiende a través de rizomas que conectan diferentes individuos. Sus hojas forman una roseta basal, con pecíolos largos y cilíndricos que miden de 2.5 a 17 cm de largo y de 4 a 13 cm de ancho. Produce de 5 a 17 flores individuales, cada una con una longitud de 6 cm y colores que van desde el lila hasta el azul o morado. La planta

tiene frutos en forma de cápsulas elípticas que no superan los 2 cm de tamaño, y produce abundantes semillas. Sus raíces son fibrosas y tienen colores variados. Es una planta adaptable a diferentes condiciones climáticas y puede tolerar cambios drásticos en el pH del agua. (Alipi, 2018)

Teniendo en cuenta que es una especie invasora, esta especie plantea desafíos significativos en la conservación de los ecosistemas acuáticos; para garantizar su uso seguro y no generar más disturbios ecológicos se requiere hacer un enfoque biológico. Esto implica implementar medidas de control efectivas, como la remoción mecánica y el control biológico selectivo, con especial atención a la prevención de su propagación en nuevos cuerpos de agua. Para el control biológico de esta especie de planta, se pueden utilizar hongos patógenos, como *Cercospora piaropi*, que ha demostrado ser efectivo en el control del Jacinto de Agua, al debilitar su crecimiento; así mismo, se pueden utilizar cepas de bacterias, como las del género *Xanthomonas*, que compiten con la planta por espacio y nutrientes ayudando a controlar su proliferación; otra opción que se puede implementar es la de introducir peces herbívoros que se alimenten de la planta, sin embargo, es importante seleccionar especies que no causen más problemas ambientales y que puedan ser controladas. (Alipi, 2018)

Además, para evitar el uso inadvertido y no autorizado del jacinto de agua, se necesita una mayor conciencia pública sobre los riesgos asociados y las prácticas responsables de manejo, implementado campañas educativas para informar a la población del riesgo del jacinto de agua y la importancia de prevenir su propagación. (Alipi, 2018)

La *Eichhornia crassipes* puede reproducirse tanto de manera sexual como asexual. Las plantas generan estolones horizontales, que son tallos rastreros que producen rosetas de hojas con yemas en sus extremos. Debido a su clasificación como maleza, su crecimiento es rápido en condiciones favorables, pudiendo duplicar su tamaño en un lapso de 7 a 16 días. En climas templados tropicales, su reproducción es constante, y si las condiciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) son

bajas, su duplicación puede tomar aproximadamente 55 días. (ADEL-FIAES, 2014)

La planta *Eichhornia crassipes* prefiere crecer en aguas ricas en nutrientes como potasio, fósforo y nitrógeno. Además, tiene la capacidad de absorber metales pesados y tolera variaciones en el pH, así como niveles bajos de los nutrientes mencionados anteriormente. Esta planta necesita temperaturas que oscilen entre los 25 y 32 °C, y no tolera bien temperaturas bajas. Para un crecimiento óptimo, el pH del agua en el que se encuentra debe estar entre 7 y 9. (Alipi, 2018).

El Jacinto de Agua tiene la capacidad de absorber metales pesados como el mercurio del agua a través de sus raíces y tejidos. Esto se debe a la interacción física entre las raíces de la planta y los contaminantes disueltos en el agua. El crecimiento denso del Jacinto de Agua en la superficie de cuerpos de agua, como estanques y lagos, crea una capa flotante que sombrea el agua. Esto tiene un efecto físico al reducir la penetración de la luz solar en el agua y afectar la temperatura del cuerpo de agua. (Alipi, 2018) La planta puede absorber nutrientes como el nitrógeno y el fósforo del agua, lo que contribuye a la reducción de la eutrofización en cuerpos de agua. La rizosfera del Jacinto de Agua alberga una comunidad microbiana diversa. Estos microorganismos desempeñan un papel importante en la biodegradación de contaminantes y en la transformación de metales pesados. Las bacterias en la rizosfera pueden establecer relaciones simbióticas con la planta para facilitar la fitorremediación. Por ejemplo, algunas bacterias pueden ayudar en la absorción y acumulación de contaminantes. (Alipi, 2018)

1.2.1.1. Taxonomía

En la tabla 2, se observa la taxonomía de la planta *Eichhornia crassipes* (Jacinto de Agua), con su respectivo reino, división, clase orden, entre otros.

Tabla 2. Taxonomía planta *Eichhornia crassipes*

Orden	<i>Liliales</i>
Familia	<i>Pontederiaceae</i>
Género	<i>Eichhornia</i>
Especie	<i>Eichhornia crassipes</i>

Nota: Información de la taxonomía de la planta *Eichhornia crassipes*. Adaptado de “Conabio.

Sitio de malezas México”, por Alipi, 2018 ([Malezas de Mexico - inicio Weeds of Mexico - home \(conabio.gob.mx\)](http://Malezas de Mexico - inicio Weeds of Mexico - home (conabio.gob.mx)))

1.2.1.2. Absorción de mercurio de *Eichhornia crassipes*

Según el artículo de Riddle, se realizó un experimento en el que se introdujo la especie de planta *Eichhornia crassipes* en un ambiente con una concentración de mercurio de 1 mg/l. Durante un período de 15 días, se observó que la planta bioacumuló 0.20 mg/l de mercurio en las hojas y 0.6 mg/l en las raíces, alcanzando concentraciones altas. Esto indica que el Jacinto de agua es un excelente bioacumulador y puede ser utilizado para recuperar suelos y aguas residuales contaminadas con mercurio. Los métodos utilizados para el análisis de concentración de mercurio fueron la "absorción atómica de vapor frío". (Valderrama & Poma, 2014) En septiembre de 2012, se recolectó la especie vegetal jacinto de agua en el valle Chillón, ubicado en el distrito de Carabayllo, Lima. Posteriormente, estas plantas fueron trasladadas a una piscina construida específicamente para su almacenamiento y cultivo antes de someterlas a ensayos en el laboratorio. Se realizaron pruebas para determinar la dosis óptima de nutrientes, utilizando diferentes concentraciones de solución A y solución B en un litro de agua, y se evaluó el tiempo de supervivencia de las plantas en respuesta a estas concentraciones variables. (Valderrama & Poma, 2014) Además, se llevó a cabo el estudio sobre el efecto de la variación del pH en el jacinto de agua. Se prepararon diversas soluciones con concentraciones conocidas de nutrientes optimizados,

alterando el pH en un rango de 1,5 a 8. A cada una de estas soluciones se le añadieron 1 ppm de cadmio (II) y 1 ppm de mercurio (II) para examinar la solubilidad de estos metales en relación con el pH de la solución. (Valderrama & Poma, 2014)

Según el estudio de Ana Valderrama, se realizó un experimento utilizando el Jacinto de agua en una solución de 1 litro, donde la planta logró absorber y remover 5 mg/l de iones metálicos. El estudio indica que la absorción de HgII fue del 15.6% en un lapso de ocho días. Esto demuestra la eficacia de la fitorremediación y sugiere que su implementación es factible. Además, dado que el Jacinto de agua es considerado una planta invasora, su siembra rápida y relativamente económica en el mercado permite adaptarla a diferentes condiciones climáticas y obtener la misma eficiencia en distintas ubicaciones del territorio nacional. (Valderrama & Poma, 2014)

Los estudios han llegado a la conclusión de que la especie *Eichhornia crassipes* tiene una mayor capacidad para eliminar mercurio a medida que aumenta la concentración de este metal. La planta muestra una alta tolerancia a la presencia de mercurio en el ambiente. En otro estudio, utilizando una solución con una concentración de mercurio de 1.2 mg/l, esta especie logró eliminar 0.36 mg/l, lo que representa un porcentaje de acumulación y metabolización del 28%. Por lo tanto, la fitorremediación que utiliza esta planta es factible y podría contribuir a la recuperación de suelos y cuerpos de agua, permitiendo su reincorporación a una vida productiva. (Valderrama & Poma, 2014)

Sin embargo, esta especie de planta puede provocar riesgos ambientales en el territorio nacional debido a que, la especie es invasora y puede crecer rápidamente desplazando a las especies nativas de plantas acuáticas generando una alteración de los ecosistemas acuáticos naturales. Las plantas pueden obstruir ríos, lagos y canales, lo que afecta la calidad del agua y la irrigación. El Jacinto de

Agua puede atrapar sedimentos y materia orgánica en su masa flotante, lo que puede dar lugar a la acumulación de sedimentos en el lecho del cuerpo de agua. Puede llegar a representar un factor tensionante en varios aspectos, como en la biodiversidad, en los cuerpos de agua, en problemas de salud pública, entre otros, debido a la proliferación descontrolada y su naturaleza invasiva pueden generar tensiones y problemas en el entorno ambiental y las comunidades locales. (Valderrama & Poma, 2014)

1.2.2. *Phragmites australis* El Carrizo

Esta planta es una especie introducida que crece en altura y tiene un rizoma grande y leñoso. Sus hojas coriáceas se asemejan a las escamas de los peces y son de color verde opaco, planas y puntiagudas. El tallo puede alcanzar entre 90 y 370 cm de longitud y no tiene ramificaciones. La inflorescencia es una panícula laxa en forma de óvalo, con 3 a 11 flores hermafroditas. Las flores tienen espiguillas a los lados y glumas lanceoladas del mismo tamaño, con de 2 a 6 venas. Las anteras miden hasta 2.5 mm de largo. En resumen, esta planta es perenne, con hojas grandes y planas, un tallo alto y una inflorescencia en forma de óvalo con flores hermafroditas. Esta especie es nativa de las regiones templadas y subtropicales del hemisferio norte, incluyendo Europa, Asia, África del Norte y partes de América del Norte. (Menéndez, 2006)

A esta planta prospera en los bordes de los ríos y forma densas poblaciones. Puede crecer y adaptarse en altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 1500 m. También se encuentra en áreas de lagunas y aguas de flujo lento. Florece desde julio hasta octubre y se clasifica como un geófito. Prefiere crecer en lugares con plena exposición al sol, aunque también puede tolerar algo de sombra. Se adapta a temperaturas moderadamente cálidas, especialmente en áreas montañosas. Tiene una alta tolerancia a suelos encharcados y puede sobrevivir en suelos ligeramente ácidos, con un rango de pH de 4 a 8. Requiere suelos muy ricos en nutrientes, especialmente en fósforo y

potasio. Esta especie se reproduce mediante semillas, pero también puede propagarse a través de estolones y rizomas, e incluso puede experimentar reproducción de semillas sin fertilización. La *Phragmites australis* ha sido utilizada como medida para mitigar y restaurar humedales, así como para estabilizar ecosistemas, flora y fauna. (Menéndez, 2006)

Esta especie de planta puede provocar riesgos ambientales en el territorio nacional como alterar los hábitats utilizados por aves acuáticas, como la destrucción de áreas de anidación y alimentación. Así como también, disminuir la biodiversidad local al crear un monocultivo denso en lugar de hábitats variados y ricos en especies. El crecimiento de *Phragmites australis* puede alterar la calidad del agua al modificar la circulación del agua y acumular sedimentos. Esto puede tener un impacto negativo en la ecología acuática y en la calidad del agua. (Menéndez, 2006) Sin embargo, para evitar que esta planta ocasione otros problemas ambientales en el territorio nacional se debe llevar a cabo una evaluación exhaustiva de la idoneidad de la planta para el contexto colombiano, considerando factores como el clima, el suelo y la presencia de contaminantes específicos en las áreas objetivo de remediación. Esta evaluación inicial servirá como base para determinar dónde y cómo se puede implementar mejor la fitorremediación utilizando *Phragmites australis*. Una vez identificadas las ubicaciones potenciales, se debe proceder con cautela en la selección de los sitios piloto, priorizando aquellos que presenten contaminación significativa pero que estén lo suficientemente alejados de ecosistemas frágiles o áreas protegidas. (Menéndez, 2006) Durante la implementación de la fitorremediación, se deben establecer protocolos de monitoreo continuo para evaluar el desempeño de *Phragmites australis* en la remediación de contaminantes. Esto incluiría la medición regular de parámetros ambientales como la calidad del suelo y del agua, así como la observación de cualquier efecto adverso en la flora y fauna nativa. Se necesitarán estudios adicionales para comprender mejor la interacción de la planta con el medio ambiente local, así como

para mejorar las técnicas de fitorremediación y optimizar su eficacia en la eliminación de contaminantes. (Menéndez, 2006)

Las raíces de *Phragmites australis* tienen la capacidad de filtrar y absorber contaminantes del agua y del suelo. Este proceso se basa en la interacción física entre las raíces de la planta y los contaminantes disueltos en el agua o presentes en el suelo. El crecimiento denso de *Phragmites australis* en humedales puede ayudar a retener sedimentos y partículas en suspensión, lo que contribuye a la mejora de la calidad del agua al reducir la turbidez y la erosión. Los microorganismos que se encuentran dentro de la rizosfera de esta especie pueden desempeñar un papel importante en la descomposición de contaminantes orgánicos, la transformación de metales pesados y la mejora de la calidad del suelo y del agua. Algunas cepas de *Phragmites australis* tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico en asociación simbiótica con bacterias diazótrofes. Esto puede mejorar la fertilidad del suelo en entornos degradados. (Menéndez, 2006)

1.2.2.1. Taxonomía

En la tabla 3, se observa la taxonomía de la planta *Phragmites australis* (El Carrizo), con su respectivo reino, división, clase orden, entre otros.

Tabla 3. Taxonomía planta *Phragmites australis*

Orden	<i>Cyperales</i>
Familia	<i>Poaceae</i>

Subfamilia	<i>Arundinoideae</i>
Género	<i>Phragmites</i>
Especie	<i>Phragmites australis</i>

Nota: Información de la taxonomía de la planta *Phragmites australis*. Adaptado de “*Phragmites australis*”, por Menéndez, J., 2006

(<https://www.asturnatura.com/especie/phragmitesaustralis.html>)

1.2.2.2. Absorción de mercurio de *Phragmites Australis*

El artículo científico "*Remoción de mercurio mediante Phragmites australis empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes ametales pesados*" de los autores Amabilis, Siebe, Moeller y Durán (2016), examina cómo se distribuye el mercurio en esta planta a través de barreras biológicas en sustratos húmedos artificiales para tratar aguas residuales de la industria aurífera. El estudio utilizó una solución de agua residual que contenía 0.11 mg/l de mercurio, y después de 304 días, la planta *Phragmites* removió el 73% del total de este metal pesado. La eliminación del mercurio ocurre principalmente a través de las hojas, donde el ion es liberado en formas más simples hacia la atmósfera mediante procesos como la translocación y la transpiración. (Amabilis et al., 2016). Se crearon seis humedales artificiales plantados con carrizos, y de estos, tres se sembraron con bacterias capaces de tolerar metales pesados, mientras que los otros tres no recibieron dicha inoculación. Según investigaciones previas realizadas por Salgado Bernal en 2012, durante 304 días, se introdujo agua neutra con una sustancia similar a aguas residuales, junto con la adición de 0.11 mg/l de mercurio. Después de este período, las plantas se extrajeron y se secaron a 70 °C durante 24 horas. Luego se pulverizó el material y se realizaron análisis mediante digestión ácida. Los resultados de esta investigación indicaron que las plantas absorbieron un total de 33.94 mg de mercurio, de los cuales 11.14 mg se bioacumularon con la

ayuda de las bacterias del género *Bacillus*, que provienen de estudios previos a esta investigación. Esto se debe a los ácidos carboxílicos y exudados radicales presentes en la planta, que permiten la entrada del mercurio a través de la raíz y su membrana, y luego su transporte hacia el rizoma. Estas sustancias son posteriormente precipitadas en la vacuola y transportadas a través de la xilema hacia el tallo y finalmente a las hojas. En este último proceso, el metilmercurio se volatiliza y se libera a la atmósfera mediante la gasificación vegetal. El estudio observó que la bioacumulación fue mayor en las raíces y las hojas en comparación con los tallos. Por lo tanto, esta planta se considera efectiva para la recuperación de aguas residuales contaminadas con mercurio debido a su capacidad de translocar los iones de metal pesado y volatilizarlos constantemente en sus hojas. Este sistema propio de la especie ayuda en la desintoxicación y depuración de las aguas. (Amabilis et al.,2016).

1.2.3. *Cecropia peltata* El Yarumo

La *Cecropia peltata*, también conocido como Guarumo o Yarumo, es un árbol que se encuentra principalmente en la zona tropical de América del Sur. Es típico de climas cálidos, pero también puede adaptarse a altitudes superiores a los 2000 metros sobre el nivel del mar. Se encuentra en laderas de montañas de altitud media a alta, donde predominan los ecosistemas nublados y los sistemas caducifolios. (Naturalista, 2018)

Esta especie de árbol alcanza alturas que van desde los 6 hasta los 32 metros. Su tronco es recto y con el tiempo desarrolla raíces zancudas. La corteza es lisa y generalmente de color grisáceo. En las ramas y yemas, se encuentran lenticelas en abundancia, que son protuberancias en la corteza que permiten el intercambio de gases. Las hojas de este árbol son peltadas, lo que significa que están unidas al pecíolo en el centro, y tienen una forma redonda con lóbulos divididos que varían entre 8 y 12 en número. El diámetro de las hojas es de aproximadamente 32 a 40 cm. (Naturalista, 2018)

Esta planta es dioica, lo que significa que tiene flores masculinas y femeninas en árboles separados.

Las flores masculinas se encuentran en espigas agrupadas de 20 a 40 y miden alrededor de 6 centímetros de longitud. Por otro lado, las flores femeninas solo tienen 4 inflorescencias en forma de amentos. La planta produce frutos pequeños y carnosos que atraen a aves y mamíferos. Una característica inusual se observa en el pigmento de las hojas de las poblaciones que se encuentran por encima de los 2500 metros de altitud. Estas hojas adquieren un efecto similar al color blanco, lo que las hace distinguibles a larga distancia. Este efecto óptico se debe a la densa capa de pelos que cubren toda la hoja y difractan la luz que incide sobre ellas. (Naturalista, 2018)

El árbol Yagrumo es altamente valioso para la reforestación y la recuperación de suelos debido a varias razones. En primer lugar, su rápido crecimiento permite una restauración más rápida de los ecosistemas. Además, el Yagrumo es extremadamente adaptable y puede crecer en una variedad de condiciones, incluyendo áreas degradadas o abandonadas. Lo notable es que esta especie se propaga por sí misma sin necesidad de intervención humana, lo que la convierte en una opción ideal para la revegetación natural. El Yagrumo tiene raíces superficiales y una vida relativamente corta, pero esto no disminuye su importancia. De hecho, esta especie se considera valiosa en investigaciones y prácticas de biotecnología, biorremediación y fitorremediación. Sus características le permiten jugar un papel significativo en la restauración de ecosistemas dañados y la limpieza de suelos contaminados. (Naturalista, 2018)

1.2.3.1. Taxonomía

En la tabla 4, se observa la taxonomía de la planta *Cecropia peltata* (El Yarumo), con su respectivo reino, división, clase orden, entro otros.

Tabla 4. Taxonomía planta *Cecropia peltata*

Orden	<i>Rosales</i>
-------	----------------

Familia	<i>Urticaceae</i>
Género	<i>Cecropia</i>
Especie	<i>Cecropia peltata</i>

Nota: Información de la taxonomía de la planta *Cecropia peltata*. Adaptado de “*Cecropia peltata*”, por Sub Unidad Ambiental, 2022

(<https://www.cimat.ues.edu.sv/subunidadambiental/2022/11/08/flora-especie-15/>)

1.2.3.2. Absorción de mercurio de *Cecropia peltata*

De acuerdo con los estudios e investigaciones realizadas por Jhon Vidal Durango sobre la capacidad de la planta *Cecropia peltata* para fitorremediar suelos contaminados con mercurio en el sur de Bolívar, se tomaron muestras de raíces, tallos y hojas. Se analizaron tres variables: la concentración de mercurio en el suelo, el tiempo de crecimiento de la planta y la presencia de agentes quelantes en la bioacumulación de mercurio en las tres partes de la planta estudiada. Los análisis de mercurio total (HgT) en el suelo se realizaron utilizando el método de Espectrofotometría de Absorción Atómica por Vapor en Frío. Los resultados de las muestras de HgT revelaron que el suelo con una baja contaminación presentaba una concentración de 4247,6 µg/kg con un pH de 4,51. Por otro lado, el suelo ligeramente más contaminado mostraba una concentración de 6907,8 µg/kg con un pH de 3,7. (Durango, 2009)

Una vez sembrada y en una etapa de desarrollo avanzado de 4 meses, se tomaron muestras de diferentes partes de la planta *Cecropia peltata* para analizar las concentraciones de mercurio. Según los resultados obtenidos por Durango, se concluyó que la parte de la planta que más absorbe y bioacumula mercurio son las raíces, seguidas de las hojas y, por último, el tallo. Este comportamiento indica que las raíces están directamente expuestas al mercurio y actúan como una

barrera para evitar la intoxicación del resto de la planta. Esto se debe a la segregación de fitoquelatinas que se unen al ion de mercurio, impidiendo su translocación al tallo. Es importante destacar que las hojas son el receptor final del mercurio, lo que explica la mayor acumulación en esta parte de la planta. Además, en las hojas ocurre la oxidación del mercurio en forma de Hg^{+2} a Hg^0 , evitando así la toxicidad y el daño vegetal. Este proceso se lleva a cabo en las vacuolas de las hojas y posteriormente se produce la fotovolatilización del mercurio. Es interesante señalar que la planta también puede capturar mercurio en forma de Hg^0 presente en la atmósfera a través de las estomas. El estudio también indica que la presencia de sustancias quelantes no influye en una mayor absorción del metal pesado por parte de la planta. (Durango, 2009)

Debido a la gran cantidad de biomasa que esta planta tiene en sus raíces, es altamente efectiva en la fitorremediación y puede acumular y procesar cantidades significativas de mercurio en suelos altamente contaminados. Durante un período de cuatro meses, esta especie demostró una habilidad de remoción del 33.7%, lo que sugiere que a lo largo de su vida puede acumular y fotovolatilizar una cantidad aún mayor de mercurio. Por lo tanto, esta planta se considera una opción de fitorremediación altamente viable, ya que cumple con las diversas condiciones climáticas del país y tiene una capacidad excepcional para absorber el metal pesado del mercurio. Es una opción prometedora para la rehabilitación de suelos contaminados, gracias a su alta capacidad de acumulación y procesamiento del mercurio. (Durango, 2009)

Luego del análisis y estudio de la bibliografía, se tiene en cuenta que para las características de los diferentes climas en el territorio nacional, los resultados en laboratorio de cada planta y la factibilidad de recuperar entornos ecosistémicos (ver figura 5), la *Cecropia Peltata* representa una solución a tener en cuenta para comenzar estudios prácticos y aplicados en las zonas de alta contaminación con mercurio en los municipios del país de clima templado donde el impacto por el

ion tiene consecuencias devastadoras para la microbiología del suelo. Esta planta presenta un mayor registro de absorción del ion de mercurio ya que su anatomía se caracteriza por el gran tamaño que alcanza sus raíces, tallo y hojas, por lo que posee un organismo más amplio para descontaminar y absorbe el metal pesado (ver figura 5), ya que como describe Durango en sus experimentos de campo, posee la habilidad de remoción en cuatro meses de 33.7%. (Durango,2009). Este proceso lo realiza gracias a la segregación de fitoquelatinas que cuenta con la capacidad de unirse con el ion de mercurio y no permite que suceda una translocación al tallo, es decir, que circule a través de la xilema de la longitud del tallo, sino que se transporte directamente a las hojuelas. Ahora bien, como el receptor final son las hojas, según lo investigado en los artículos, se reitera que, en esta parte de la planta, la bioacumulación y tratamiento del ion de mercurio, donde sucede la reducción y oxidación de Hg^{+2} a Hg^0 , sucede en las hojas, lo cual evita la toxicidad y daño vegetal, este proceso es encargado a nivel celular por las vacuolas, para luego ser fotovolatilizado por medio de las estomas donde es liberado en un gas no letal a la atmosfera. (Durango, 2009)

También, según la bibliografía, es una planta con un alto valor ecosistémico debido a que reincorpora elementos de flora y fauna donde se encuentre, ya que como es una planta fanerógama y se caracteriza por ser una especie gimnospermas, donde el método dispersión de los propágulos es por medio de la zoocoria, donde el animal transporta las semillas al comer ésta como alimento. Así pues, es ideal en el momento de recuperar estos suelos porque atrae más individuos que ayudan a regar las semillas y recubrir los suelos, agregando nutrientes y microorganismo que no existen allí, comenzando a impactar positivamente el deterioro que se encuentra en los suelos por la actividad antrópica expuesta por la minería. (Durango, 2009) En la figura cinco se identifican las plantas óptimas para absorción de metales pesados en el territorio colombiano, las cuales poseen una capacidad de adaptación al medio, y su condición es favorable para cualquier tipo de clima,

asegurando el bienestar del ecosistema.

Figura 5. Recopilación información sobre fitorremediación.

Jacinto de Agua (<i>Eichornia crassipes</i>)	El Carrizo (<i>Phragmites australis</i>)	El Yarumo (<i>Cecropia peltata</i>)
		
Tomado de: https://www.mundodeportivo.com/uncoma/hogar/articulo/como-cuidar-un-jacinto-de-agua-en-casa-48532.html	Tomado de: https://www.alamy.es/foto-phragmites-australis-reed-comun-habitat-tipico-de-poco-avetoro-52722598.html	Tomado de: https://rosalandia.com/varios/guaruma
La absorción fue de un 15.6% para el Hg II en un lapso de ocho días en una solución de litro.	El caldo usado en el proyecto con agua residual ha incorporado 0.11 mg/l de mercurio donde la planta Phragmites luego de 304 días, han removido el 73% del metal pesado total.	La habilidad de remoción de esta especie para cuatro meses fue del 33.7%

Nota: Elaboración propia.

Cabe resaltar que las otras especies encontradas en el estudio como lo es la *Eichornia Crassipes* (ver tabla 3), la cual fue objeto de estudio en 5 de los 20 artículos seleccionados, también es eficiente en la fitorremediación, removiendo cerca del 70% al 80 % del mercurio en los suelos contaminados. Según el estudio de Ana Valderrama, al experimentar con esta especie en una solución de 1L mezclado con HgII, donde la planta logró absorber y remover 5 mg/l de iones metálicos. El estudio indica que la absorción de HgII fue del 15.6% en un lapso de ocho días, esto demuestra la eficacia de la fitorremediación y sugiere que su implementación es factible. Además, dado que el Jacinto de agua es considerado una planta invasora, su siembra rápida y relativamente económica en el mercado permite adaptarla a diferentes condiciones climáticas y obtener la misma eficiencia en distintas ubicaciones del territorio nacional, sin embargo, en este trabajo se indicó algunas sugerencias para el uso segura de la planta evitando otros problemas ambientales. (Valderrama & Poma, 2014). Del mismo modo y no menos importante, mencionada en 4 de los artículos seleccionados y con una capacidad de absorción de más del 50% de ion de Hg, está la planta

Phragmites se coloca en un contenedor con una solución de agua residual que contenía 0.11 mg/l de mercurio, y después de 304 días, la planta *Phragmites* removió el 73% del total de este metal pesado. La eliminación del mercurio ocurre principalmente a través de las hojas, donde el ion es liberado en formas más simples hacia la atmósfera mediante procesos como la translocación y la transpiración. (Amabilis et al., 2016).

De acuerdo con lo anterior, las tres plantas según los resultados son excelentes receptoras del ion de Hg. Por el número de artículos, la planta base de estudio más utilizada es la *Eichornia Crassipes*, y sus investigaciones resultan alentadores por los números expuestos de adsorción, hay que resaltar que las otras plantas no son menos importantes y que una combinación de las tres, podría dar una mejor respuesta a la hora de recuperar suelos impactados, mejorando la ecología del lugar y las condiciones de accesibilidad a este por la disminución de la toxicidad que representa el mercurio para los humanos. Ahora bien, se tiene la expectativa que las especie mencionadas logren una mayor remoción de los contaminantes, y que, una vez escogido el lugar para la fase experimental, los parámetros sean similares a los del experimento expuesto con cada una de las especies.

Es importante recordar que la revegetalización que implica la fitorremediación se debe hacer por fases en un evento experimental para no causar disturbios en el ecosistema existente. (U, Nacional. 2017)

Conclusiones

- Según la revisión bibliográfica encontrada sobre la aplicación de la fitorremediación en Colombia, como una estrategia eficaz para la recuperación de suelos contaminados con mercurio encontramos que hay poca información e investigación sobre este tema de la fitorremediación. De acuerdo con lo investigado, estos tipos de proyectos de recuperar suelos contaminados por

mercurio son relevantes y puede ser la solución a los problemas de contaminación que existen en la realidad del país por la actividad minera en el territorio nacional colombiano, con el fin de proporcionar una estrategia para descontaminar de forma sostenible al ecosistema y a su población. Es por esto por lo que, se quiere resaltar las evidencias bibliográficas existentes en el país con este trabajo..

- En la investigación se encontró tres tipos de plantas para utilizarlas como base fitorremediadora, las cuales son: el Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), el carrizo (*Phragmites australis*) y el yarumo (*Cecropia peltata*), donde las tres plantas poseen una característica de absorción de más del 50% de metales pesados de las muestras utilizadas. Esta acumulación se realizó mayoritariamente en los tallos y hojas de cada planta. Así entonces, se demuestran una capacidad alta para absorber metales pesados del ion de mercurio, dando una posible solución a los problemas ambientales en los suelos donde practican la minería aurífera.
- Del mismo modo la investigación sobre la información recopilada sobre el impacto positivo de la fitorremediación en la recuperación de suelos contaminados por mercurio en Colombia, se establece como un método de gran avance en la descontaminación de suelos por mercurio, considerando parámetros como la concentración de mercurio absorbido, la calidad del suelo, la biodiversidad de poblaciones biológicas y microbiológicas, con el propósito de dar soluciones integrales ecosistémicas y validar su efectividad y sustentabilidad en la población, lo cual lo demuestra esta investigación.
- En los resultados de los artículos evaluados, se concluye que la fitorremediación para ser más efectiva y ayudar a la absorción del Ion de Hg por las tres especies, es necesario que la planta cuente con un complemento de bacterias beneficiosas o sustancias químicas, para aumentar la capacidad de remoción y eficiencia, como también demore menos tiempo en la acumulación de

mercurio en las diferentes partes de la anatomía de la planta , así aumentando la efectividad del proceso de absorción de metales pesados de Ion de Hg y mejore la microbiología del suelo.

- Gracias a las nuevas disposiciones de las leyes colombianas, el recurso normativo genera los métodos y las facilidades para instaurar este tipo de proyectos en las zonas impactadas del país, donde las autoridades ambientales ven viables estos tipos de tecnología biológica como la fitorremediación para hacer frente a los problemas ambientales ocasionados por la minería y que son importantes atender y resolver de la mejor manera.

Recomendaciones

- Es necesario la incorporación de artículos indexados internacionales al proyecto, y así comparar que plantas usan y si se pudieran adaptar al territorio nacional, como también si existe nuevos avances científicos o de laboratorio en la absorción de metales pesados del ion de mercurio para incorporar en el trabajo investigativo.

- Luego de la investigación de fitorremediación en el territorio nacional sobre absorción de mercurio por medio de la fitorremediación es necesario comenzar la implementación de estas plantas en zonas con suelos impactados con mercurio debido a la explotación aurífera. Así comenzar con pruebas piloto e investigar la efectividad de este método fitorremediador.

Bibliografía

- ADEL-FIAES. (2014). *Investigación de la caracterización del Jacinto de Agua Eichornia crassipes del humedal Cerrón Grande, para determinar su aprovechamiento como materia prima para la elaboración de productos agroindustriales, industriales o artesanales*. Chalatenango, El Salvador Centro América, 86 pp.
https://issuu.com/andyubiraci/docs/caracterizaci_n_del_jacinto_de_agu
- Aguayo, C. (2015). *Determinación de la acumulación de los metales pesados plomo, Cadmio y Cromo en la planta Pistia stratiotes conocida como lechuga de agua*. [Trabajo de grado

- para Pregrado, Universidad Icesi, Santiago de Cali]. Repositorio ICESI. https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/78790/1/TG01084.pdf
- Agudelo, L. (2005). *Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos*. Corporación Universitaria Lasallista. 2(1), 57-60. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520110.pdf>
- Alba. (2020). *¿Cómo resisten las plantas al mercurio del suelo?* Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, España. <https://www.cells.es/es/actualidad/noticias/como-resisten-las-plantas-al-mercurio-del-suelo>
- Alipi, A. (2018). *Conabio. Sitio de malezas México*. Diversidad biológica y Cultural. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/home-malezas-mexico.htm>
- Ambientum. (2021). *Diccionario de términos ambientales*. El portal profesional del medio ambiente. <http://www.ambientum.com/diccionario/listado/diccionario.asp?letra=a>
- Amabilis, L. Siebe, C., Moeller, G., Durán, M. (2016). *Remoción de mercurio por phragmites australis empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes ametales pesados*. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. México. Rev. Int. Contam. Ambie. 32 (1), 47-53. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v32n1/0188-4999-rica-32-01-00047.pdf>
- ANM. (2022). *Así es nuestra Colombia minera*. Bogotá, Colombia. Agencia Nacional de Minería. <https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-nuestra-Colombia-minera#:~:text=De%20las%20114%20millones%20de,%2C%20y%201.1%25%20en%20explotaci%C3%B3n>
- Aparicio, M. (2023). *Biorremediación. El uso de organismos para retirar contaminantes ambientales*. Inesem, Business School. Canal Biosanitario. <https://www.inesem.es/revistadigital/biosanitario/biorremediacion/>
- Ayala, J., Cabrera, M. (2019). *Diagnóstico de la información ambiental y social respecto a la actividad minera y la extracción ilícita de minerales en el país*. Bogotá, Colombia. <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/2-diagnostico-actividad-minera-y-explotacin-ilicita-expertos.pdf>
- Brodkin, E., Copes, R. (2007). *Lead and mercury exposures: interpretation and action*. Canadian Medical Association. 176: 59-63.
- Buelvas, A. A., Rodríguez, G. A. (2017). *Capacidad de la ACACIA MANGIUM como planta fitorremediadora de suelos contaminados con Mercurio*. [Trabajo de grado para Pregrado]

Ingeniería Ambiental, Universidad de Córdoba]. Repositorio UNICORDOBA.
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstreams/1da0aaac-5266-4c90-a085-7f182855927e/download>

- Bustamante, P., Daza, A., Bustamante, M. (2018). *Flotación flash de oro nativo grueso utilizando ditiofosfatos y ditiocarbamato como reemplazo de la amalgamación tradicional*. III Congreso internacional de flotación de minerales. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. https://www.researchgate.net/publication/325651096_Flotacion_flash_de_oro_nativo_grueso_utilizando_ditiofosfatos_y_ditiocarbamato_como_reemplazo_de_la_amalgamacion_tradicional
- Cabo, L., Faggi, A., Miguel, S., Basílico, G. (2019). *Rehabilitación de las riberas de un sitio de la cuenca baja del río Matanza-Raichuelo*. Biología Acuática 33. Universidad de la Plata, Argentina.
- Cano, S. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomédica: Instituto Nacional de Salud*. 32. (3), 3-5. <http://www.scielo.org.co/pdf/bio/v32n3/v32n3a01.pdf>
- Camps, A. (2001). *La problemática del Selenio en los suelos contaminados del estado de California (E.E.U.U.)*. Edafología. 8, 31-44. <https://www.secs.com.es/data/Revista%20edafo/partes%20volumen%208-2/pagi>
- Carvajalino. (2021). *Proyecto eliminar el mercurio en la minería pequeña y subsistencia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/?s=Mercurio>
- Casallas, J. (2015). *Fitorremediación in situ para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados (plomo y cadmio) y evaluación de selenio en la finca furatena alta en el municipio de utica (Cundinamarca)*. [Trabajo de grado para Pregrado, Universidad Libre]. Repositorio Unilibre. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7958/Fitorremediacion%20in%20situ%20para%20la%20remocion%20de%20metales%20pesados%20%28plomo%20y%20cadmio%29%20y%20evaluacion%20de%20sel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chitiva, L. (2021). *Estudio de procesos de fitorremediación aplicado en suelos contaminados con hidrocarburos por el desarrollo de actividades de la EDS*. [Trabajo de grado para pregrado, Universidad Antonio Nariño, Bogotá]. Repositorio UAN. http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/5767/1/2021_LinaChitiva.pdf
- Clemente, J., Medina, J., Pfuño, J., Pariona, L. y Gutierrez, P. (2021). *Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (Helianthus annuus)*. Universidad Nacional de Colombia. 2. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4YxqvqQ7/>
- Coral, P. y Gómez, L. (2017). *Evaluación de la eficiencia de la especie Heliconia psittacorum en*

- la remoción de mercurio proveniente de los efluentes mineros en un entable de Suárez Cauca. [Trabajo de grado para Pregrado, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca]. Repositorio Uniautónoma. <https://repositorio.uniautonomo.edu.co/bitstream/handle/123456789/18/T%20IA-M%20052%202017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Delgadillo, A., Gonzalez, C., Prieto, F., Villagómez, J. & Acevedo, O. (2011). *Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación*. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 14, 597-612. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Decreto 1666 de 2016- Gestor Normativo, para el sector Administrativo de Minas y Energía. Ministerio de Minas y Energías. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77883>
- Díaz, S. y Sierra C. (2017). *Fitorremediación con Artemisia absinthium y Lupinus pubescens Benth. Como alternativa para la descontaminación de ecosistemas andinos y altoandinos amenazados por metales pesados*. [Trabajo de grado para Magister, Universidad Jorge Tadeo Lozano]. Repositorio Utadeo. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/2397/Tesis%20Maestria%20en%20Ciencias%20Ambientales%20Sandra%20Milena%20Diaz%20Vargas%20C%20Claudia%20Helena%20Sierra%20Nova.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Díaz, L., Vidal, J. y Marrugo, J. (2017). *Evaluación de la capacidad acumuladora de la leguminosa Gliricidia sepium en suelos contaminados por mercurio (Hg)*. Universidad de Córdoba. Memorias III Seminario Internacional de Ciencias Ambientales SUE-Caribe. 3, 184-187. https://mca.edu.co/wp-content/uploads/2019/09/m2017_48.pdf
- Domínguez, M., Gómez, S. y Ardila, A. (2016). *Phytoremediation of mercury in wastewater form themining industry*. UG Ciencia, 22, 227-237.
- Durango, J. (2009). *Capacidad del guarumo (cecropia peltata) como planta fitorremediadora de suelos contaminados con mercurio*. [Trabajo de grado para Magister, Universidad de Cartagena]. Repositorio Unicartagena. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/921/Proyecto%20de%20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Espinosa, L. (2015). *La minería ilegal afecta a 307 municipios del país*. Diario La República. <https://www.larepublica.co/economia/la-mineria-ilegal-afecta-a-307-municipios-del-pais-2311591>
- Garbisu, C., Becerril, J., Epelde, L., & Alkorta, L. (2007). *Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador*. Ecosistemas, revista científica de ecología y medio ambiente, 16 (2). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/127>

- Gómez, C. y Guarín, S. (2020). *Evaluar el efecto del proceso de fitorremediación con Eichornia Crassipes en un agua cianurada mediante cromatografía de gases*. [Trabajo de grado para pregrado. Universidad Católica de Manizales]. Repositorio UCM. <https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/2800/1/Camila%20G%C3%B3mez%20Guti%C3%A9rez.pdf>
- González, L. (2020). *Fitorremediación a escala piloto de suelos contaminados con mercurio y cobre usando Jatropha Curcas L en la zona minera el Alacrán*. Universidad de Córdoba. [Trabajo de grado para Magister, Universidad de Córdoba]. Repositorio Unicordoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/fd448a22-38c0-4116-8441-aa4925134fc2>
- Greenfacts Facts on Helath and the Evironment. (s.f.). *Mercurio*. <https://www.greenfacts.org/es/mercurio/n-3/mercurio-1.htm>
- Herrero, J., Medina, N., Gonzales, L., Velásquez, J., Rivero, D., Sourd, D., Martínez, F., Rodríguez, J. (2012). *La biotecnología como herramienta para la propagación, conservación y el mejoramiento genético del guayabo*. Revista Colombiana Biotencol, 14(2), 7-19. <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v14n2/v14n2a02.pdf>
- Jaramillo, M. C., Zapata, L., Marulanda, L. (2015). *Fitorremediación de mercurio a partir de elodae sp*. Ingenierías USBMed, 6(2), 42-45. <https://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/1730>
- López, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, J. & Acevedo, O. (2011). *Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación*. Tropical and Subtropical Agroecosystemns, 14 (1), 597-612. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- López, S., Gallegos, M., Pérez, L. y Gutiérrez, M. (2005). *Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticos*. Revista Int. Contam. Ambient., 21 (2), 91-100. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v21n2/0188-4999-rica-21-02-91.pdf>
- Madera, C., Peña, E., Solarte, J. (2014). *Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios*. Ingeniería y Competitividad, 16 (2), 179 – 188. <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v16n2/v16n2a16.pdf>
- Marnane, I. (2021). *El mercurio, una amenaza persistente para el medio ambiente y la salud*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/es/articles/el-mercurio-una-amenaza-persistente#:~:text=El%20mercurio%20est%C3%A1%20presente%20de,no%20presenta%20ning%C3%BA%20riesgo%20significativo>

- Mateus, L. (2020). *Cuantificación de metales pesados en arándanos (Vaccinium corymbosum) cultivados en dos fincas ubicadas en Villapinzón y Sibaté*. [Trabajo de grado para pregrado, Universidad del Bosque]. Repositorio Unbosque. https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/5728/Mateus_Suarez_Laura_Valentina.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Menéndez, J. (2006). *Phragmites australis*. Asturnatura, 72. <https://www.asturnatura.com/especie/phragmites-australis.html>
- Meza, O. (2022). *Evaluación de la remoción del Magnesio de aguas superficiales para abastecimiento en zonas rurales utilizando la planta macrófita Eichhornia crassipes (Mart.) Solms-Laubach, conocida como Jacinto de Agua*. [Trabajo de grado para Magister, Universidad del Norte de Barranquilla]. Repositorio Uninorte. <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10954/25998947.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Minambiente. (2022). *Mercurio*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/mercurio/#:~:text=El%20mercurio%20existe%20naturalmente%20en,volc%C3%A1nicas%20y%20meteorizaci%C3%B3n%20de%20rocas>
- Minambiente. (2018). *Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Diagnostico_de_la_informacion_ambiental_y_social_respecto_a_la_actividad_minera_y_la_extraccion.pdf
- Montes, N., Quintero, H. y Vásquez, A. (2021). *Biorremediación de suelos contaminados con mercurio en el Bajo Cuaca Antioqueño*. [Trabajo de grado para pregrado, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia]. Repositorio Unab. https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/22819/2021_Articulo_Quintero_Hector.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mora, G. (2023). *Estado actual de la minería en Colombia y la identificación de impactos*. [Trabajo de grado para pregrado, Universidad Libre]. Repositorio Unilibre. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/25485/Estado%20actual%20de%20la%20Miner%C3%ADa%20en%20Colombia%20y%20la%20identificaci%C3%B3n%20de%20impactos.pdf?sequence=1>
- Morante, A. (2017). *Colombia: Subcampeón mundial en el mercurio de la minería ilegal*. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/mineria-ilegal-y-produccion-de-mercurio-en-colombia-85856>

- Moreno, F., Méndez, E., Quilcat, V., Paredes, F., Sánchez, N. y Arévalo, F. (2022). *Cuantificación de Cu, Pb, As y Cd absorbidos por el “girasol” Helianthus annuus L. (Asteraceae) presentes en suelos agrícolas contaminados por relaves mineros*. Arnaldoa, 29 (1). http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2413-32992022000100119
- Naturalista. (2018). *Yarumo. Cecropia Peltata*. California Academy of Sciences. National Geographic Society. <https://colombia.inaturalist.org/taxa/284772-Cecropia-peltata>
- Nogales, B. (2005). *Microbiología del suelo en la era de la biología molecular: Descubriendo la punta del iceberg*. Ecosistemas, 14 (2), 1-10. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/153>
- Novillo, C. (2022). *Cuáles son los ecosistemas de Colombia*. Ecología verde. <https://www.ecologiaverde.com/cuales-son-los-ecosistemas-de-colombia-2012.html>
- Oller, J. (2003). *Elementos teórico-prácticos útiles para comprender el uso de los motores de búsqueda en Internet*. ACIMED, 11 (6). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352003000600007
- Ortiz, H., Trejo, R., Valdez, R., Arreola, J., Flores, A., López, B. (2009). *Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (Amaranthus hybridus L.) y micorrizas*. Chapingo Serie Horticultura, 15 (2), 161-168. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2009000200009
- Osti, C.L., Reyes, L.L., Victoria, E.D. (2004). *Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: Una revisión*. Terra Latinoamericana, 22 (2), 225-239. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57322211.pdf>
- Oyarzun, R., Higuera, P. & Lillo, J. (2011). *Minería Ambiental: Una introducción a los impactos y su remediación*. Ediciones GEEM. https://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/Libro_Mineria_MA.pdf
- Parry, W. (2023). *Donde aumento el cancer infantil, algunos quieren que la tierra contaminada quede vacía*. Los Ángeles Time en Español. <https://www.latimes.com/espanol/eeuu/articulo/2023-03-15/donde-aumento-el-cancer-infantil-algunos-quieren-que-la-tierra-contaminada-quede-vacia>
- Perdomo, A., Velasco, M., Cortés, M., Gallo, J. y Franco, R. (2016). *La fitorremediación como estrategia para reducir impactos del mercurio en agua: un microproyecto de educación en química verde*. Escritos sobre la Biología y su enseñanza, número extraordinario, 106-116. <https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/bio-grafia/article/view/6325/5256>

- Pérez, V., Ramírez, G., Ardila, M., Polo, M., Toro, H., Suárez, L., Rivas, E. (2012). *Minería de Hecho en Colombia*. Defensoría del Pueblo Colombia. https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/F11B784C597AC0F005257A310058CA31/%24FILE/La-miner%C3%ADa-de-hecho-en-Colombia.pdf
- Pinzón, C. Fajardo, C. (2108) *Impacto del mercurio en los ecosistemas colombianos y las técnicas aplicables para su biorremediación*. ECAPMA Working Paper, 2 (1). <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2774>
- Portafolio. (2021). *Leche, lima, carne, mango y aguacate, líderes en exportaciones de agro*. Diario Portafolio. <https://www.portafolio.co/economia/que-productos-exporta-colombia-en-2021-553843>
- PMGRD, Plan de Manejo de Gestión del Riesgo de Desastres. (2015). *Municipio de Marmato Caldas*. Consejo Municipal para la gestión del Riesgo y Desastres. https://caldas.gov.co/index.php/component/easyfolderlistingpro/?view=download&format=raw&data=eNpFT8tugzAQ_BXLP1ww7iNtNlwnFKxIVR0qQs6RWxZiCQKynTZV1X_vGoN6snceO7MahIAfByvgzdDVaPnGgbgH3mNtdPJcInO5k-UECuBXhzbK3AQBtXeqvaLz_yuegJ9OExam52i96B7DmAIPzyqipuYbA2k0WexG7c-BfiA-2Rb7w_G1ylhebI9K7qviwN7UrszZN5OqlOwuFetEZaXKqmKOakyHS5SgrKhcJ-FjQOg2vPn5N9bN3BZvo7HolirBp73XH-ceL6R-B0HomhwWPw1-xSupYTsMbUdRv3_iS2Lk
- PNUMA. (2002). *Evaluación mundial sobre el mercurio*. Naciones Unidas. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/12297/final_assessment-report-Nov05-Spanish.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- PNUMA. (2021). *El convenio de Minamata sobre el Mercurio, tres años de protección de la salud humana y el medio ambiente*. Programa para el medio ambiente. Naciones Unidas. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-convenio-de-minamata-sobre-el-mercurio-tres-anos-de-proteccion>
- Ramírez A. (2008). *Intoxicación ocupacional por mercurio*. *American college enviroment medicine*. Anales de la Facultad de Medicina, 69 (1), 46-51. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-55832008000100010
- Riopedre, T., Delgado, A., Cabrera, J., Cartaya, O. (2021). *Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares*. *Cultivos Tropicales*, 42 (4). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362021000400014
- Rivas, J. (2021). *Potencial fitorremediador de macrófitas en cuerpos de agua contaminados con mercurio remanentes de la minería (Pozas) en el departamento del Chocó-Colombia*. [Trabajo de grado para Magister, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Unal. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/83774/1076820352.%202022.pdf?se>

[quence=4&isAllowed=y](#)

- Rodríguez, A., Montalvo, J., Rosero, J. (2021). *La extracción minera y la gestión empresarial sostenible en Colombia en el periodo 2010-2020*. Revista Boletín Redipe. 10 (13), 714-733
<https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/1783/1698>
- Rosas, I., Rodríguez, M. (2008). *Fitoextracción de metales pesados presentes en sedimentos contaminados utilizando Eucaliptus globulus*. [Trabajo de grado para maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Uniandes.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9946/u336396.pdf?sequence=1>
- Salamanca, A., Silva, A., Cardozo, J., Rojas, J., Meléndez, J., Borda, J. (2023). *Fitorremediación con Brassicaceae y Apiaceae en suelos contaminados con metales pesados*. Revista de Biología Tropical, 71 (1), e51493.
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442023000100017
- Sampieri, R., Fernandez, C., Baptista, P. (2018). *Metodología de la investigación*. McGRAW-HILL Interamericanaeditore, Vol. 6, 102-256. <https://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1M7BV0046-FSY1Y8-1PHY/Yarliz%20Mora.pdf>
- Sanchez, K. (2020). *Implementación de fitorremediador con especies macrófitas (Scirpus Holoschoenus y Cyperus Papyrus) en aguas contaminadas con Mercurio y Cianuro, provenientes de actividades mineras en la vereda la Paila, Municipio de Buenos Aires (Cauca)*. [Trabajo de grado para pregrado, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca]. Repositorio Uniautonomia.
<https://repositorio.uniautonomia.edu.co/bitstream/handle/123456789/343/T%20IA-M%20104%202020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Semana. (2021). *En dos años se duplicaron las exportaciones de oro en Colombia*. RevistaSemana.
<https://www.semana.com/economia/inversionistas/articulo/en-dos-anos-se-duplico-la-produccion-de-oro-en-colombia/202106/>
- Sepúlveda, J. Casallas, M. (2018). *Contaminación y remediación de suelos colombiano. Aplicación a la minería de Oro*. <https://editorial.universidadean.edu.co/media/acceso-abierto/contaminacion-y-remediacion-de-suelos-en-colombia.pdf>
- Sub-Unidad Ambiental. (2022). *Cecropia peltata* L.
<https://www.cimat.ues.edu.sv/subunidadambiental/2022/11/08/flora-especie-15/>
- Tarazona, D. (2023). *Minería Ilegal en Colombia: un mes de paralizaciones complica las acciones de control del gobierno*. Mongabay. <https://es.mongabay.com/2023/03/mineria-ilegal-colombia-un-mes-de-paralizaciones/>

- Torres, M., Vitola, D. y Perez, A. (2019). *Biorremediación de mercurio y níquel por bacterias endófitas de macrófitas acuáticas*. Revista Colombiana de Biotecnología, 21 (2), 36-44. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752019000200036
- Trujillo, M., Ramírez, J. (2012). *Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia*. Revista de investigación Agraria y Ambiental, 3(2), 37-48. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/952>
- Trujillo, V., Aguirre, L. (2016). *Evaluación de la fitorremediación como alternativa para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con Mercurio producto de la minería Aurífera (Artesanal y pequeña escala)*. [Trabajo de grado para pregrado, Universidad Abierta y a Distancia]. Repositorio Unad. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/12281/1053803323.Pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Umrana, V.V. (2006). *Bioremediation of toxic heavy metals using acidothermophilic autotrophes*. Bioresour Technol. 97, 1237-42. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852405002543>
- United Nations. (2021). *COP26: Juntos por el planeta*. Conferencia de las naciones unidas sobre el cambio climático. <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>
- U, Nacional. (2017). *Guía metodológica para la restauración ecología del bosque altoandino*. Facultad de ciencias Departamento de biología. Bogotá, Colombia. ISBN: 978-958-701-908-7. <https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2016/06/guia-metodologica-restauracion-ecologica.pdf>
- Uroz, S.P.; Calvaruso, C.; Turpault, M. P.; Pascale, F.K. (2009). *Mineral weathering by bacteria: ecology, actors, and mechanisms*. Trends in Microbiology. 17 (8), 378- 387. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19660952/>
- Valderrama, A., Poma, V. (2014). *Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (ii) y mercurio (ii) con la especie Eichhornia Crassipes (jacinto de agua)*. Revista de la Sociedad Química del Perú, 80 (3), 164-173. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2014000300003
- Vargas, H. M., Durango, J. V. (2014). *Evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio del ají Capsicum Annuum*. Revista de Salud Pública, 16 (6), 897-909. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-00642014000600008
- Vesga, J. (2022). *El uso de Cannabis sativa como especie fitorremediadora de cadmio: una alternativa para revivir el suelo. Caso de estudio finca La Chuqua, Guasca-Cundinamarca*. [Trabajo de grado para pregrado, Universidad del Bosque]. Repositorio Unbosque.

<https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/9430/Tesis,%20Juan%20E.%20Vesga.docx.pdf?sequence=1>

Volke, T., Velasco, J. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Instituto Nacional de Ecología. México.
<http://www.ecopuerto.com/Bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>

Zapata, G. (2021). *Estudio revela que pequeños mineros no dejan al mercurio*. El colombiano.
<https://www.elcolombiano.com/antioquia/pequenos-mineros-no-dejan-mercurio-estudio-de-planet-gold-AB14401652>

ANEXOS

ANEXO 1: Cronograma

El siguiente cronograma se diseñó para organizar y llevar a cabo las actividades necesarias en el

desarrollo de la investigación sobre fitorremediación para la descontaminación de suelos por mercurio en el territorio nacional. Las actividades incluyeron la identificación del tema, la realización de una investigación bibliográfica, la selección de las plantas adecuadas para la fitorremediación, el estudio de los métodos de degradación empleados por las plantas, y finalmente la elaboración y entrega de informes. Cada actividad se le asignó un tiempo específico para su cumplimiento, asegurando así el progreso ordenado y oportuno de la investigación.

Tabla 5. Cronograma del proyecto de investigación de fitorremediación.

CRONOGRAMA ACTIVIDADES PROYECTO FITORREMEDIACIÓN PARA DESCONTAMINACIÓN HG EN EL TERRITORIO NACIONAL						
	ACTIVIDAD GENERAL	MES	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE
		Actividades Secundarias				
1	Investigación de artículos relacionados con fitorremediación en los Municipios de Colombia más afectados por la minería con mercurio	1.1 Autores más acertados con la idea de la investigación				
		1.2 Artículos con medidas fitorremediadoras para los Municipios más afectados en Colombia.				
2	Revisión bibliográfica de técnicas de fitorremediación para la identificación de plantas más idóneas para la descontaminación de suelos con Mercurio en la explotación aurífera	2.1 Identificar las plantas que absorban mayor porcentaje de mercurio				
3	Identificar que plantas se adaptan mejor a las condiciones climáticas de las diversas escalas térmicas del país	3.1 Establecer una base climática para la implementación de la investigación fitorremediadora				
4	Estudio del mecanismo de degradación del mercurio por parte de las plantas como la absorción, desintoxicación y excreción	4.1 Entender la forma de eliminación, volatilización de la planta de ion de Mercurio				
5	Informe final con presupuesto y cronograma	5.1 Primera entrega				
		5.2 Segunda entrega				
		5.3 Tercera entrega				

Nota: Elaboración propia.

ANEXO 2: Presupuesto

A continuación, se presenta el presupuesto asignado para iniciar con la investigación bibliográfica sobre la fitorremediación en el territorio nacional, con el objetivo de investigar plantas que puedan eliminar o volatilizar el ion de mercurio presente en los suelos debido a la actividad minera. Para llevar a cabo esta investigación, se utilizaron bases de datos de la Universidad Santo Tomas, así como los recursos proporcionados por sus aliados internacionales, los cuales permitieron acceder de forma gratuita a la información relevante para la investigación. Es importante tener en cuenta

que, al tratarse de una monografía y una investigación bibliográfica cuantitativa sobre fitorremediación y especies de plantas, los costos de inversión fueron mínimos. La principal necesidad era contar con acceso a la plataforma CraiUsta para llevar a cabo la investigación de manera eficiente.

Tabla 6. Presupuesto inicial valoración del proyecto de fitorremediación Hg.

Presupuesto Inicial			
Concepto	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
Acceso biblioteca virtual	indefinida	0	0
Desplazamiento a bibliotecas	Indefinida	\$ 100.000	\$ 100.000
Total			\$ 100.000

Nota: Elaboración propia.