



Artículo de revisión / Review article

## Aprovechamiento de especies tropicales para la fitorremediación de medios contaminados, un estudio de revisión

### Utilization of Amazonian species in the phytoremediation of contaminated environments: a review study

Luzbenia Analí Motta-Machicado <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú

Recibido: 17/04/2025

Aceptado: 21/06/2025

Publicado: 25/07/2025

\*Autor de correspondencia: luzbanalimotta@gmail.com

**Resumen:** El presente artículo de revisión fue realizado con la finalidad de compilar información del aprovechamiento de especies amazónicas en la fitorremediación de medios contaminados. Diversos estudios han demostrado la potencialidad de diversas especies amazónicas actuando como biofiltros removiendo, transformando degradando, y/o concentrando peligrosos contaminantes presentes ecosistemas naturales mediante procesos bioquímicos inherentes a su ciclo de vida. De esta forma, se identificaron plantas amazónicas con capacidad de remover metales pesados, depurar residuos de fármacos, microorganismos, y minimizar cargas de hidrocarburos tanto en agua como en suelo. Esta revisión, recopila la información de 22 artículos científicos de investigación experimental en dos campos de estudio: fitorremediación en suelos y fitorremediación en medios acuosos. Para lo cual, se buscaron artículos científicos publicados en los últimos 10 años en las bases de datos Scencedirect, Dialnet y Scielo.

**Palabras clave:** biorremediación; fitorremediación; medios contaminados

**Abstract:** This review article was conducted to compile information on the use of Amazonian species in the phytoremediation of contaminated environments. Several studies have demonstrated the potential of various Amazonian species to act as biofilters, removing, transforming, degrading, and/or concentrating hazardous pollutants present in natural ecosystems through biochemical processes inherent to their life cycle. Thus, Amazonian plants were identified with the capacity to remove heavy metals, purify pharmaceutical residues, and microorganisms, and minimize hydrocarbon loads in both water and soil. This review compiles information from 22 scientific articles on experimental research in two fields of study: phytoremediation in soils and phytoremediation in aqueous media. For this purpose, scientific articles published in the last 10 years were searched in the databases Scencedirect, Dialnet, and Scielo.

**Keywords:** bioremediation; phytoremediation; contaminated media

## 1. Introducción

La contaminación ambiental generada por actividades antropogénicas constituye una de las principales amenazas para la sostenibilidad de los ecosistemas. El auge de diversas actividades económicas ha intensificado los procesos de contaminación en suelos y cuerpos de agua, generando impactos ambientales, económicos y sociales de gran magnitud. (Medina et al., 2024; Oggero et al., 2021). Entre las fuentes más relevantes de contaminación destacan la minería, la agricultura intensiva, la industria en general y el inadecuado manejo de aguas residuales, responsables de la liberación de metales pesados, hidrocarburos, nutrientes, residuos farmacológicos y compuestos tóxicos en general al ambiente. Estos contaminantes persisten en el tiempo y afectan negativamente a los ecosistemas y la salud de las comunidades humanas, lo que plantea la necesidad de implementar tecnologías de recuperación eficaces y sostenibles. (Carreño Sayago et al., 2017).

Asimismo, el desarrollo de las ciudades y el crecimiento urbano generan un incremento exponencial en la producción de aguas residuales cargadas con diversos contaminantes, lo que representa un gran desafío para su manejo y tratamiento. (Navas-Gallo et al., 2024). Las tecnologías tradicionales de remediación, como la excavación de suelos, la incineración y la neutralización química, suelen ser prohibitivas en costos, requieren un alto consumo de energía y son perjudiciales para el medio ambiente, lo que las hace inadecuadas para aplicaciones a gran escala o a largo plazo. (Kannan et al., 2025). En este contexto, resulta fundamental implementar procesos de depuración más sostenibles y económicamente viables, con el fin de eliminar los contaminantes peligrosos presentes y proteger tanto la salud pública como el medio ambiente. (Navas-Gallo et al., 2024). Aproximadamente a finales de la década de los 90 surge una tecnología innovadora que emplea plantas para capturar, transformar y/o acumular contaminantes presentes en el medio ambiente: la FITORREMEDIACIÓN. (Oggero et al., 2021). Actualmente, esta estrategia se considera una de las más eficientes y sostenibles debido a sus menores costos y a su carácter amigable con el ambiente. (Díaz-Martínez et al., 2013). La fitorremediación forma parte de los mecanismos de biorremediación (Oggero et al., 2021) y se fundamenta en el aprovechamiento de la biomasa de las plantas para bioacumular contaminantes (Clemente Huachen et al., 2021). De este modo, las especies idóneas presentan tejidos con alta capacidad para remover, extraer, inmovilizar y acumular elevados niveles de metales pesados, radionucleótidos, xenobióticos orgánicos y compuestos derivados del petróleo, entre otros. (Munive Cerrón et al., 2020; Valle et al., 2024; Pérez-Villar, et al., 2022).

La fitorremediación involucra técnicas tales como: la fitoextracción, en la que las plantas bioacumuladoras extraen compuestos tóxicos del suelo, agua, o sedimentos por medio de mecanismos de absorción para luego acumularlos en las partes cosechadas. La fitoestabilización, en la que las plantas modifican las propiedades físicas y químicas del medio con la finalidad de minimizar la biodisponibilidad de los contaminantes en su entorno. La fitovolatilización en la que las plantas logran eliminar los tóxicos mediante procesos de volatilización. La fitodegradación, en la que plantas y/o microorganismos asociados logran degradar los tóxicos de tipo orgánico. La rizofiltración en la que las raíces de las plantas logran absorber y adsorber los contaminantes de medios acuosos. (Oggero et al., 2021). En ese sentido, para obtener buenos resultados en los procesos de fitorremediación, la selección de las plantas se basa fundamentalmente en su potencial fisiológico, en el que se considera la profundidad de sus raíces, tasas de crecimiento, actividad enzimática, capacidad para asimilar y tolerar sustancias tóxicas, y su habilidad para bioacumular y/o degradar contaminantes. (Madera-Parra et al., 2014).

Los ecosistemas tropicales se distinguen por su riqueza en nutrientes, agua y luz solar, donde crecen especies vegetales que han desarrollado adaptaciones morfológicas y bioquímicas especiales, que les permite aprovechar al máximo las condiciones de su entorno. Estas características evidencian un gran potencial para mitigar de manera natural la contaminación de agua y suelo. (Carreño Sayago et al., 2017). El presente artículo, busca compilar la información de diferentes especies tropicales usadas para la fitorremediación de suelo y agua de manera natural y/o asistida con algas y microorganismos, se resumen los mecanismos de fitorremediación

mediante la revisión de 22 artículos científicos originales publicados en los últimos 10 años encontrados en bases de datos de acceso libre.

## 2. Materiales y métodos

El presente estudio es de tipo cualitativo, puesto que se basa en la revisión bibliográfica de artículos originales de corte nacional e internacional publicados durante los últimos 10 años, en los cuales se pueden encontrar diversas metodologías de fitorremediación en experimentos controlados usando especies tropicales.

La búsqueda de artículos científicos se realizó en las bases de búsqueda científica: Scielo, Dialnet y Scencedirect; identificando artículos en idioma español inglés y portugués de libre acceso. Los términos de búsqueda utilizados fueron: “fitorremediación”, “biorremediación” y “medios contaminados”, encontrándose inicialmente 52 artículos, de los cuales, se descartaron 10 artículos debido a que no se encontraban dentro del tiempo de publicación establecido, posteriormente, los 42 artículos fueron revisados detalladamente para corroborar que cumplan con los criterios de inclusión planteados, tras lo cual, se seleccionaron 22 artículos, con los cuales se realizó el presente estudio de revisión.

Se consideraron los siguientes criterios de inclusión:

- Estudios experimentales publicados en los últimos 10 años
- Estudios que tengan como objetivos evaluar el potencial de especies tropicales en la fitorremediación de medios contaminados u objetivos similares.

De similar forma, se consideraron los siguientes criterios de exclusión:

- Estudios de revisión bibliográfica
- Estudios publicados con más de 11 años de antigüedad.
- Estudios que usan plantas que no son tropicales.
- Estudios que no presenten los objetivos del estudio.

Entre los 22 artículos seleccionados se encontraron 9 estudios en los que se evalúa el aprovechamiento de especies tropicales en la fitorremediación de suelos contaminados, de los cuales 6 de los estudios usan las plantas fitorremediadoras para depurar metales pesados, y los otros 3 artículos evalúan la depuración de hidrocarburos. Asimismo, se encontraron 13 artículos en los que se evalúa el aprovechamiento de especies tropicales en la fitorremediación de medios acuosos, entre los cuales se presentan 5 estudios realizados en aguas contaminadas con metales pesados y 8 estudios con aguas que presentan contaminantes emergentes (aguas residuales), como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características de los estudios seleccionados y su relación con los objetivos de este estudio

Nombre del estudio	Autores	Relación con los objetivos
“Association between weeds and plant growthpromoting rhizobacteria in the phytoremediation of lead-contaminated soil”	(Valle et al., 2024)	Evaluar el aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de suelos contaminados
“Determinación de los coeficientes de fitorremediación de cadmio y plomo en el Romerillo americano”	(Pérez-Villar et al., 2022)	
“Fitorremediación con Maíz ( <i>Zea mays</i> L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados”	(Munive Cerrón et al., 2018)	
“Potencial bioacumulador de metales pesados para la fitorremediación como alternativa para la recuperación del paisaje forestal en un área de extracción minera, Napo, Ecuador”	(García Quintana et al., 2024)	

"Potencial del arbusto <i>Lantana camara</i> L. (verbenaceae) para la fitoestabilización y volatilización de mercurio"	(Narváez Romero et al., 2024)	Evaluar el aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de medios acuosos contaminados
"Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con <i>Megathyrus maximus</i> "	(Hernández Valencia et al., 2017)	
" <i>Phaseolus vulgaris</i> en el tratamiento de suelo agrícola contaminado por hidrocarburos"	(Marques-Benavides et al., 2020)	
"The potential of <i>Mimosa pigra</i> to restore contaminated soil with anthracene and phenanthrene"	(Pérez-Hernández et al., 2020)	
"Respuesta bioquímica de <i>Paronychia microphylla</i> Phil., <i>Ambrosia artemisioides</i> Phil. y <i>Croton ruizianus</i> Müll. Arg. frente al mercurio para su bioprospección en fitorremediación"	(Vilca Tisnado et al., 2022)	
"Bioabsorption and translocation of trivalent chromium in the floating macrophyte <i>Pistia stratiotes</i> "	(Medina et al., 2024)	
"Design, Development, and Evaluation of a Laboratory-Scale Phytoremediation System Using <i>Eichhornia Crassipes</i> for the Treatment of Chromium-Contaminated Waters"	(Carreño Sayago et al., 2017)	
"Determination of mercury in vegetal tissues by micropixe: application to the study of hyperaccumulation by <i>Spirodela intermedia</i> (Lemnaceae)"	(Fournière et al., 2019)	
"Fitorremediación de contaminantes emergentes de origen farmacéutico en humedales flotantes"	(Duré et al., 2022)	
"Fitorremediación de cromo en efluente de curtiembre empleando <i>Eichhornia crassipes</i> "	(Medina Garcia et al., 2019)	
"Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas <i>Pistia stratiotes</i> y <i>Eichhornia crassipes</i> en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales"	(Mendoza et al., 2018)	
"Phytoremediation as an alternative for domestic wastewater treatment from Riohacha City (Colombia)"	(Mendoza Guerra et al., 2016)	
"Fitorremediación de aguas residuales con alto contenido de plomo utilizando <i>Typha domingensis</i> y <i>Canna generalis</i> "	(Vera et al., 2016)	
"Performance of <i>Phragmites Australis</i> and <i>Cyperus Papyrus</i> in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands"	(García-Ávila et al., 2019)	
"Potencial de plantas acuáticas para la remoción de coliformes totales y <i>Escherichia coli</i> en aguas servidas"	(León et al., 2018)	
"Removal of ammoniacal nitrogen from municipal landfill leachate with floating <i>Typha domingensis</i> (Typhaceae)"	(Tamires Petry et al., 2020)	

"The use of Common Duckweed ( <i>Lemna minor</i> ) in the treatment of wastewater from the washing of sisal fiber ( <i>Furcraea bedinghausii</i> )"	(Arias et al., 2016)	
"Treatment of landfill leachate by polyculture constructed wetlands planted with native plants"	(Madera-Parra, 2016)	

### 3. Resultados y discusiones

Previamente a la presentación de los resultados, es necesario puntualizar que, en muchas ocasiones, la fitorremediación implica el uso de plantas asociadas a su microbiota rizosfera y poblaciones de microflora endofítica, como limpiadores adecuados. (Sahoo et al., 2025). La interacción entre las raíces de las plantas y los microbios del suelo desempeña un papel fundamental en la mejora de la eficiencia de la fitorremediación, microorganismos como las bacterias promotoras del crecimiento vegetal y los hongos micorrízicos arbusculares facilitan la absorción de contaminantes al mejorar el crecimiento radicular, alterar su biodisponibilidad y mejorar la tolerancia al estrés. Estos microbios secretan sideróforos, fitohormonas y quelantes, lo que contribuye tanto al vigor de las plantas como a la degradación de contaminantes. (Kannan et al., 2025).

Diversos factores, como la selección de especies vegetales, la arquitectura radicular, la producción de biomasa, la textura, la composición y el pH del suelo, la temperatura, la pluviosidad, la luz solar, la composición química, la solubilidad, la volatilidad y la toxicidad de los contaminantes, impulsan las diversas tendencias de fitorremediación (Sahoo et al., 2025), por lo cual es de suma importancia estudiar los mecanismos idóneos de fitorremediación con especies tropicales, escasamente estudiadas. Teniendo en cuenta lo mencionado, se realizó la compilación de 22 artículos originales de investigación divididos en dos grupos: artículos que estudian el aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de suelos contaminados y artículos que estudian el aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de medios acuosos:

#### 3.1. Aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de suelos contaminados

Uno de los problemas medioambientales más críticos es la contaminación del suelo (Silva-Mori et al., 2024) generalmente causada por el uso inadecuado de agroquímicos, el vertimiento de aguas industriales sin tratamiento previo, la incorporación de residuos de hidrocarburos, la presencia de metales pesados y la acumulación de compuestos químicos derivados de diversas actividades industriales. Estos contaminantes son variados y complejos, lo que hace que la recuperación del suelo sea un proceso altamente difícil y, en muchos casos, tedioso. No obstante, en cualquier escenario resulta indispensable identificar primero el tipo y la concentración del contaminante, para luego seleccionar de manera adecuada la tecnología más apropiada para su recuperación. En términos generales, existe una tendencia mundial de mitigar la contaminación de medios naturales mediante tecnologías limpias, tales como la fitorremediación. (Falcón & Antonio, 2017). En los estudios de fitorremediación de suelos, además de considerar la capacidad acumuladora de diversas especies vegetales y su interacción con microorganismos, es fundamental llevar a cabo múltiples ensayos que permitan validar la factibilidad y eficiencia de cada técnica experimental. (Huaranga Moreno et al., 2022).

A partir de la revisión bibliográfica, se identifican dos grandes grupos de contaminantes del suelo que pueden ser mitigados mediante fitorremediación: los metales pesados y los hidrocarburos.

##### 3.1.1. *Aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados*

Los metales pesados se caracterizan por presentar una elevada masa atómica y, en la tabla periódica, se ubican principalmente en el quinto y sexto período. En la industria, poseen múltiples aplicaciones, por lo que suelen encontrarse, de manera directa o indirecta, en la mayoría de las actividades productivas. En el ámbito medioambiental, se reconoce su elevada toxicidad incluso

a bajas concentraciones, ingresando a los seres vivos mediante procesos de bioadsorción y bioacumulación.

Los organismos pueden captar estos metales por distintas vías; por ejemplo, el plomo puede ser inhalado a través del polvo y de los humos derivados de la combustión de gasolina con plomo (Huaranga Moreno et al., 2022). La contaminación por este metal resulta especialmente preocupante debido a su prolongado tiempo de residencia en el ambiente, que oscila entre 1000 y 3000 años. Se estima que la exposición ambiental al plomo en suelos ( $1300\text{--}32\ 260\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ ) constituye un grave problema de salud pública a nivel mundial y se asocia con aproximadamente 143 000 muertes anuales. El plomo no desempeña ninguna función biológica en las plantas ni es considerado esencial para su metabolismo; sin embargo, puede ser absorbido y transportado hacia los tejidos vegetales. Una vez en el interior, induce la generación de especies reactivas de oxígeno, lo que ocasiona daño a las membranas lipídicas, disminución de la actividad fotosintética y manifestaciones visibles como clorosis, necrosis, reducción del crecimiento radicular y foliar, así como alteraciones en los patrones de ramificación de las raíces. (Valle et al., 2024)

Por otra parte, el mercurio representa una de las mayores preocupaciones debido a su elevada toxicidad, así como a su capacidad de bioacumulación y biomagnificación. Estas características alteran de manera crítica el equilibrio de los ecosistemas y repercuten directamente en la salud pública. (Ortega-Ortega et al., 2011). El mercurio incluso puede ser inhalado a través del aire como subproducto de la fabricación de lámparas fluorescentes; diversos estudios han demostrado que la exposición a este metal se asocia con enfermedades renales y hepáticas, daños severos al sistema nervioso central y efectos teratogénicos. (Ortega-Ortega et al., 2011), su eliminación ocurre principalmente a través de los riñones y del sistema digestivo; no obstante, muchos de estos metales tienden a acumularse en el hígado, los huesos y los tejidos epidérmicos durante largos periodos. (Huaranga Moreno et al., 2022). La cantidad de metales que el ser humano puede adsorber depende de factores como el estado nutricional, la edad y, especialmente, la forma química del contaminante.

En cuanto a los recursos naturales contaminados, la ciencia ha demostrado que más del 90% de los metales pesados se retienen en las partículas del suelo. (Valle et al., 2024), por lo cual, la mayoría de los estudios destinados a la recuperación del recurso, se orientan a la remoción de metales pesados.

En este contexto, Valle et al., (2024) evaluaron la eficiencia de las malezas *Echinochloa colona* (L.) Link, *Cyperus corymbosus* Rottb. y *Sorghum halepense*, asociadas con rizobacterias, en la depuración de plomo a una concentración de 800 ppm. El mayor porcentaje de remoción se obtuvo con *E. colona* (L.) Link en asociación con rizobacterias, alcanzando un 78,83%, en comparación con el 57,58% logrado con la misma especie en ausencia de rizobacterias. En el estudio de Pérez-Villar et al., (2022) se empleó romerillo americano para evaluar su capacidad de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio y plomo, tanto en sistemas controlados de laboratorio como en condiciones *in situ*. Los resultados mostraron coeficientes de remediación superiores a uno en ambos casos, lo que evidencia la capacidad bioacumuladora de metales de la especie estudiada. El estudio de Munive Cerrón et al., (2018) fue realizado en suelos agrícolas contaminados con cadmio y plomo con niveles superiores a los estándares de calidad ambiental en las localidades de Mantaro y Muqui del valle del Mantaro-Perú usando como especie fitorremediadora al maíz apoyado con enmiendas orgánicas de vermicompost y compost de stevia con la finalidad de incrementar la solubilidad de los contaminantes y favorecer su adsorción. De esta forma, los análisis realizados mostraron que la zona con mayores niveles de contaminación fue el sector de Muqui. Los resultados del estudio, denotaron una mayor efectividad con el uso de vermicompost de Stevia.

El estudio de García Quintana et al., (2024) evaluó el nivel de bioacumulación de metales pesados de tres especies de rápida propagación en zona minera de Yutzupino-Ecuador: *Ochroma pyramidale*, *Piptocoma discolor* y *Bambusa vulgaris*, se usaron técnicas instrumentales de espectrometría por absorción atómica para determinar concentraciones de cadmio, plomo, hierro

y níquel en hojas y suelos, reportándose mayores concentraciones de níquel y hierro en *Bambusa vulgaris*; y mayores concentraciones de cadmio y plomo en la especie *Piptocoma discolor*, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Concentraciones de metales pesados en plantas fitorremediadoras después del experimento

Especie fitorremediadora	Metal	Concentración
<i>Bambusa vulgaris</i>	Níquel	6,89 mg kg <sup>-1</sup>
	Hierro	156,33 mg kg <sup>-1</sup>
<i>Piptocoma discolor</i>	Cadmio	0,35 mg kg <sup>-1</sup>
	Plomo	55,67 mg kg <sup>-1</sup>

Elaboración propia de acuerdo a García Quintana et al., (2024)

En cuanto a los resultados del suelo, la especie *Bambusa vulgaris* registró valores de variación mayores para cadmio, níquel y plomo y la especie *Ochroma pyramidale* registró variaciones mayores para hierro comprobando el potencial fitorremediador de ambas especies.

El estudio realizado por Narváez Romero et al., (2024) evaluó el potencial bioacumulador de *Lantana camara* L. además de su efectividad para la traslocación y volatilización de mercurio en suelos contaminados de manera artificial a concentraciones de 1 a 8 mg/kg de Hg, tras dos meses de tratamiento se obtuvieron resultados alentadores, factor de traslocación menor a uno, factor de bioacumulación superior a 1, y se calculó que aproximadamente 7.1 µg de mercurio llega a volatilizarse por cada gramo de planta diariamente. Asimismo, el estudio, permitió conocer que la acumulación de mercurio en la planta se ubica principalmente a nivel de la raíz, denotándose una buena fitoestabilización, sin embargo, el alto nivel de volatilización del contaminante sugiere el uso moderado de la especie en sistemas de fitorremediación. De manera similar, el estudio de Vilca Tisnado et al., (2022), estuvo destinado a estimar la tolerancia a niveles altos de mercurio de las especies vegetales *Paronychia microphylla* Phil, *Ambrosia artmisiodes* Phil. y *Croton ruizianus* Mill. Arg, de las cuales, solo *Croton* es una especie de clima tropical. El estudio se realizó aplicando concentraciones de 5, 10 y 80 mg Hg L<sup>-1</sup>, encontrándose diferencias significativas en la capacidad de bioacumulación en las tres especies estudiadas; sin embargo se apreció que la especie *Croton* presenta una buena respuesta antioxidante; pero menor desempeño bioacumulador que las otras dos especies estudiadas, por lo cual, los autores concluyeron que *Paronychia* y *Ambrosia* presentan mejores características para la fitorremediación del suelo contaminado con mercurio que la especie tropical.

### 3.1.2. Aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos

Los hidrocarburos de petróleo se utilizan como materia prima en numerosas industrias y fuentes de energía primaria. Sin embargo, su uso excesivo, inadecuada disposición y accidentes pueden ocasionar la contaminación del suelo, lo que representa una grave amenaza para los organismos vivos. Para mitigar esta problemática, se aplican diversos métodos químicos y biológicos, ex situ o in situ; sin embargo, la mayoría de los métodos de tratamiento químico son costosos, perjudiciales para el medio ambiente y, en ocasiones, ineficientes. Esto impulsa a científicos e investigadores a desarrollar y seleccionar nuevas estrategias para remediar el suelo contaminado mediante análisis de riesgos y de forma ecológica. En ese contexto, se puede identificar a la fitorremediación como un método ecológico para degradar hidrocarburos, específicamente mediante el uso de plantas asociadas o no a microorganismos con la aplicación de diversas técnicas y mecanismos de medición de resultados y sus impactos a corto, mediano y largo plazo. (Ambaye et al., 2022).

En ese contexto, el estudio de Hernández Valencia et al., (2017), evaluó la capacidad fitorremediadora de *Megathyrus maximus* en suelos contaminados con petróleo durante 120 días contabilizando el contenido del hidrocarburo y la actividad microbiológica en el suelo, los resultados reflejaron hasta un 17.1% de reducción del hidrocarburo en el suelo y cambios

favorables en los parámetros bioquímicos y microbiológicos en la planta, lo que denota la posibilidad de utilizar la especie para tratamientos de fitorremediación además de la necesidad de realizar más estudios para mejorar la efectividad del tratamiento.

El estudio de Marques-Benavides et al., (2020) se realizó en suelos contaminados con una mezcla de hidrocarburos provenientes de aceites residuales de autos a una concentración de 35000 ppm aplicando como especie fitorremediadora *Phaseolus vulgaris* con ayuda de los microorganismos *Azotobacter vinelandii* y *Paenibacillus polymyxa* con la finalidad de disminuir la concentración de los contaminantes a valores menores a 4400 ppm (concentración máxima aceptada por las regulaciones medioambientales mexicanas). Los resultados de la investigación evidenciaron la reducción a 1152 ppm de hidrocarburos, valor menor al permitido según la regulación mexicana, con lo cual se demostró la efectividad del uso de la especie vegetal asociada a los microorganismos.

La investigación realizada por Pérez-Hernández et al., (2020), se realizó en suelos de tipo franco-limoso contaminados con fenantreno a una concentración de 200 mg kg<sup>-1</sup> y antraceno a 100 mg kg<sup>-1</sup> aplicando como especie remediadora *Mimosa pigra* por espacio de 70 días; los resultados del estudio revelaron niveles de reducción de 80% para el antraceno y 92% para el fenantreno, adicionalmente, la especie vegetal utilizada en el tratamiento experimentó un notorio incremento en su capacidad de retención de agua notándose la acumulación del contaminante a nivel de raíz y tallo; pero una se observó una disminución en la concentración de carbono orgánico en el suelo y parámetros de textura, concentración de nitrógeno, conductividad electrolítica y pH invariables.

### 3.2. Aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de medios acuosos contaminados

Aproximadamente un poco más de dos tercios de la tierra están constituidos por agua, de lo cual, solo el 2.5% es agua dulce, distribuida en ríos, casquetes polares y mantos acuíferos, se calcula que únicamente el 0.4% de esta agua es de fácil disposición para el ser humano. El agua es el recurso natural más importante y necesario para el desarrollo de las naciones, su calidad y disposición natural en ecosistemas, aunado a su buen estado son trascendentales para el bienestar humano (Humanante Cabrera et al., 2022; Mancilla-Villa et al., 2023); no obstante, actualmente, la contaminación de aguas naturales constituye un grave problema medioambiental; los ecosistemas acuáticos se ven altamente alterados por fenómenos de proliferación atípica de algas y eutrofización debido al auge de actividades antropogénicas. (Ramos Mancheno, 2024).

El mundo actual se enfrenta a una crisis debido a la falta de agua dulce limpia; esta escasez no solo es consecuencia del rápido desarrollo de las industrias, sino también de la gran cantidad de aguas residuales de procesos industriales que se vierten en ríos y sistemas hídricos. (Carreño Sayago et al., 2017). La OMS calcula que aproximadamente 2000 millones de personas usan aguas contaminadas con residuos fecales para su consumo, constituyendo un grave problema que amenaza constantemente su salud (Ramos Mancheno, 2024).

Las aguas residuales suelen contener una gran variedad de contaminantes, muchos de ellos en forma de iones catiónicos y aniónicos, aceites y grasas, y otros residuos orgánicos con efectos nocivos para los ecosistemas. Generalmente, la eliminación de estos contaminantes requiere tecnologías eficaces, lo que ha impulsado en las últimas décadas el desarrollo de técnicas de limpieza para abordar este problema. (Carreño Sayago et al., 2017). Los diferentes estudios de fitorremediación de medios acuosos contaminados, contemplan la minimización de residuos de metales pesados, coliformes totales y fecales y tratamiento general de aguas residuales.

A partir de la revisión bibliográfica, se identifican dos grandes grupos de contaminantes del agua que pueden ser mitigados mediante fitorremediación: los metales pesados y contaminantes emergentes.

### 3.2.1. Aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de medios acuosos contaminados por metales pesados

Una de las principales problemáticas medioambientales a nivel mundial es la presencia de metales pesados en el agua, no solo porque es una fuente de recursos directa, sino porque facilita la incorporación de estos contaminantes en el suelo, cadenas tróficas y en los alimentos. La alta toxicidad de los metales pesados repercute directamente en la salubridad pública y genera serios daños en la flora, fauna y los ecosistemas naturales generando a la vez, importantes repercusiones socioeconómicas; por lo cual, la identificación de metales pesados y contaminantes en general, mediante el monitoreo de cuencas y microcuencas, debería ser una prioridad en las políticas de estado de las naciones.

Por otra parte, es imprescindible reconocer que el avance de la ciencia y tecnología y el desarrollo industrial, ha producido muchas mejoras en la sociedad; sin embargo, ha propiciado con el tiempo, el incremento desmesurado de descargas de metales pesados hacia medios acuosos naturales. Estas concentraciones elevadas, constituyen un grave problema para la biota debido a la facilidad de estos contaminantes de bioacumularse y biomagnificarse en tejidos biológicos. Un caso típico se observa en el sector agricultura, con el uso desmesurado de insecticidas y agroquímicos en general, que viene propiciando la liberación de residuos metálicos al medio ambiente; desde los campos de cultivo hacia las fuentes de agua natural modificando negativamente las propiedades físicas y químicas del agua hasta llegar a las cadenas tróficas. (Correa Cuba et al., 2021).

Una seria problemática de contaminación de aguas naturales por plomo se registra en el estudio de Valle et al., (2024), en el que se detectaron entre 0,13-446 ppm de plomo en agua de riego contaminada con residuos industriales o restos de fertilizantes, en vegetales consumidos frescos, fresas, papas, yuca, jugo de caña de azúcar y jugos de frutas y vegetales industriales. Bajo este escenario, la fitorremediación se perfila como una tecnología innovadora amigable con el medio ambiente con alta capacidad de depurar metales nocivos en el agua. De esta forma, en el estudio de Vera et al., (2016), se trabajó con *Typha dominguensis* y *Canna generalis* evaluando su capacidad fitorremediadora en aguas residuales con alto contenido de plomo a nivel de laboratorio. Las especies vegetales fueron sometidas a soluciones de 5, 10 y 15 mg.L<sup>-1</sup> Pb por medio de 9 tratamientos tres de ellos con *Typha*, tres con *Canna* y tres controles con cada concentración experimental, como se detalla en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Concentraciones de plomo y disposición de las plantas en el estudio de Vera et al., (2016)

Especie	Concentración de plomo	Tratamiento
<i>Typha dominguensis</i>	5 mg. L-1	Tratamiento 1
	10 mg. L-1	Tratamiento 2
	15 mg. L-1	Tratamiento 3
<i>Canna generalis</i>	5 mg. L-1	Tratamiento 4
	10 mg. L-1	Tratamiento 5
	15 mg. L-1	Tratamiento 6
Sin planta	5 mg. L-1	Control 1
	10 mg. L-1	Control 2
	15 mg. L-1	Control 3

Elaboración propia a partir de Vera et al., (2016)

Los resultados del estudio, mostraron que no existen diferencias significativas entre las capacidades de fitorremediación de las especies estudiadas obteniéndose remociones del contaminante de 85,40% a 95,36%, que se incrementaron a medida que se aumenta la concentración de plomo en el sustrato acuoso; asimismo, se observó que la especie *Canna generalis* logra adsorber mayor concentración de plomo en las raíces que en las hojas, y *Typha dominguensis* demostró mayor capacidad de translocación que iba disminuyendo cuando se incrementa la concentración de plomo, denotando la buena capacidad fitorremediadora de las especies macrófitas.

Otra grave problemática es la generada por la contaminación por mercurio como un residuo de la minería informal; este metal destaca entre los demás debido a su toxicidad extrema, así los residuos de mercurio no pueden descomponerse ni degradarse a productos menos tóxicos, por el contrario, en el medio ambiente solo se transforma a compuestos con mayor toxicidad tales como el metilmercurio, generado por metilación del mercurio elemental en sedimentos con la intervención de bacterias; esta forma de mercurio es sumamente peligrosa por su capacidad de bioacumulación y biomagnificación en tejidos animales. (Loza del Carpio & Ccancapa Salcedo, 2020)

A nivel mundial se registran aproximadamente entre 10 a 15 millones de mineros informales que llegan a extraer unas 350 t de oro por año, para lo cual emplean unas 1000 t de mercurio. En el Perú se estima que existen alrededor de 60 a 100 mil mineros informales y unas 300 mil personas están involucrados de manera indirecta en esta actividad. Se calcula que se usa diariamente 1.5 kg de mercurio para producir 1 kg de oro, cuyos residuos se vierten a fuentes de aguas naturales. (Loza del Carpio & Ccancapa Salcedo, 2020). Toda esta concentración del peligroso metal se libera al medio ambiente si tratamientos previos, ocasionando un severo daño al ecosistema y a la salud de las personas. Sin embargo, precisamente la capacidad de resiliencia de los ecosistemas naturales ha generado una alta tolerancia de ciertas especies vegetales a ambientes extremadamente contaminados, fijando los contaminantes y depurándolos mediante sendos procesos bioquímicos, así surge la oportunidad de la fitorremediación. De esta forma, en el estudio de Fournière et al., (2019), se trabajó con *Spirodela intermedia*, una macrófita tropical para depurar mercurio en aguas contaminadas a nivel de laboratorio; las cuales fueron sometidas a concentraciones de 1 y 10 mg.L<sup>-1</sup> del metal por espacio de dos semanas. Los resultados de este estudio mostraron un comportamiento hiperacumulador de las plantas alcanzando niveles de bioconcentración mayores a 1000 en raíces y superiores a 200 en frondes en 96 h: otro hallazgo importante fue una distribución heterogénea del mercurio en las hojas es más que en las raíces, lo que abre el paso a investigaciones en el campo de la biotecnología en base a esta planta.

Por otra parte, un problema latente en diversos países, es la contaminación por cromo; este metal en su forma trivalente, es común en las aguas residuales de las industrias de curtiembre, específicamente, el sulfato básico de cromo es la sustancia más utilizada en los procesos de curtiembre de cueros y pieles de animales; de tal manera que las aguas residuales de esta industria, suelen presentar alrededor de 30-35% de este compuesto; si bien es cierto la toxicidad generada por el cromo trivalente es menor que la del cromo hexavalente, hay que considerar que esta segunda forma más tóxica del metal, puede generarse por procesos de oxidación química o microbiológica del Cr<sup>3+</sup> en condiciones alcalinas y oxidantes y también puede estar presente en algunas etapas auxiliares del proceso. En el ser humano, algunos de los efectos nocivos del cromo hexavalente son: alergias dérmicas, sangrado nasal e irritación, erupciones, malestares gastrointestinales, alteraciones del ADN, asimismo las intoxicaciones a nivel crónico pueden generar mutaciones y acumulaciones en órganos vitales. (Mayta & Mayta, 2017).

En la fitorremediación, las plantas pueden absorber cromo trivalente manteniendo el estado de oxidación, mientras que el cromo hexavalente, se reduce a la forma trivalente al entrar en las células vegetales; de esta forma, la absorción de Cr(III) en las plantas se produce por difusión simple en los sitios de intercambio catiónico de la pared celular, mientras que el Cr(VI) puede entrar activamente a través de los canales transportadores de sulfato. (Medina et al., 2024). Precisamente, el estudio realizado por Medina et al., (2024), evaluó la capacidad de absorción y transferencia del cromo trivalente en la especie *Pistia stratiotes* a través de soluciones de sulfato básico de cromo a diferentes concentraciones (2.14, 4.90, 11.98, 25.37 y 43.87 mg.L<sup>-1</sup>) en un lapso de 48 horas; asimismo se consideró valorar la acumulación del contaminantes en los tejidos vegetales. Los resultados del estudio, mostraron porcentajes de remoción de 90.6%, 91.4%, 88.6%, 79.9% y 64.6%, para cada concentración experimental, denotando la capacidad de la especie fitorremediadora; adicionalmente, en este estudio no se observó inhibición del crecimiento de la planta ante la contaminación y una mayor acumulación del contaminante a nivel de raíces, registrándose factores de bioconcentración de 4416, 1496 y 892 para 2.14 a 25.37 y 43.87 mg. L<sup>-1</sup>, para cada concentración. De manera similar, en el estudio realizado por Carreño Sayago et al.,

(2017), se trabajó con *Eichhornia Crassipes* como especie fitorremediadora usando agua residuales del proceso de curtiembre con concentraciones de más de 1400 mg/L de cromo, trabajadas en el laboratorio, preparando soluciones con un 20 % de agua de curtiembre completando con agua destilada en contenedores de plástico, contando con tres tratamientos diferentes, el tiempo de evaluación fue de un mes. Los resultados de este estudio mostraron niveles de remoción de cromo del 33% después de solo dos días de tratamiento, y porcentajes de remoción superiores al 70% al finalizar el experimento en todos los tratamientos. Usando la misma especie vegetal, en el estudio de Medina Garcia et al., (2019) se trabajó con soluciones de laboratorio contaminadas con sulfato básico de cromo a concentraciones ente 2 a 200 mg/L y aguas residuales de la curtiembre, evaluando la tolerancia de la especie fitorremediadora por espacio de 20 días. Los resultados mostraron una buena tolerancia de las plantas a bajas concentraciones de cromo (primeras 4 soluciones) sobreviviendo durante todo el experimento; sin embargo, se observaron episodios de marchitamiento a mayores concentraciones del metal, ocasionando la muerte de las plantas, determinándose la concentración máxima tolerable de 17,8 mgCr<sup>3+</sup>.L-1, llegando a remover hasta el 70% del peligroso metal.

### 3.2.2. *Aprovechamiento de plantas tropicales en la fitorremediación de medios acuosos con contaminantes emergentes*

El elevado crecimiento poblacional genera un gran incremento en el consumo de alimentos, bebidas, artículos de limpieza, cuidado personal, fármacos, etc. cuyo consumo genera múltiples desechos que se descargan en sistemas de alcantarillado sanitario donde se incorporan desechos de los inodoros y el agua de lluvia constituyéndose las denominadas aguas residuales, en las que abundan contaminantes emergentes. Definimos contaminantes emergentes, a una serie de sustancias químicas derivadas de la actividad del hombre que no se encuentran reguladas y pueden presentarse tanto en el aire, suelo y agua, generalmente en pequeñas concentraciones, la mayoría de ellos, son de naturaleza orgánica, pero son altamente variados. (Milquez Sanabria et al., 2023).

Según Kumar et al., (2022) son considerados también contaminantes emergentes los microorganismos y las sustancias producidas en su metabolismo. Por lo general, los contaminantes emergentes persisten en el medio ambiente y pueden alterar la fisiología de los receptores diana, se reconocen como contaminantes de interés ambiental emergente los productos farmacéuticos y de cuidado personal, los plastificantes, los surfactantes, los retardantes de fuego, los nanomateriales y los pesticidas. Varios contaminantes emergentes han sido reconocidos como compuestos disruptores endocrinos debido a sus efectos nocivos sobre los sistemas endocrinos. El impacto de los contaminantes emergentes, como medicamentos, medios de rayos X, disruptores endocrinos, insecticidas y artículos de cuidado personal, se ha reportado en fuentes de aguas superficiales, residuales y subterráneas en todo el mundo en los últimos años. Se han explorado varias técnicas para la degradación y eliminación de contaminantes emergentes para mitigar su efecto nocivo. Numerosas investigaciones previas o en curso se han centrado en la degradación y eliminación de contaminantes utilizando una variedad de técnicas de tratamiento, que incluyen mecanismos físicos, químicos y biológicos, entre ellos la fitorremediación. De esta forma, en el estudio de Duré et al., (2022), se trabajó con la especie *Typha dominguensis* para la remoción de residuos de paracetamol e ibuprofeno insertados en agua residuales domésticas a una concentración de 25 mg.L<sup>-1</sup>, obteniéndose porcentajes de remoción de 65,1% del ibuprofeno, 86,5 % del paracetamol.

En el estudio realizado por Mendoza et al., (2018), se trabajó con aguas residuales municipales y las especies fitorremediadoras *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* adecuando seis microcosmos de 84,4 L cada uno, planteando tratamientos y un control. Los resultados del estudio, reflejaron que no hay diferencias significativas entre los microcosmos con las plantas y el control; no obstante, se registraron mayores eficiencias de remoción en los tratamientos de 100% y 50% de la especie *Pistia*, alcanzándose niveles de remoción de 78,5% en nitritos, 24,9% de nitratos, 8,6% de amonios y 99,9% para coliformes totales y coliformes fecales. De manera similar, en el estudio de Mendoza Guerra et al., (2016), se trabajó con la especie *Eichhornia crassipes*, en el laboratorio con

aguas residuales colombianas dispuestas en seis tratamientos con flujo discontinuo de agua, tres de ellos con plantas y tres controles. En la experimentación se renovaron los efluentes al 25, 50 y 75% por espacio de 7 días, en los cuales, se monitorearon: oxígeno disuelto, pH, amonios, demanda química de oxígeno ortofosfatos, coliformes totales y fecales y demanda bioquímica de oxígeno. Los resultados del estudio reflejaron una mejor eficiencia del sistema con la renovación del efluente del 75% alcanzando porcentajes de remoción de amonios de 99,9%, ortofosfatos al 93,1% materias orgánicas 93,9% y 91,6% y coliformes totales y fecales al 99,9%.

En el estudio de García-Ávila et al., (2019) se comparó la capacidad de depuración de aguas residuales domésticas en humedales artificiales con las especies *Phragmites Australis* y *Cyperus Papyrus*, de las cuales solo *Cyperus* es una planta tropical; en el experimento se alimentó un flujo constante de 0,6 m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup> desde la laguna primaria a cada uno de los dos humedales construidos a escala piloto con flujo continuo. Cada unidad se rellenó con grava granítica en la parte inferior y con arena silícica en la parte superior de diferente granulometría, la porosidad del medio fue de 0,34, con un tiempo de retención de 1,12 días y una tasa de carga hidráulica de 0,2 m día<sup>-1</sup>. Para analizar la capacidad de depuración de aguas residuales, se monitorearon parámetros físicos, químicos y biológicos durante tres meses. Se tomaron muestras a la entrada y salida de cada unidad experimental. Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales para las dos especies de plantas indicaron que *Cyperus Papyrus* presentó una mayor capacidad de remoción de contaminantes, como la demanda bioquímica de oxígeno (80,69%), la demanda química de oxígeno (69,87%), el nitrógeno amoniacal (69,69%), el fósforo total (50%), los coliformes totales (98,08%) y los coliformes fecales (95,61%).

De similar forma León et al., (2018) planteó una investigación para evaluar el potencial de 7 especies vegetales (*Ceratopteris thalictroides* (L.) Brongn., *Spirodela intermedia* W. D. J. Koch, *Azolla caroliniana* Willd, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, *Pistia stratiotes* L., *Salvinia auriculata* Aubl. y *Lemna minor* L.) en la depuración de *E. coli* y coliformes totales de aguas contaminadas en un lapso de 7 días, los resultados reflejaron una alta eficiencia (100%) en la depuración de *E. coli* con las especies *E. crassipes*, *C. thalictroides*, *S. auriculata* *P. stratiotes*, y *S. intermedia*, asimismo, todas las especies lograron depurar los coliformes totales a niveles inferiores a los límites máximos permisibles.

En el estudio de Tamires Petry et al., (2020), se trabajó con otros contaminantes presentes en lixiviados de aguas residuales, nitrógeno amoniacal y derivados nitrogenados modificados a concentraciones de 100, 75 y 50 % completando con agua de lluvia y un control, evaluando el potencial de nitrificación y la capacidad de supervivencia de la especie *Typha domingensis* por espacio de 35 días; de esta forma, luego de transcurrir dos semanas, la demanda de oxígeno de los tratamientos aumentó dos veces en el control, tres veces en el 50 % de lixiviado, cuatro veces en el 75 % de lixiviado y ocho veces en el 100 % de lixiviado. A los 28 y 35 días, no hubo diferencia significativa entre los tratamientos, las concentraciones de nitrógeno amoniacal, fueron disminuyendo paulatinamente con el tiempo, y al final del experimento, en todos los tratamientos de logró su depuración al 100%; en cuanto a la concentración de nitritos y nitratos no se registraron resultados uniformes, en algunos tratamientos disminuyó y en otros aumentó al finalizar el experimento y la tasa de supervivencia al final del experimento fue mayor en los individuos de *Typha domingensis* expuestos al tratamiento 100 % y disminuyó a medida que disminuía la concentración de lixiviado: 98 %, 94 %, 92 % y 86 %.

De forma similar en el estudio de Madera-Parra, (2016), se trabajó con lixiviado de relleno sanitario inoculados a humedales trabajados en laboratorio con las especies *Colocasia esculenta*, *Gynerium sagittatum* y *Heliconia psittacorum*. Los humedales fueron trabajados previamente por espacio de siete meses; posteriormente, en tres de ellos se trabajaron divisiones para el sembrado de las plantas, distribuidas según lo detallado en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Orden de distribución de plantas en los humedales experimentales del estudio de Madera-Parra, (2016)

Humedal	Distribución de plantas
Humedal 1	1. <i>Heliconia psittacorum</i> 2. <i>Colocasia esculenta</i> 3. <i>Gynerium sagittatum</i>
Humedal 2	Aleatorio
Humedal 3	1. <i>Colocasia esculenta</i> 2. <i>Gynerium sagittatum</i> 3. <i>Heliconia psittacorum</i>
Humedal 4	1. <i>Gynerium sagittatum</i> 2. <i>Heliconia psittacorum</i> 3. <i>Colocasia esculenta</i>

Elaboración propia según Madera-Parra, (2016)

Se analizaron de forma quincenal la demanda química de oxígeno, concentración de metales pesados (mercurio, plomo y cadmio) y parámetros biológicos de las plantas; los resultados del estudio mostraron una mayor eficiencia en el humedal 4 en todos los parámetros evaluados; asimismo, se observó que todas las especies vegetales registraron crecimiento constante y buena respuesta fisiológica, denotando su capacidad fitorremediadora.

Finalmente, en el estudio de Arias et al., (2016), se trabajó con aguas residuales de la actividad del fique en Colombia usando la especie *Lemna minor*, para lo cual se evaluaron para metros de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos totales en suspensión fósforo y nitrógeno a ocho y doce días obteniéndose mayor eficacia de remoción a los ocho días con valores de 79,6 % para la demanda química de oxígeno y 82.77 % para la demanda bioquímica de oxígeno.

#### 4. Conclusiones

El análisis de los 22 estudios seleccionados evidencia que diversas plantas tropicales constituyen una alternativa eficaz, sostenible y de bajo costo para la recuperación de medios contaminados mediante procesos de fitorremediación. Su aprovechamiento responde a la necesidad de implementar tecnologías limpias frente a métodos convencionales de remediación, caracterizados por su elevado costo energético y económico, así como por los impactos negativos asociados a su aplicación.

Se identificaron múltiples mecanismos de fitorremediación empleados por especies tropicales, entre los que destacan la fitoextracción, la fitoestabilización, la fitovolatilización, la fitodegradación y la rizofiltración. Estos procesos permiten la remoción de metales pesados como plomo, cadmio, mercurio y cromo; la degradación de hidrocarburos derivados de la industria petrolera; así como la depuración de contaminantes emergentes, incluidos fármacos, microorganismos y nutrientes presentes en aguas residuales.

La evidencia recopilada demuestra que la interacción planta-microorganismo en la rizosfera potencia la eficiencia de los procesos de remediación, reforzando la idea de que la fitorremediación no debe entenderse únicamente como una acción vegetal, sino como una estrategia integral de biorremediación. Asimismo, los resultados destacan la capacidad de especies acuáticas y terrestres de rápido crecimiento y alta producción de biomasa para adaptarse a diversos escenarios contaminados, ofreciendo soluciones viables para contextos tropicales. En este sentido, la implementación de sistemas de fitorremediación en suelos y medios acuosos representa una contribución significativa a la gestión sostenible de recursos naturales, la reducción de riesgos para la salud humana y la mitigación de los impactos ambientales derivados de actividades mineras, agrícolas e industriales. Sin embargo, aún se requiere ampliar las investigaciones in situ, con el fin de validar la escalabilidad de estas tecnologías limpias y generar protocolos estandarizados que permitan su incorporación en políticas públicas de recuperación ambiental.

## Financiamiento

Ninguno.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Contribución de autoría

Motta-Machicado, L. A.: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, recopilación de datos, escritura (preparación del borrador final).

## Referencias bibliográficas

- Ambaye, T. G., Chebbi, A., Formicola, F., Prasad, S., Gomez, F. H., Franzetti, A., & Vaccari, M. (2022). Remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons and its reuse for agriculture: Recent progress, challenges, and perspectives. *Chemosphere*, 293, 133572. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133572>
- Arias, A., Ramirez, A., Fernandez, V., & Sanchez, N. E. (2016). The use of Common Duckweed (*Lemna mino*) in the treatment of wastewater from the washing of sisal fiber (*Furcraea bedinghausii*). *Ingeniería y Competitividad*, 18(2), 25-34.
- Carreño Sayago, U. F., Granada Torres, C. A., (2017). Design, Development, and Evaluation of a Laboratory-Scale Phytoremediation System Using *Eichhornia Crassipes* for the Treatment of Chromium-Contaminated Waters. *Tecciencia*, 12(22), 7-14. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.22.2>
- Clemente Huachen, J. P., Medina Contreras, J., Pfuño, J. D. L., Pariona Aguilar, L. A., & Gutiérrez Vélchez, P. P. (2021). Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). *Acta Agronómica*, 70(2), 163-170. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.94208>
- Correa Cuba, O., Fuentes Bernedo, F. E., & Coral Surco, R. G. (2021). Contaminación por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray – Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(1), 26-38. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.320>
- Díaz-Martínez, M. E., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., Almaraz-Suarez, J. J., & García-Barradas, O. (2013). Crecimiento de *Casuarina equisetifolia* (Casuarinaceae) en suelo con diésel, y aplicación de bioestimulación y bioaumentación. *Revista de Biología Tropical*, 61(3), 1039-1052.
- Duré, G. M., Medina García, L., Rodríguez Bonet, S., Ferreira, F., Sezerino, P. H., & López Arias, T. (2022). Fitorremediación de contaminantes emergentes de origen farmacéutico en humedales flotantes. *Reportes científicos de la FACEN*, 13(2), 153-159. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2022.13.2.153>
- Falcón, F., & Antonio, J. (2017). Propuesta de metodología para la recuperación de suelos contaminados. *Centro Azúcar*, 44(1), 53-60.
- Fournière, E. M. de la, Vega, N. A., Müller, N. A., Pizarro, R. A., & Debray, M. E. (2019). Determinación del mercurio en tejidos vegetales por microPIXE: Aplicación al estudio de la hiperacumulación por *Spirodela intermedia* (Lemnaceae). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 54(2), 1-10.
- García Quintana, Y., Arteaga Crespo, Y., Chico Caiza, V. del R., García Decoro, S., Luna Fox, S. B., & Bañol Pérez, C. (2024). Potencial bioacumulador de metales pesados para la fitorremediación como alternativa para la recuperación del paisaje forestal en un área de

- extracción minera, Napo, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 12(1).  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2310-34692024000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2310-34692024000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- García-Ávila, F., Patiño-Chávez, J., Zhinín-Chimbo, F., Donoso-Moscoso, S., Flores del Pino, L., & Avilés-Añazco, A. (2019). Performance of Phragmites Australis and Cyperus Papyrus in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 286-296.  
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.04.001>
- Hernández Valencia, I., Navas, G., Infante, C., Hernández Valencia, I., (2017). Fitorremediación De Un Suelo Contaminado Con Petróleo Extra Pesado Con Megathyrsus maximus. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(3), 495-503.  
<https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.12>
- Huaranga Moreno, F., Méndez García, E., Quilcat León, V., Bernui Paredes, F., Costilla Sánchez, N., Huaranga Arévalo, F. (2022). Cuantificación de Cu, Pb, A s y Cd absorbidos por el "girasol" Helianthus annus L. (Asteraceae) presentes en suelos agrícolas contaminados por relaves mineros. *Arnaldoa*, 29(1), 119-136.  
<https://doi.org/10.22497/arnaldoa.291.29107>
- Humanante Cabrera, J. J., Moreno Alcivar, L. C., Grijalva-Endara, A., Tinedo, R. W. S., & Tomalá, J. A. S. (2022). Eficiencia de remoción e impacto del sistema de tratamiento de aguas residuales del sector urbano y rural de la Provincia de Santa Elena. *Manglar*, 19(2), 177-187. <https://doi.org/10.17268/manglar.2022.022>
- Kannan, S. P., Babu, B. H., Murali krishnan, G., Stanislas, M. W., & Dinakarkumar, Y. (2025). Integrative approaches to phytoremediation: Mechanisms, enhancing strategies, and environmental applications. *Next Research*, 2(3), 100636.  
<https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100636>
- Kumar, R., Qureshi, M., Vishwakarma, D. K., Al-Ansari, N., Kuriqi, A., Elbeltagi, A., & Saraswat, A. (2022). A review on emerging water contaminants and the application of sustainable removal technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100219. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100219>
- León, R., Pernía, B., Sigüencia, R., Franco, S., Noboa, A., & Cornejo, X. (2018). Potencial de plantas acuáticas para la remoción de coliformes totales y Escherichia coli en aguas servidas. *Enfoque UTE*, 9(4), 131-144. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.286>
- Loza del Carpio, A. L., & Ccancapa Salcedo, Y. (2020). Mercurio En Un Arroyo Altoandino Con Alto Impacto Por Minería Aurífera Artesanal (La Rinconada, Puno, Perú). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(1), 33-44.  
<https://doi.org/10.20937/rica.2020.36.53317>
- Madera-Parra, C. A. (2016). Treatment of landfill leachate by polyculture constructed wetlands planted with native plants. *Ingeniería y Competitividad*, 18(2), 183-192.
- Madera-Parra, C. A., Peña-Salamanca, E. J., & Solarte-Soto, J. A. (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.
- Mancilla-Villa, O. R., Gómez-Villaseñor, L., Palomera-García, C., Hernández-Vargas, O., Guevara-Gutiérrez, R. D., Ortega-Escobar, H. M., Flores-Magdaleno, H., Can-Chulim, Á., Sánchez-Bernal, E. I., Avelar-Roblero, J. U., & Cruz-Crespo, E. (2023). Metales pesados en agua y macroinvertebrados de la cuenca del río Ayuquila-Armería (México) y sus afluentes. *Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1603>
- Marques-Benavides, L., Modesto-Sánchez, D., Saucedo-Martínez, B. C., Rico-Cerda, J. L., Bribiesca-Rodríguez, L., & Sánchez-Yáñez, J. M. (2020). Phaseolus vulgaris en el

- tratamiento de suelo un agrícola contaminado por hidrocarburos. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 11(2), 94-102.
- Mayta, R., & Mayta, J. (2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(3), 331-340.
- Medina Garcia, L., Ferreira, F. P., Kurita Oyamada, H. G., Rodríguez Bonet, S., Galeano, E. F., Viera, M. R., Medina Garcia, L., Ferreira, F. P., Kurita Oyamada, H. G., Rodríguez Bonet, S., Galeano, E. F., & Viera, M. R. (2019). Fitorremediación de cromo en efluente de curtiembre empleando *Eichhornia crassipes*. *Reportes científicos de la FACEN*, 10(1), 25-36. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2019.10.1.25>
- Medina, L., Duré, G., McGahan, S., Kurita-Oyamada, H. G., Villagra Carrón, V., Blanco, C., López Arias, T. (2024). Bioabsorción y traslocación de cromo trivalente en la macrófita flotante *Pistia stratiotes*. *Reportes científicos de la FACEN*, 15(2), 67-75. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2024.15.2.067>
- Meili, L., Lins, P. V. S., Costa, M. T., Almeida, R. L., Abud, A. K. S., Soletti, J. I., Dotto, G. L., Tanabe, E. H., Sellaoui, L., Carvalho, S. H. V., & Erto, A. (2019). Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: Experimental investigation and phenomenological modelling. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 141, 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.011>
- Mendoza Guerra, Y. I., Castro Echavez, F. L., Marín Leal, J. C., & Hedwig Behling, E. (2016). Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia). *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 39(2), 071-079.
- Mendoza, Y. I., I. Pérez, J., Galindo, A. A. (2018). Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. *Información tecnológica*, 29(2), 205-214. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000200205>
- Milquez Sanabria, H. A., Montagut, J. C. (2023). Impacto de los contaminantes emergentes en el entorno acuático y los tratamientos para el control y remoción en los cuerpos hídricos. Revisión literaria. *Ingeniería y competitividad*, 25(3). <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.12551>
- Munive Cerrón, R., Gamarra Sánchez, G., Munive Yachachi, Y., Puertas Ramos, F., Valdiviezo Gonzales, L., Cabello Torres, R., Munive Cerrón, R., Gamarra Sánchez, G., R. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado, remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 177-186. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.02.04>
- Munive Cerrón, R., Loli Figueroa, O., Azabache Leyton, A., & Gamarra Sánchez, G. (2018). Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551-560. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.11>
- Narváez Romero, C., Kalinhoff Rojas, C., Sánchez Rodríguez, A., (2024). Potencial del arbusto *Lantana camara* L. (Verbenaceae) para la fitoestabilización y volatilización de mercurio. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 40. <https://doi.org/10.20937/rica.54790>
- Navas-Gallo, N. A., Vargas-Díaz, C. E., & Rodríguez-Esteban, L. M. (2024). Alteración de la calidad del agua por el vertido de aguas residuales en el municipio de San Benito, Colombia. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 3(1), e634-e634. <https://doi.org/10.51252/reacae.v3i1.634>
- Oggero, A. S., Nakayama, H. D., Ávalos, C. R., Garcia, I. C., Benítez, J. V., Ayala, J., Elkhilili, R., & Peralta, I. (2021). Eficiencia de la absorción de cobre (Cu) y cromo (Cr), una propuesta

- de fitorremediación de efluentes mediada por *Typha domingensis*. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 26(2), 100-113. <https://doi.org/10.32480/rscp.2021.26.2.100>
- Ortega-Ortega, R. E., Beltrán-Herrera, & Marrugo-Negrete, J. L. (2011). Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (*Gynerium sagittatum*) (Aubl) Beauv. In vitro. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 13(1), 33-41.
- Pérez-Hernández, V., Ventura-Canseco, L. M. C., Gutiérrez-Miceli, F. A., Pérez-Hernández, I., Hernández-Guzmán, M., Enciso-Sáenz, S., (2020). The potential of *Mimosa pigra* to restore contaminated soil with anthracene and phenanthrene. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 755-769. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.603>
- Pérez-Villar, M. M., Zorrilla-Velazco, M., Domínguez-Martínez, L., González-Roche, Y. M., & González-González, M. (2022). Determinación de los coeficientes de fitorremediación de cadmio y plomo en el Romerillo americano. *Revista Cubana de Química*, 34(3), 477-493.
- Ponce, J., Andrade, J. G. da S., dos Santos, L. N., Bulla, M. K., Barros, B. C. B., Favaro, S. L., Hioka, N., Caetano, W., & Batistela, V. R. (2021). Alkali pretreated sugarcane bagasse, rice husk and corn husk wastes as lignocellulosic biosorbents for dyes. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100061. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100061>
- Ramos Mancheno, A. D. de J. (2024). Efectos del consumo de agua contaminada en la calidad de vida de las personas. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 9(1), 614-632.
- Sahoo, A., Chhotaray, S. P., Meher, I., Behera, S. P., Pal, A., Meena, M., Swapnil, P., Yadav, A., & Bhardwaj, R. (2025). Phytoremediation for a sustainable future: Integrating plant based strategies in soil and wastewater remediation. *Bioresource Technology Reports*, 102266. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102266>
- Silva-Mori, K., Ramírez Ramírez, W., Chuquimbalqui-Marina, D., & Azabache-Aliaga, Y. D. (2024). Fitorremediación con *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados de un botadero. <https://revistas.unsm.edu.pe/index.php/reacae/article/view/649>
- Tamires Petry, C., Trindade Costa, D., & Droste, A. (2020). Removal Of Ammoniacal Nitrogen From Municipal Landfill Leachate With Floating *Typha Domingensis* (Typhaceae). *Acta Biológica Colombiana*, 25(1), 5-13. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n1.74749>
- Valle, S. M.-D., Mago-Córdova, A., Carreño-Farfán, C., Sánchez-Purihuamán, M., Caro-Castro, J., Carbajal-Gamarra, M., (2024). Association between weeds and plant growth-promoting rhizobacteria in the phytoremediation of lead-contaminated soil. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 77(2), 10667-10677. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v77n2.108353>
- Vera, A., Ramos, K., Camargo, E., Andrade, C., Núñez, M., Delgado, J., Cárdenas, C., & Morales, E. (2016). Fitorremediación de aguas residuales con alto contenido de plomo utilizando *Typha domingensis* y *Canna generalis*. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 39(2), 088-095.
- Vilca Tisnado, H. K., Delgado Osorio, M. K., Romero Vargas, F. F., Mestas Valdivia, B. R., Quipuscoa Silwstre, V., Lima Coasaca, R., Portilla Llerena, J. P., & Navarro Oviedo, R. D. (2022). Respuesta bioquímica de *Paronychia microphylla* Phil., *Ambrosia artmisiodes* Phil. Y *Croton ruizianus* Müll. Arg. Frente al mercurio para su bioprospección en fitorremediación. *Idesia (Arica)*, 40(4), 91-99. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000400091>
- Villabona-Ortíz, A., Tejada-Tovar, C., & Ortega-Toro, R. (2020). *Adsorption Thermodynamics of Cr(VI) Removal by Using Agro-Industrial Waste of Oil Palm Bagasse and Plantain Peels*. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-56092020000300022&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092020000300022&lng=en&nrm=iso&tlng=en)