



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Evaluación de las técnicas de fitorremediación en el tratamiento  
de metales pesados en aguas residuales industriales

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniero Ambiental

**AUTORES:**

Bocanegra Montes, Roberth Saul ([orcid.org/0000-0001-6826-8861](https://orcid.org/0000-0001-6826-8861))

Sanchez Altamirano, Jeison Jordi ([orcid.org/0000-0002-3682-3231](https://orcid.org/0000-0002-3682-3231))

**ASESOR:**

Dr. Cruz Monzón, José Alfredo ([orcid.org/0000-0001-9146-7615](https://orcid.org/0000-0001-9146-7615))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo Sostenible y Adaptación al Cambio Climático

**TRUJILLO – PERÚ**

**2022**

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a las futuras personas que encontraran esta tesis, para que pueda servir de ayuda en las próximas investigaciones.

### **Roberth Saul Bocanegra Montes**

Dedico esta investigación a mi familia ya que gracias a ellos estoy logrando forjar un mejor camino, también al público en general ya que esta servirá como información esencial para futuras investigaciones.

### **Jeison Jordi Sánchez Altamirano**

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios, padres, amigos y personas cercanas, por el apoyo brindado a lo largo de mi vida estudiantil, sin ellos no hubiera sido posible este logro.

### **Roberth Saul Bocanegra Montes**

Agradezco principalmente a Dios y a mi familia por brindarme el apoyo para lograr todo esto, también a mis docentes por brindarme los conocimientos que he adquirido durante sus enseñanzas y por último a mis amigos por brindarme el apoyo emocional que se necesita en momentos de dificultades.

### **Jeison Jordi Sánchez Altamirano**

## Índice de contenido

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenido.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de figuras.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
III. METODOLOGÍA.....	9
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	9
3.2. Categorías, Subcategorías y Matriz de categorización .....	9
3.3. Escenario de estudio .....	9
3.4. Participantes .....	9
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	10
3.6. Procedimientos .....	10
3.7. Rigor científico .....	11
3.8. Método de análisis de la información .....	12
3.9. Aspectos éticos.....	12
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
V. CONCLUSIONES.....	24
VI. RECOMENDACIONES.....	25
REFERENCIAS .....	26
ANEXOS.....	35

## Índice de tablas

Tabla Nº 1.	Palabras claves para la búsqueda en las plataformas.....	10
Tabla Nº 2.	Criterios de inclusión.....	11
Tabla Nº 3.	Técnicas de fitorremediación aplicadas en la remoción de metales pesados según tipo de agua residual industrial. ....	14
Tabla Nº 4.	Especies fitorremediadoras según el tipo de industria.....	17
Tabla Nº 5.	Especies con mejores resultados en la remoción de metales pesados en aguas industriales. ....	20

## Índice de figuras

Figura N° 1.	Artículos seleccionados por países .....	13
Figura N° 2.	Remoción de metales pesados según la especie fitorremediadora.....	22

## Resumen

Las técnicas de fitorremediación nacen como una opción económica para tratar aguas residuales industriales, sin embargo, al no ser una tecnología tan utilizada hace que pierda la importancia necesaria para tratar metales pesados de aguas residuales industriales es por ello, que la presente investigación, tuvo como objetivo evaluar las técnicas de fitorremediación que han demostrado mayor eficiencia en la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales, para ello se aplicó una revisión sistemática de artículos indexados de acceso abierto de las diferentes bases de datos como ScienceDirect, Scopus, Google Académico y Scielo. Los resultados muestran que la rizofiltración alcanza valores de remoción máximos de 99.6%, 97% y 96% para los metales Cu, Fe y Zn respectivamente. Así mismo que las especies fitorremediadoras más eficientes en la remoción de dichos metales son *Medicago sativa*, *Phragmites communis* y *Zostera marina* respectivamente. Se concluye que una de las técnicas más eficientes en la remoción de Cu, Fe y Zn presentes en aguas residuales industriales es la rizofiltración.

**Palabras clave:** Técnicas, fitorremediación, aguas residuales, metales pesados, rizofiltración.

## Abstract

Phytoremediation techniques were born as an economic option to treat industrial wastewater, however, since it is not a widely used technology, it loses the necessary importance to treat heavy metals from industrial wastewater, which is why the present investigation, aimed to evaluate the phytoremediation techniques that have shown greater efficiency in the removal of heavy metals in industrial wastewater, for which a systematic review of open access indexed articles from different databases such as ScienceDirect, Scopus, Google was applied. Academic and Scielo. The results show that the rhizofiltration reaches maximum removal values of 99.6%, 97% and 96% for the metals Cu, Fe and Zn respectively. Likewise, the most efficient phytoremediating species in the removal of said metals are *Medicago sativa*, *Phragmites communis* and *Zostera marina*, respectively. It is concluded that one of the most efficient techniques in the removal of Cu, Fe and Zn present in industrial wastewater is rhizofiltration

**Keywords:** Techniques, phytoremediation, wastewater, heavy metals, rhizofiltration



## I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las aguas residuales son un gran riesgo para la salud humana, una mala gestión en el tratamiento de estas, traería serios problemas para el ecosistema (González et al., 2015, p. 5). Más del 80 % de las aguas ya utilizadas en todo el mundo y más del 95 % de las aguas de los países que no han logrado un nivel significativo de industrialización (países en vías de desarrollo), liberan sus aguas sin aplicar algún tipo de tratamiento que contrarreste la contaminación hídrica (Valdez et al., 2018, p. 11).

En la actualidad, existen distintos métodos que son muy eficientes para eliminar contaminantes en aguas residuales los cuales son tratamientos convencionales, que están basados en los procesos físico-químicos y los no convencionales, se caracterizan por ser de forma innovadora y también por usar sistemas biológicos (Chuquilin, 2020, p. 7). Una de las técnicas más aplicadas para disminuir las concentraciones de metales pesados en aguas residuales es la fitorremediación. Dentro de sus procesos más eficientes encontramos la rizofiltración, fitoestabilización y fitovolatilización (Covarrubias y Peña, 2017, p. 11).

Otra técnica que se aplica es el tratamiento con macrófitas, pero son métodos de descontaminación lentos porque requieren un período de espera para el crecimiento de plantas y microorganismos asociados (Trigal, 2018, p. 11). Por otra parte, una de las limitaciones o desventajas que este tratamiento tiene, es que no puede desarrollarse con normalidad en climas con bajas temperaturas (Saavedra, 2017, p. 58).

La fitorremediación se entiende como la aplicación de tecnologías eco amigables que, a través del empleo de plantas, logran disminuir las elevadas concentraciones de agentes contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en los suelos como en el agua (Núñez et al., 2015, p. 1). Asimismo, es una buena opción de tratamiento siendo económico en cuanto al desarrollo, alcanzando ser una técnica eficiente y enfocada en el cuidado del medio ambiente, siendo factible y de gran aporte para cumplir con lo establecido en las normas ambientales (Behling et al., 2016, p. 64).

Las técnicas de fitorremediación, como todo proceso, sufre de algunas desventajas al momento de aplicarlas como, el tiempo que invierte el proceso, depende de la

planta como va asimilando los contaminantes, los días que requiere en algunos casos la planta no llega a tolerar los contaminantes y de esta manera se puedan infiltrar en la cadena alimenticia del ecosistema (Peralta, 2016, p. 77). Así mismo (Hu, et al., 2020 p. 8) agrega que, en algunos casos la planta no puede soportar niveles muy altos de contaminantes, lo que llevaría a otras plantas que no tengan esta función absorban estos los contaminantes y puedan pasar a los organismos que lo consumen.

Las especies de plantas más utilizadas para la reducción de contaminantes en las aguas residuales son *Nymphoides humboldtiana*, *Nasturtium officinale* y *Eichhornia crassipes*, siendo esta última la que posee alta capacidad de remoción de contaminantes (Ayala et al., 2018, p. 25).

El proyecto desarrollado se justificó en la importancia de la fitorremediación en el cuidado del medio ambiente, porque nace como una alternativa para el tratamiento, recuperación y eliminación de sustancias, tales como metales pesados, que se encuentran presentes en aguas residuales provenientes de los procesos industriales. Debido a su rápida adaptabilidad, su bajo precio y aplicación, hace de esta una opción favorable por encima de las otras técnicas de tratamiento de aguas. Gracias a la capacidad que tienen algunas plantas, se logra disminuir grandes cantidades de contaminantes en el agua, siendo una técnica favorable para el cuidado del medio ambiente. Es por ello, que el proyecto que se desarrolló buscó generar información necesaria para las investigaciones futuras.

En base a lo expuesto se planteó la siguiente problemática: ¿Cuáles son las técnicas de fitorremediación que han demostrado mayor eficiencia en la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales?

Para su desarrollo se planteó el siguiente objetivo general: evaluar las técnicas de fitorremediación que han demostrado mayor eficiencia en la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales, asimismo, los objetivos específicos fueron: Determinar la técnica fitorremediadora de mayor aplicación en la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales, identificar las principales especies fitorremediadoras en aguas residuales industriales y determinar las especies de plantas fitorremediadoras con mejores resultados en la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales.

## II. MARCO TEÓRICO

Según Domínguez y Gómez (2016) en su artículo “Fitorremediación de las aguas residuales provenientes de la minería que contenían mercurio” usó *Eichhornia crassipes*, para evaluar la capacidad fitorremediadora frente a aguas contaminadas con Hg, lo cual consistió, en adaptarla alrededor de 30 días, para que posteriormente pudieran aplicar esta planta en el medio contaminado. Teniendo como resultado, que, durante el primer mes, pudo remover cerca de un 80% del Hg presente en el cuerpo de agua. Concluyeron, que el Jacinto de agua es muy efectivo en la recuperación de aguas contaminadas por metales pesados como el mercurio.

Además, Mustafa & Hayder (2021), en su artículo titulado “Studies on aquatic weeds applied in wastewater phytoremediation”, buscaron las principales y eficientes aplicaciones de las especies dentro de la fitorremediación de aguas residuales, tales como, *Pistia stratiotes* y *salvinia molesta*, donde obtuvieron como resultados que dichas especies eliminaron 81,66% (Cr), 69,81% (Cu), 65,2% (Fe), 66,39% (Ni) y 74,85% (Pb) obteniendo datos favorables en su investigación, de tal manera concluyeron que gracias a los estudios que no cambian su estructura a ser utilizadas en este proceso, son plantas utilizables en la fitorremediación de aguas residuales.

Del mismo modo, Oyuela, Fernandez & Gutierrez (2017) en su artículo “Native plants used in phytoremediation of heavy metals, wetlands used in phytoremediation”, se enfocan en las plantas fitorremediadoras que se localizan en Bogotá. Para el desarrollo del artículo realizaron una búsqueda bibliográfica mediante palabras claves, en relación a metales pesados y su tratamiento en aguas residuales, de esta manera lograron reunir información sobre fitorremediación. Lograron investigar 41 especies nativas de Colombia, donde 6 de ellas (*Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Azolla pinnata*, *Myr iophyllum aquaticum*, *Ludwigina palustris* y *Mentha aquaticum*), tienen la capacidad de eliminar metales pesados, por lo tanto, eran aptos para la fitorremediación. Finalmente, las investigaciones recientes buscan encontrar más especies fitorremediadoras dentro de Colombia, para poder recuperar lugares que estén contaminados con metales pesados.

Asimismo, Vargas et al. (2018) en su artículo titulado “Estado del arte, del uso de la *Eichhornia crassipes* en la fitorremediación de aguas residuales industriales” pretendió analizar todo aquello que abarca con el desarrollo y las capacidades que tiene la planta llamada lirio de agua, mediante conocimientos previos y empíricos, lograron observar el desenvolvimiento de esta especie dentro de las aguas residuales, arrojando como resultados máximos de remoción muy eficientes en metales pesados: (As 80%, Fe 90.1%, Cu 95%, Cr 89%, Cd 85% y Zn 95%). Dando como conclusión que la mencionada especie tiene un fuerte potencial en la recuperación de aguas contaminadas provenientes de fuentes industriales.

Además, Al - Thani & Yasseen (2020), en su artículo “Phytoremediation of polluted soils and waters by native Qatari plants: Future perspectives”, crearon una guía para los científicos del país de Qatar, para que pudieran identificar las plantas endémicas fitorremediadoras, que pudieran ser usadas en el tratamiento de aguas residuales industriales. Donde encontraron a la especie fitorremediadoras (*Phragmites australis*) con mayor eficiencia al momento de eliminar metales pesados (Cd, Zn, Cu, Pb, Fe, Mn y Ni). Además, pudieron evaluar las principales ventajas de la fitorremediación en la limpieza de aguas y suelos, así como también degradar los componentes de los combustibles fósiles y metales pesados. Las aguas residuales son utilizadas para regar áreas potencialmente utilizables para posteriormente convertirse en zonas verdes en Qatar.

Velásquez (2017) en su artículo “Suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos. Aplicación de la fitorremediación como estrategia de recuperación biotecnológica”. Las principales causas de la contaminación se deben a las actividades antropogénicas como derrames dentro de la extracción y el transporte de combustible fósil, por lo cual se utilizó a la fitorremediación como unas tácticas para remediar las aguas, aire y suelo contaminados por estos metales. Esta investigación demuestra que las especies *J. curcas*, *P. marginatum*, *C. annuum* y *S. bifidus*, tienen la capacidad de acumular mercurio (Hg) en sus tejidos. De tal manera se concluyó que estas actividades generan grandes efectos en los suelos y agua, es por esto que la fitorremediación es una buena opción, ya que es un proceso natural para el tratamiento de áreas contaminadas tanto con metales como hidrocarburos.

Según Hannier et al. (2018) en su artículo titulado “Using *Sarcocornia fruticosa* and *Saccharomyces cerevisiae* for remediate the sediments contaminated with metals in the lagoon of Ria Formosa” en el cual analizaron dos sitios contaminados por metales pesados: Sitio A (sitio más contaminado por estar más cerca a la descarga directa del efluente) y sitio B (lugar menos contaminado y más alejado de la descarga directa del efluente) donde aplicaron estas plantas experimentando de manera in situ. Lo cual compararon los resultados de ambas plantas, luego de 20 días, en el cual midieron la concentración total de metales pesados. Dando como resultado que la *S. fruticosa* que inoculada con *S. cerevisiae* en el sitio A obtiene mayor porcentaje de reducción de metales, obteniendo (Ni 40%, Cu 30%, Cr 37% y Cd 19%) mientras que la especie *S. fruticosa* sola en el sitio B dio resultados como (Ni 22%, Cu 29%, Cr 44% y Cd 34%). En conclusión, la especie *S. fruticosa*, tiene una capacidad fitorremediadora, pero al ser inoculada con *S. cerevisiae*, su capacidad fitorremediadora aumenta aún más.

Masarat (2021) en su artículo titulado “Heavy metals accumulation in aquatic macrophytes from an urban lake in Kashmir Himalaya, India” en el cual estudiaron metales pesados como el plomo, cadmio, cobre, cobalto, utilizando *Potamogeton crispus*, *Phragmites australis* y *Ceratophyllum demersum* dentro del lago Nigeen, la India. La concentración de metales estuvo por encima de los LMP establecidos por la OMS. Donde las tres especies seleccionadas concentraron los metales de manera ordenada desde el hierro hasta el cobalto. Dando como resultado que estas plantas tienen un alto potencial fitorremediador de metales pesados tanto para agua residuales, suelo y ecosistemas contaminados

Según Rakesh et al. (2021) en su artículo “Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review”. Buscó eliminar o recuperar aguas industriales contaminadas con metales pesados como Cr, Cd, Ni, Zn, Pb y Hg, que eran perjudiciales para la naturaleza en grandes cantidades. Empleando la fitorremediación por encima de métodos electroquímicos, que generan residuos y gastos adicionales en procesos faltantes, por ende, se buscó obtener datos sobre la fitorremediación para la eliminación y tratamiento de metales pesados. Logrando encontrar especies la *Dicerocaryum eriocarpum* que es muy eficiente en la biosorción de metales como: Zn 60%, Ni 99.94%, Fe 99.87%, Cr 95.54%, Cd

96.21% y Pb 93.7%. Finalmente concluyeron que la fitorremediación es muy eficiente y rentable y está emergiendo como una de las técnicas muy prometedoras para tratamientos de efluentes con carga de metales pesados de procesos industriales.

Así mismo, se menciona el concepto de fitorremediación como el uso de diversas plantas, que sirven para acumular y eliminar sustancias tóxicas para la vida, que se encuentran en los elementos principales como sol el agua, suelo y aire, generalmente se trata de los metales pesados Castrillón et al. (2016, p. 65). A lo que Vargas (2018), añade que, estas aprovechan el metabolismo de las plantas para volatilizar eliminar, retener y absorber no solo metales pesados, también hidrocarburos, compuestos orgánicos y metales radiactivos (p 109), Huamán (2020, p. 17) concluye que son técnicas que pueden aplicarse tanto dentro del lugar afectado como fuera de él.

Por otra parte, los metales pesados tienen una densidad y masa atómica alta, por lo cual son considerados tóxicos y un peligro para el medio ambiente aun en magnitudes menores Pabón (2020, p. 9), es por ello, que ciertas cantidades de estos al encontrarse dentro de las aguas residuales industriales antes de ser devueltas al río, generan graves problemas de contaminación como lo afirma Espigares y Pérez (2018, p. 11). Las principales actividades industriales que generan estos metales son la minería, gestión de residuos, generación de baterías, agricultura y ganadería, fundición, aceros, textil, azucarera Perdomo (2015, p. 74). A lo que Benítez (2020), añade que las actividades tales como la quema de combustibles fósiles, fabricación de municiones y creación dispositivos para rayos X (p. 10), también se encuentran dentro de ellas. Los metales pesados que más se encuentran dentro de las aguas residuales son As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Fe, Pb, Hg. Caviedes (2015, p. 74), Tejada y Villabona (2015), concuerda que el Zn, Hg, Pb, Ni, Cd, Cr, son nocivos para el ser humano como para la vida en general, por lo que es necesario disminuir y eliminar la acumulación de estos en los cuerpos de agua (p. 118) del mismo modo, Oviedo (2018), añade que el Cr, Zn, Cu y Cd, son los metales pesados que frecuentemente se encuentran en este tipo de aguas (p. 116). La toxicidad de estos, está relacionada con su movilidad en el medio ambiente, persistencia, etc. Sandoval (2015, p. 74), y con esto trae consigo diferentes

enfermedades como el daño renal, asma crónica, letargo, artritis, insomnio, cáncer, diarrea, vómito Muñoz (2015, p. 74).

Así mismo, Castrillón et al (2016, p. 67) especifica que son tres las técnicas más relevantes en el tratamiento de cuerpos de aguas contaminadas con actividades industriales, que son afectadas por este tipo de metales, las cuales son la rizofiltración, fitoestabilización y fitovolatilización.

La rizofiltración es una técnica que sirve para descontaminar las aguas, absorbiendo el contaminante mediante sus raíces y acumulándolos ya sea de manera interna o externa López *et al.* (2018, p. 601), a lo que Gallegos, (2017, p. 31), añade que son efectivos en el tratamiento de metales pesados como As, Bo, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Se y Zn.

Fitoestabilización reduce la capacidad de propagarse de los metales mediante plantas y árboles, sirve para tratar metales como Pb, Cd, Zn, As, Cu, Se Obregón (2016, p. 50).

La fitovolatilización es el proceso mediante el cual la absorción del contaminante se da junto al crecimiento de la planta, en algunos casos llegan hasta la hoja y de esta forma se volatilizan hacia la atmósfera López (2015, p. 70)

Según Reyes (2016, p. 13) el proceso de la fitorremediación empieza desde la raíz de la planta, ya que estas están expuestas a los contaminantes y existe una conexión entre la planta y los microorganismos, a lo cual Ortega y Sanchez (2019, p. 19) concuerda en que, el proceso comienza desde la raíz, ya que está expuesta en el medio contaminado.

Para el desarrollo de estas técnicas son utilizadas las plantas macrófitas o acuáticas, que crecen en zonas inundables y acústicas, se dividen en grupos como flotantes, emergentes sumergidas y enraizadas. Huamán et al. (2020, p. 19), con lo que Rojas et al. (2020, p. 10) confirma que, según a su estilo de vida se clasifican en flotantes, emergentes y sumergidas, además, Robles (2015, p. 15) indica que el tratamiento de estas se lleva a cabo en estanques poco profundos para asegurar el contacto de las raíces de la planta con el agua.

Para hacer el uso de las especies de plantas cumple ciertos requisitos, como ser tolerantes y acumuladores de metales, ser cosechable de manera sencilla, crecimiento y productividad alta y además de ser del medio local. Núñez et al. (2015, p. 73).

Estas especies se dividen en emergentes como *Sagittaria latifolia*, *Phragmites communis* y *Typha dominguensis*, por su parte las flotantes tales como *Eichhonia crassipes*, *Salvinia minima* y *Lemna spp*, mientras que por las sumergidas están, *Ceratophyllum demersum*, *Phyllospadix torreyi*, *Hydrilla verticillata* Rojas y Suyon (2020, p. 11).

Todo proceso tiene su pro y contra, debido a ello algunas ventajas que nos presentaron este sistema fueron, que las plantas son extractoras naturales, tienen un proceso mucho más accesible que la biorremediación, es apropiado tanto para la degradación como para la descontaminación de aguas residuales. Gallegos (2020, p. 35) además de esto, Castrillón et al. (2016, p. 65) afirma que una las desventajas de este proceso son que, al usar las especies de árboles, el proceso es lento, el crecimiento de la planta depende de los contaminantes a los que está expuesto, no todas las plantas son acumuladoras, puede causar el aumento de mosquitos.



### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

La investigación desarrollada fue de tipo básico, por su nivel de profundidad descriptivo, se realizó un diseño de estudio longitudinal, cualitativo, documental y corresponde a una revisión sistemática sin metaanálisis.

De acuerdo al diseño la investigación fue de carácter no experimental, por el hecho que no existió manipulación de variables, por otro lado, solo se recolectó información actualizada, mayor a los últimos 7 años.

#### **3.2. Categorías, Subcategorías y Matriz de categorización**

En la investigación, se elaboró una matriz de categorización apriorística, donde contiene las categorías (técnicas de fitorremediación, metales pesados y especies de plantas) y sub categorías (contención: Fitoestabilización y Rizofiltración, eliminación: Fitovolatilización; As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn; Emergentes, flotantes y sumergidas) cada uno correspondiendo a las preguntas de los objetivos específicos. (Anexo N° 1)

#### **3.3. Escenario de estudio**

La investigación estuvo conformada por plataformas digitales denominadas bases de datos, específicamente ScienceDirect, Scopus, Scielo y Google Académico, considerando las áreas asociadas al tema de interés.

#### **3.4. Participantes**

Dentro de la investigación se seleccionaron los artículos científicos de mayor relevancia que contuvieron todos los criterios de selección, que abarcaron tanto las técnicas de fitorremediación como las especies de plantas requeridas para el tratamiento de las aguas residuales industriales.

### 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica que se utilizó fue el análisis documental, ya que esta investigación fue de corte cualitativo y descriptivo, en donde se evaluaron diversos artículos científicos en periodo de años y directamente ligados al tema de interés, donde se utilizó la ficha de recolección de datos como instrumento.

### 3.6. Procedimientos

Se procedió con la recolección de los artículos, como lo muestra la Tabla N.º 1, con previa elección de las palabras claves: "phytoremediation techniques and heavy metals and industrial wastewater", para dar mayor eficiencia al momento de la búsqueda en la base de datos de ScienceDirect, Scielo, Google Académico y Scopus.

**Tabla N° 1. Palabras claves para la búsqueda en las plataformas**

Nº	Base de datos	Palabras claves
1	ScienceDirect	<i>"phytoremediation techniques" and "heavy metals" and "industrial wastewater"</i>
2	SciELO	<i>((phytoremediation in industrial wastewater) or (phytoremediation techniques) or (removal)) AND (heavy metals)</i>
3	Google Académico	<i>"fitorremediación" y "aguas residuales industriales" y "remoción de metales pesados"</i>
4	Scopus	<i>phytoremediation and industrial wastewater and removal heavy metals</i>

Fuente: Elaboración propia

Se consideró los criterios de inclusión como acceso libre, artículos indexados, idioma en inglés y español, además de un periodo máximo de 7 años de vigencia, enfocándonos en los tipos de técnicas como rizofiltración, fitoestabilización y fitovolatilización, como lo demuestra la Tabla N.º 2.

**Tabla N° 2. Criterios de inclusión**

<b>Ítem</b>	<b>Criterios de búsqueda</b>
<b>Tipo de acceso</b>	Acceso libre
<b>Tipo de literatura</b>	Artículos científicos indexados
<b>Idioma</b>	Español Inglés
<b>Año de publicación</b>	2015 – 2022
<b>Tipos de fitorremediación</b>	Rizofiltración Fitoestabilización Fitovolatilización

Fuente: Elaboración propia

Una vez definido los criterios de búsqueda y los artículos seleccionados para el desarrollo de los objetivos, se procedió a plasmar la información en una tabla de Excel, organizando en columnas con autores, método, tipo de agua residual, técnica, concentración y la cantidad de remoción de los metales (Hg, Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, As, Fe, Ni). Así mismo, los resultados obtenidos los separamos por objetivos, obteniendo 3 tablas, en los cuales comparamos los resultados con otros autores, de esta manera desarrollando la discusión. Finalmente, elaboramos las conclusiones para cada objetivo planteado, además de concluir con las recomendaciones para las próximas investigaciones.

### **3.7. Rigor científico**

La investigación fue avalada por el uso de artículos científicos encontrados mediante la búsqueda de archivos indexados en la base de datos, este tipo de artículos presentan una data de alta veracidad de sus resultados ya que fueron evaluados por especialistas con alta experiencia antes de ser publicados, esto aseguró una información confiable. Asimismo, para dar confiabilidad a los artículos, se hizo una recopilación de información veraz y exhaustiva y se extrajo la información más relevante en cuanto al tema de interés.

### **3.8. Método de análisis de la información**

La información recolectada en la ficha de datos fue procesada utilizando una tabla en Microsoft Excel donde se recolectó la información y se hizo una selección de los artículos que sirvieron para el desarrollo de la investigación. Posteriormente, se analizaron los resultados agrupándolos por tipos de industria, tipos de técnica y las especies utilizadas, según el objetivo específico. Finalmente, luego del análisis realizado, se pudo separar una hoja de Excel por cada objetivo.

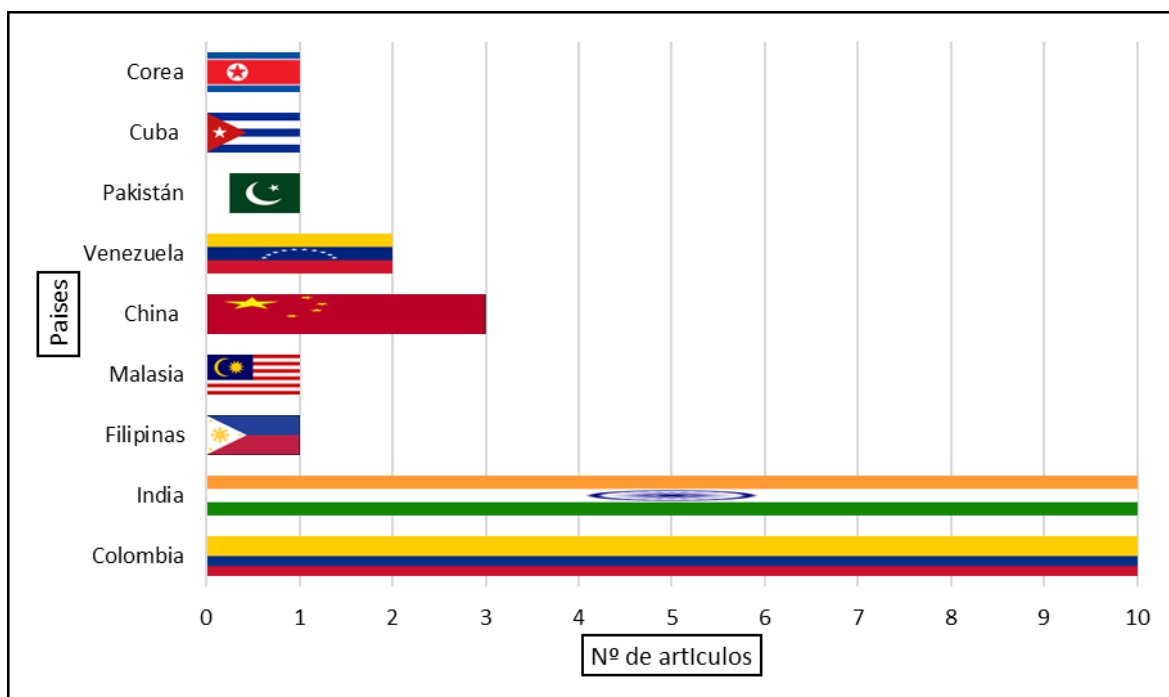
### **3.9. Aspectos éticos**

Dentro de la investigación se aseguró la veracidad y objetividad de toda la información que se obtuvo, garantizando de manera objetiva la contundencia y manipulación de la información de cada autor y se respetó los derechos de autor de cada una de las publicaciones que fueron usadas en el desarrollo de la misma. Asimismo, las referencias se redactaron según el manual ISO 690.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la presente investigación se realizó una búsqueda extensiva de artículos de investigación en las diferentes bases de datos, donde se encontraron investigaciones con temas de acuerdo a los criterios de inclusión establecidos, además se logró identificar los países donde aplicaron estos temas relacionados a la investigación, así como se muestra en la figura N° 1.

**Figura N° 1. Artículos seleccionados por países**



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se seleccionaron únicamente artículos de las diferentes bases de datos mencionadas líneas arriba, se tomaron en cuenta las técnicas de fitorremediación que fueron más eficientes en la remoción de metales pesados encontrados en las aguas residuales industriales, como se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla N° 3. Técnicas de fitorremediación aplicadas en la remoción de metales pesados según tipo de agua residual industrial.**

Ítem	Autores	Método	Tipo de agua residual industrial	Técnica	Concentración (mg/L)	Remoción de metales pesados %									
						Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	As	Fe	Ni	
1	Barros S. (2018)	Experimental	Minera	Rizofiltración	3.0			80	99.6		41				
2	Barros S. (2018)	Experimental	Minera	Rizofiltración	3.0	91.8		63.4							
3	Barros S. (2018)	Experimental	Minera	Rizofiltración	3.0		86.7	81.7							
9	Rai P. (2021)	Experimental	Minera	Rizofiltración	5.0			79	67	79	67		87	69	
10	Rai P. (2021)	Experimental	Minera	Rizofiltración	5.0							38			
11	Rai P. (2021)	Experimental	Minera	Rizofiltración	5.0							50			
12	Yongming, et al. (2020)	Experimental	Minera	Rizofiltración	2.0						93			27	
13	Chandanshive et al. (2020)	Experimental	Textil	Rizofiltración	1000.0		47	18			56	64			
14	Chandanshive et al. (2020)	Experimental	Textil	Rizofiltración	1000.0		50	18			52	46			
15	Correa et al. (2015)	Experimental	Textil	Rizofiltración	1.0										13
28	Zeshan, et al. (2016)	Experimental	Textil	Rizofiltración	50.1		55.2								
19	Priya E. (2017)	Experimental	Textil	Rizofiltración	5.5				97.3						
20	Xin et al. (2020)	Experimental	Curtido	Rizofiltración	0.4			93.3							
7	Sharma et al. (2021)	Experimental	Papelera	Rizofiltración	10.1		29.6		45.3	72.4		56.6	85.8	46.7	
8	Sharma et al. (2021)	Experimental	Papelera	Rizofiltración	10.1		29.5		93.1	57.4	29.1	57.6	93.2	52.2	
27	Sharma et al. (2021)	Experimental	Pulpa y Papel	Rizofiltración	2.0		21		40		19		97	56	
29	Lisintuña et al. (2020)	Experimental	Láctea	Rizofiltración	5.0						70				
30	Lee et al. (2019)	Experimental	Pesquera	Rizofiltración	8.6		75.5			96		89			
16	Sharma et al. (2020)	Experimental	Textil	Fitovolatilización	7.5			80			75				
21	Vera et al. (2016)	Experimental	Petrolera	Fitovolatilización	10.0		94.4								
22	Vera et al. (2106)	Experimental	Petrolera	Fitovolatilización	15.0		95.3								

23	Wang et al. (2021)	Experimental	Eléctrica	Fitovolatilización	2.0		85.5	86.9	87.2	
18	Rezania et al. (2016)	Pre experimental	Petrolera	Rizofiltración	10.1				87.5	
24	Sharma et al. (2021)	Pre experimental	Pulpa y Papel	Rizofiltración	21.1		9	6.4	56.3	6
25	Pérez y Castelblanco. (2019)	Pre experimental	Fábrica de herramientas	Rizofiltración	1.0				63	39
17	Chua et al. (2019)	Pre experimental	Curtido	Fitoestabilización	3.1			60.8		
26	Pérez y Castelblanco (2019)	Pre experimental	Fábrica de herramientas	Fitoestabilización	1.0	99.7	36		58	

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la tabla N° 3 se dio con los resultados que para el tratamiento, contención y eliminación de metales pesados en aguas residuales industriales tales como Hg, Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, As, Fe, Ni, las técnicas de fitorremediación que se pueden aplicar fueron la rizofiltración, fitoestabilización para contener los metales y la fitovolatilización para la eliminación de las mismas, sin embargo, la rizofiltración sobresale como la técnica que fue más utilizada, así señalan en su investigación Rezanía et al. (2015). La rizofiltración es la única técnica específica para el tratamiento de aguas, mientras que las técnicas fitovolatilización y fitoestabilización sirven para tratamientos de agua y suelo, así hacen mención Delgadillo et al. (2017), también señalan que existen estudios de casos donde aplican la técnica de rizofiltración donde diversas plantas tienen la capacidad de acumular ciertos metales pesados como (Pb, As, Cu, Cd, Ni, Cr, Al, Fe, Zn, Mn).

Wei et al. (2021) indica que la rizofiltración facilita el desarrollo sostenible al promover la remediación de la contaminación por zinc por metales pesados. Además, encontraron que la técnica rizofiltración tiene ciertas ventajas como su bajo costo de operación, disposición gratuita y realizable en condiciones con poca luz. Por otro lado, autores como Ansari et al. (2020) mencionan que la técnica rizofiltración bajo especies hiperacumuladoras pueden acumular en sus raíces y también en sus tallos metales como Cd, Zn, Pb y Ni. por lo que estos juegan un papel importante en la recuperación de aguas contaminadas con mencionados metales.

En el caso de rizofiltración autores como Rai Prabhat (2021), quien en la industria minera obtuvo bajo dicha técnica una remoción del hierro en 87% y de cadmio en 79%; a lo cual Vitola et al. (2022), concuerda que haciendo uso de la misma técnica obtuvo una mayor remoción de mercurio en un 99%, cadmio en un 93% y plomo en un 88%, demostrando que dicha técnica es muy eficiente al momento de remover contaminantes como son los metales pesados producidos por actividades industriales mineras.

A continuación, se presenta la variedad de especies de plantas fitorremediadoras con capacidad de remoción de metales pesados provenientes de los diferentes tipos de industrias.



**Tabla N° 4. Especies fitorremediadoras según el tipo de industria.**

Ítem	Autores	Método	Tipo de agua residual industrial	Especie	Concentración (mg/L)	Remoción de metales pesados %								
						Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	As	Fe	Ni
1	Barros S. (2018)	Experimental	Minera	<i>Medicago sativa</i>	3.0			80	99.6		41			
2	Barros S. (2018)	Experimental	Minera	<i>Eichhornia crassipes</i>	3.0	91.8		63.4						
3	Barros S. (2018)	Experimental	Minera	<i>Azolla filiculoides</i>	3.0		86.7	81.7						
9	Rai P. (2021)	Experimental	Minera	<i>Eichhornia crassipes</i>	5.0			79	67	79	67		87	69
10	Rai P. (2021)	Experimental	Minera	<i>Spirodela poliriza</i>	5.0							38		
11	Rai P. (2021)	Experimental	Minera	<i>Pistia stratiotes</i>	5.0								50	
12	Yongming et al. (2020)	Experimental	Minera	<i>Eichhornia crassipes</i>	2.0						93			27
13	Chandanshive et al. (2020)	Experimental	Textil	<i>Vetiveria zizanioides</i>	1000.0		47	18			56	64		
14	Chandanshive et a. (2020)	Experimental	Textil	<i>Ipomoea acuatica</i>	1000.0		50	18			52	46		
15	Correa et al. (2015)	Experimental	Textil	<i>Phragmites australis</i>	1.0									13
28	Zeshan et al. (2016)	Experimental	Textil	<i>Lemma gibba</i>	50.1		55.2							
19	Priya E. (2017)	Experimental	Textil	<i>Eichhornia crassipes</i>	5.5				97.3					
20	Xin et al. (2020)	Experimental	Curtido	<i>Pontederia cordata</i>	0.4			93.3						

7	Sharma et al. (2021)	Experimental	Papelera	<i>Ricinus communis</i>	10.1	29.6	45.3	72.4	56.6	85.8	46.7	
8	Sharma et al. (2021)	Experimental	Papelera	<i>Ranunculus sceleratus</i>	10.1	29.5	93.1	57.4	29.1	57.6	93.2	52.2
27	Sharma et al. (2021)	Experimental	Pulpa y Papel	<i>Phragmites communis</i>	2.0	21	40		19		97	56
29	Lisintuña et al. (2020)	Experimental	Láctea	<i>Opuntia ficusindica</i>	5.0				70			
30	Lee et al. (2019)	Experimental	Pesquera	<i>Zostera marina</i>	8.6	75.6		96		89		
16	Sharma et al. (2021)	Experimental	Textil	<i>Cannabis sativa</i>	7.5		80		75			
21	Vera et al. (2016)	Experimental	Petrolera	<i>Typha dominguensis</i>	10.0	94.5						
22	Vera et a. (2016)	Experimental	Petrolera	<i>Canna generalis</i>	15.0	95.4						
23	Wang et al. (2021)	Experimental	Eléctrica	<i>Eichhornia crassipes</i>	2.0		85.5	86.9	87.2			
18	Rezania et al. (2016)	Pre experimental	Petrolera	<i>Eichhornia crassipes</i>	10.1					87.5		
24	Sharma et al. (2021)	Pre experimental	Pulpa y Papel	<i>Ranunculus sceleratus</i>	21.1		9	6.4	56.3			6
25	Pérez y Castelblanco (2019)	Pre experimental	Fábrica de herramientas	<i>Eichhornia crassipes</i>	1.0					63		39
17	Chua et al. (2019)	Pre experimental	Curtido	<i>Dendrocalamus asper</i>	3.1			60.8				
26	Perez y Castelblanco (2019)	Pre experimental	Fábrica de herramientas	<i>Typha dominguensis</i>	1.0	99.7	36			58		

Fuente: Elaboración propia

Para la tabla N.º 4 se dieron con los resultados que, en las industrias donde mayor aplicación de plantas fitorremediadoras se puede dar fueron la minera y textil, ya que en estas se pudieron remediar mayor de plomo, cadmio y cobre, gracias a plantas como *Medicago sativa*, *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* cabe mencionar que *Eichhornia crassipes* es la más utilizada en tratamientos de aguas contaminadas ya que se adapta fácilmente al medio, logrando un crecimiento muy rápido que permite capturar distintos tipos de metales pesados Domínguez et al. (2016), así mismo, los mismos autores afirman que la especie en la industria minera removió un 70.8% de Hg mostrando una reducción significativa de metales pesados. Por otro lado, Hussain et al. (2018) señalan que en la industria textil la especie *Brachiaria mutica* tiene una alta eficiencia en la eliminación de metales pesados, demostrando altos valores tales como 97% para Cr, 88% para Ni, 89% para Fe y 72% para Cd. Por otro lado, en la industria láctea Verma & Suthar (2018) muestran que mediante la especie *Typha angustifolia* se obtuvo la eliminación de metales pesados tales como Fe, Cr y Ni obteniendo porcentajes de remoción muy significativos de 47.3%, 65.5% y 64.8% respectivamente. Cabe recalcar que la especie *Opuntia ficusindica* en la misma industria elimina un 70% de Cr logrando resultados un poco mejores que la anterior especie mencionada. Además, Wei et al. (2021) utilizaron la *Eichhornia crassipes* para monitorear la contaminación de metales, demostrando que la especie es apta para la fitorremediación de metales pesados en agua contaminada doméstica, agrícola e industrial. Así mismo, aplicaron *Pistia stratiotes* para la absorción de Zn de, en las dosis más bajas evaluadas (0,7 y 1,8 mg / L), *Pistia Stratiotes*, tuvo la tasa de eliminación más alta.

Así mismo en la tabla N.º 5: se muestran las especies que mejores resultados presentan en la recuperación de aguas residuales industriales.

**Tabla N° 5. Especies con mejores resultados en la remoción de metales pesados en aguas industriales.**

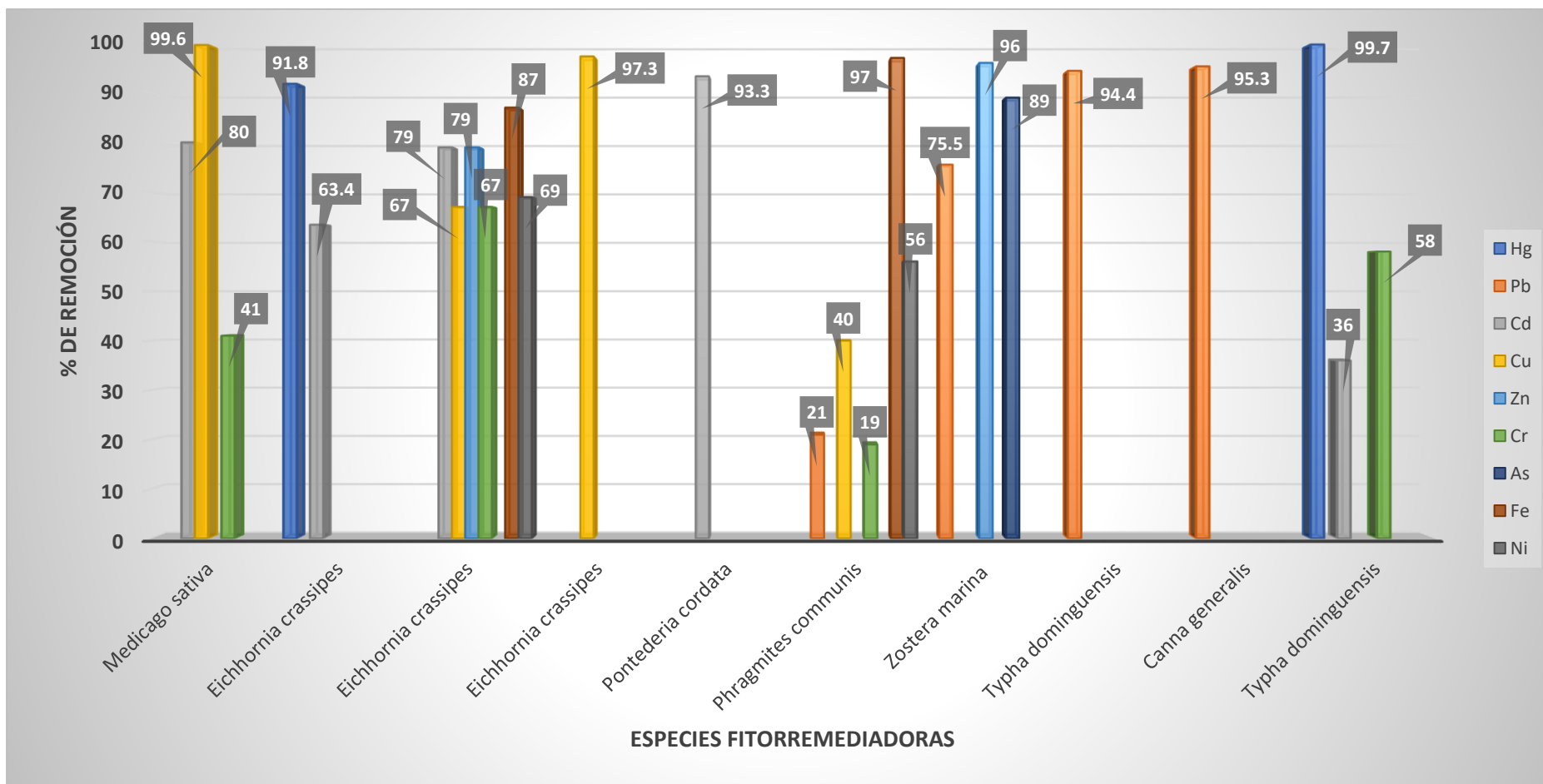
Ítem	Autores	Método	Tipo de agua residual industrial	Especie	técnica	Concentración (mg/L)	Remoción de metales pesados %									
							Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	As	Fe	Ni	
1	Barros S. (2018)	Experimental	Minera	<i>Medicago sativa</i>	Rizofiltración	3.0			80	99.6		41				
2	Barros S. (2018)	Experimental	Minera	<i>Eichhornia crassipes</i>	Rizofiltración	3.0	91.8		63.4							
9	Rai P. (2021)	Experimental	Minera	<i>Eichhornia crassipes</i>	Rizofiltración	5.0			79	67	79	67		87	69	
19	Priya E. (2017)	Experimental	Textil	<i>Eichhornia crassipes</i>	Rizofiltración	5.5				97.3						
20	Xin et al. (2020)	Experimental	Curtido	<i>Pontederia cordata</i>	Rizofiltración	0.4				93.3						
27	Sharma et al. (2021)	Experimental	Pulpa y Papel	<i>Phragmites communis</i>	Rizofiltración	2.0		21		40		19		97	56	
30	Lee et al. (2019)	Experimental	Pesquera	<i>Zostera marina</i>	Rizofiltración	8.6		75.5				96		89		
21	Vera et al. (2016)	Experimental	Petrolera	<i>Typha dominguensis</i>	Fitovolatilización	10.0		94.4								
22	Vera et al. (2016)	Experimental	Petrolera	<i>Canna generalis</i>	Fitovolatilización	15.0		95.3								
26	Perez y Castelblanco. (2019)	Pre experimental	Fábrica de herramientas	<i>Typha dominguensis</i>	Fitoestabilización	1.0	99.7		36			58				

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla N° 5 demuestran que la *Medicago sativa* tuvo mejores resultados en la remoción de cobre en las aguas residuales de la industria minera, *Zostera marina* pudo remover un 96% de Zn de las aguas contaminadas por la industria pesquera, con un 99.6% la *Typha dominguensis*, pudo remover hasta tres metales pesados al momento de ser aplicada, además, la *Eichhornia crassipes*, que fue la que más aplicada, gracias a la afinidad que tuvo con los metales, por lo tanto, estas especies sobresalen dentro de la investigación, como las que mejores resultados. Así mismo, corroborando lo dicho anteriormente Hu et al., (2020), concuerda que la especie *Eichhornia crassipes* pudo eliminar más del 99% de cobre de las aguas residuales industriales en 20 días. Del mismo modo Vargas et al. (2018) afirma que la *Eichhornia crassipes* remueve concentraciones máximas de metales como Fe, Cu, Zn y Cd desde 85 a 95% en aguas residuales industriales. Finalmente, Hu et al., (2020) añade que, con *Phragmites australis* podría eliminar el 99% de Fe, el 85% de cobre y el 89% de zinc de aguas residuales industriales de baja resistencia.

A continuación, en la figura N° 2: se muestra la gráfica detallando todas las especies que mejor resultados de remoción presentan, eliminando contaminantes como metales pesados que generan los diferentes tipos de industrias.

Figura N° 2. Remoción de metales pesados según la especie fitorremediadora.



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos Vera et al. (2016), señalan que para la remoción de Pb utilizando la especie *Canna generalis* logró un 95.3% de remoción. Por lo que Shrestha et al. (2021), señalan que utilizando otro tipo de especie como *Dicerocaryum eriocarpum* logra un valor casi similar, obteniendo un 93.7% de remoción del mismo metal. Además, la misma especie también remueve el Cd con un alto porcentaje remoción, obteniendo un 96.21%, removiendo un poco más que la especie *Pontederia cordata* que obtuvo un 93.3% de remoción según los resultados encontrados. Por otro lado, de acuerdo a lo que señalan Vargas et al. (2018), que la especie *Eichhornia crassipes* logra porcentajes de remoción bastante eficientes, logrando remover metales como As, Fe, Cu, Cr, Cd y Zn con un porcentaje de 80%, 90.1%, 95%, 89%, 85% y 95% de remoción respectivamente. Además, esta especie está considerada como una de las más eficientes ya que tiene la capacidad de remover varios metales pesados. Además, cabe resaltar que la especie *Lemna gibba* tiene resultados de remoción muy altos y eficientes que logran la eliminación casi total de ciertos metales pesados tales como Cu 92%, Zn 94.2%, Ni 84.9%, esto según Osama et al. (2021).

## V. CONCLUSIONES

- La rizofiltración fue la técnica más aplicada en la remoción de metales pesados de las aguas residuales industriales, removiendo diversos metales, entre ellos el Cu, Fe, Zn por los cuales alcanzaron valores máximos de remoción 99.6%, 97% y 96% respectivamente.
- Las especies fitorremediadoras más utilizadas por su gran adaptabilidad y tolerancia a los metales pesados fueron *Medicago sativa*, *Typha dominguensis*, *Eichhornia crassipes*, *Phragmites communis*, *Zostera marina*, siendo la *Eichhornia crassipes* la que tuvo mayor adaptabilidad a los metales pesados como Hg, Pb, Cu, Cd, Cr, Zn, Fe, Ni, teniendo mejores resultados su aplicación en la industria minera.
- Se concluye que las especies que presentaron mejores resultados con respecto a la remoción de metales pesados tenemos a la *Medicago sativa* con una remoción de 99.6% de Cu en la industria minera, la *Typha dominguensis* removió el 99.7 % del mercurio en la Industria de la fabricación de herramientas, *Phragmites communis* que removió el 97% de Fe en la industria papelera y *Zostera marina* pudo remover un 96% de Zn en la industria pesquera.



## **VI. RECOMENDACIONES**

- Continuar con las investigaciones para que las técnicas de fitorremediación en aguas residuales lleguen a ser más conocidas y puedan ser utilizadas, ya que no son costosas y son aplicadas de manera natural.
- Continuar investigando nuevas especies fitorremediadoras que tengan alta eficiencia en remoción, comparar para saber cuál es más efectiva, para así determinar cuál es la más apta al momento de ser aplicada de manera experimental.
- Ampliar la base de búsqueda incluyendo a los artículos de otras bases de datos importantes, así como los de acceso restringido para validar los hallazgos presentados.

## REFERENCIAS

- AL-THANI, R. & YASSEEN, B. Phytoremediation of polluted soils and waters by native Qatari plants: Future perspectives. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 259, p. 113694. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749119327289>.
- ANSARI, Abid *et al.* Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2020, vol. 46, no 4, p. 371-376. disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687428520300303>
- ARAQUE, Iván *et al.* Diagnóstico y propuesta de fitorremediación para el tratamiento de aguas residuales, sector tierra negra. *L'esprit Ingénieur*, 2018, vol. 9, no 1, p. 132-140. Disponible en: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieur/article/view/1849>
- ASTUYAURI, Diego *et al.* PULCHA VILLALOBOS, Christian Ronaldo. Evaluación de la viabilidad aplicativa de la fitorremediación en relaves mineros a partir de plantas de sembrío tradicionales. Caso: Quebrada Corte Ladrones–Perubar, Corcona (Perú). disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/18194>
- AYALA, Rosmery *et al.* Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 2018, vol. 2, no 3, p. 48-53. disponible en: <http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDESDOS/article/view/403>
- BARROS, Sara. Fitorremediación como alternativa a la descontaminación de aguas residuales industriales con cargas de metales pesados, Universidad Militar Nueva Granada. 2018 disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17709>
- BAYÓN, Sara. Aplicación de la fitorremediación a aguas contaminadas por metales pesados. 2015. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/47872/>
- CASTRILLÓN, Vanessa *et al.* Evaluación de la Fitorremediación como alternativa para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con

mercurio producto de la minería aurífera (artesanal y pequeña escala). 2016. disponible en:

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/12281/1053803323.Pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- CAVIEDES, Diego *et al.* Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. *Ingeniería y región*, 2015, no 13, p. 73-90. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432290>
- CHANDANSHIVE, Vishal *et al.* In situ textile wastewater treatment in high rate transpiration system furrows planted with aquatic macrophytes and floating phytobeds. *Chemosphere*, 2020, vol. 252, p. 126513. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520307062>
- CHUA, Jennivee *et al.* Phytoremediation potential and copper uptake kinetics of Philippine bamboo species in copper contaminated substrate, *Heliyon*, Volume 5, Issue 9, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019361006>
- CORREA, Sandra *et al.* Evaluación de la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros en agua residual doméstica, utilizando *Phragmites australis* en Bioreactores. *Información tecnológica*, 2015, vol. 26, no 6, p. 89-98. Disponible en: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642015000600011](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642015000600011)
- COVARRUBIAS, Sergio y PEÑA, Juan. Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2017, vol. 33, p. 7-21. disponible en: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2017.33.esp01.01/46640>
- CURASMA, Marco *et al.* Evaluación de la eficiencia de un sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *nasturtium officinale* (berro) para el tratamiento de agua residual municipal en huancavelica. 2019. disponible en: <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3072>

- DELGADILLO, Angélica *et al.* Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 2017, vol. 14, no 2, p. 597-612. disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- DIAZ, Jorge, et al. Estudio preliminar de la técnica de Fitorremediación en vertimientos relacionados con aguas residuales industriales. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, 2019. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/25310>
- DOMÍNGUEZ, María *et al.* Fitorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de la industria minera. *UGCiencia*, 2016, vol. 22, no 1, p. 227-237. disponible en: <https://revistas.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/view/705/1075>
- DU, Yongming *et al.* Accumulation and translocation of heavy metals in water hyacinth: Maximising the use of green resources to remediate sites impacted by ewaste recycling activities. *Ecological Indicators*, 2020, vol. 115. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X20303216?via%3Dihub>
- HANNIER, Fanny *et al.* Using *Sarcocornia fruticosa* and *Saccharomyces cerevisiae* to remediate metal contaminated sediments of the Ria Formosa lagoon (SE Portugal). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2019, vol. 19, no 4, p. 588-597. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S164235931730157X>
- HU, Hao *et al.* Sustainable livestock wastewater treatment via phytoremediation: Current status and future perspectives. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 315, p. 123809. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852420310816?via%3Dihub>
- HUSSAIN, Zahid *et al.* Treatment of the textile industry effluent in a pilot-scale vertical flow constructed wetland system augmented with bacterial endophytes. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 645, p. 966-973.

disponible

en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718326536>

- LARIOS, Fernando *et al.* Las aguas residuales y sus consecuencias en el Peru. Universidad San Ignacio de Loyola. Lima, 2015, vol. 2 pp. 09-25. disponible en: <https://www.usil.edu.pe/sites/default/files/revista-saber-y-hacer-v2n2.2-1-19set16-aguas-residuales.pdf>
- LEE, Garam *et al.* Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass *Zostera marina* in the polluted bay systems. *Marine pollution bulletin*, 2019, vol. 149. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X19306472?via%3Dihub>
- LISINTUÑA, Welington *et al.* "Tratamiento de aguas residuales de una industria láctea con mucílago de nopal." *Ciencia y tecnología de alimentos* (Havana, Cuba), vol. 30, no. 2, Editorial Universitaria de la República de Cuba, 2020, p 52. Disponible en: <https://www.revcitecal.iiiia.edu.cu/revista/index.php/RCTA/article/view/134/15>
- LÓPEZ, Miguel. Selección de técnicas para el tratamiento de aguas residuales con contenido elevado de metales pesados, enfocado a la sostenibilidad en la industria minera colombiana. 2021. Tesis de Licenciatura. Fundación Universidad de América. disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8407/1/893736-2021-I-GA.pdf>
- MARTÍNEZ, Yaset y VILLALEJO, Víctor. La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 2018, vol. 39, no 1, p. 58-72 p. Disponible en: <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/424/337>
- MENDOZA, Yoma *et al.* 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*, 2016, vol. 39, no 2, p. 071-079. disponible en:

[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702016000200004](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702016000200004)

- MENESES, Yeni *et al.* Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de *Spirulina* sp, sedimentación primaria y precipitación química. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 2019, vol. 10, no 1, p. 141-152. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2326/3036>
- MONROY, Edinson *et al.* “Diseño y validación de un sistema de adsorción de cromo hexavalente en efluentes de curtiembre usando cáscara de naranja y salvado de trigo.” *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 12, no. 3, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2021, pp. 01–31. Disponible en: <http://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/download/2284/2317/1/2852>
- MUSTAFA, Hauwa & HAYDER, Gasim. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, vol. 12, no 1, p. 355-365. nº 21. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920301131>
- NÚÑEZ, Roberto *et al.* Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Revista Ciencia*, 2015, p. 69-83. disponible en: [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55\\_3/Fitorremediacion.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf)
- ORDONEZ, Didier & BENÍTEZ, Neyla. REMOVAL OF TRIVALENT CHROMIUM IN TANNERY WASTEWATER BY BIOTIC-ABIOTIC PROCESS BASED ON *Yarrowia lipolytica* AND *Candida fluvialitis*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 2019, vol. 35, no 4, p. 945-956. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992019000400945&script=sci\\_abstract&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992019000400945&script=sci_abstract&tlng=en)
- ORTEGA, Susana *et al.* Evaluación de la capacidad de remoción de cromo de *Eichhornia crassipes* Y *Azolla* sp. con miras a su aplicación como tratamiento complementario de aguas residuales de la industria

galvanotécnica. 2019. disponible en:  
[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2134&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2134&context=ing_ambiental_sanitaria)

- OSAMA, Rania *et al.* Greenhouse gases emissions from duckweed pond system treating polyester resin wastewater containing 1, 4-dioxane and heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 207, p. 111253. disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651320310915>
- OYUELA, Mayrely *et al.* "Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands — A review". *Chemosphere*, Vol. 168, 2017, pag 1230 - 1247. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565351631459X>
- PABÓN, S. *et al.* Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 2020, vol. 14, no 27, p. 9-18. disponible en:  
<http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n27/1909-8367-ecei-14-27-9.pdf>
- PARRA, Fernando. *Rizofiltración de aguas de riego agrícola contaminadas por metales pesados en comunidades del municipio de Atlixco, Puebla*. 2017. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Disponible en:  
<https://buap.mx/handle/20.500.12371/967>
- PÉREZ, Kenny y CASTELBLANCO, Johana. Especies acuáticas de los humedales de Bogotá, Colombia con capacidad para el tratamiento de aguas residuales con metales pesados. *Suelos Ecuatoriales*, 2019, vol. 49, no 1 y 2, p. 84-95. Disponible en:  
[http://www.unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos\\_ecuatoriales/article/view/108/99](http://www.unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuatoriales/article/view/108/99)
- PINEDA, Jenyfer. Evaluación del potencial de fitorremediación de *Isolepis cernua* y *Nasturtium aquaticum* para el tratamiento secundario de efluentes de curtiembre del parque industrial Rio Seco–Arequipa. 2019. disponible en:  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9664>

- PRIYA, E. & SELVAN, P. Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)—An efficient and economic adsorbent for textile effluent treatment—A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017, vol. 10, p. S3548-S3558. disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535214000562>
- RAI, Prabhat. “Heavy metals and arsenic phytoremediation potential of invasive alien wetland plants *Phragmites karka* and *Arundo donax*: Water-EnergyFood (WEF) Nexus linked sustainability implications”. *Bioresource Technology Reports*, 2021. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X21001195>
- REZANIA, Shahabaldin *et al.* Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *Journal of environmental management*, 2015, vol. 163, p. 125-133. disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971530222X>
- REZANIA, Shahabaldin *et al.* Comprehensive review on phytotechnology: heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of hazardous materials*, 2016, vol. 318, p. 587-599. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389416306860>
- SHARMA, Pooja *et al.* Phytoremediation potential of heavy metal accumulator plants for waste management in the pulp and paper industry. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no 7, p. e04559. disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020314031>
- SHARMA, Pooja *et al.* “Uptake and mobilization of heavy metals through phytoremediation process from native plants species growing on complex pollutants: Antioxidant enzymes and photosynthetic pigments response”. *Environmental Technology & Innovation*, Volume 23, 2021. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186421002777>
- SHRESTHA, Rakesh *et al.* Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, no 4, p. 105688. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343721006655>



- TEJADA, Candelaria *et al.* Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnologías*, 2015, vol. 18, no 34, p. 109-123. disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-77992015000100010](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000100010)
- VARGAS, Claudia *et al.* Estado del arte; del uso de la eichhornia crassipes en la fitorremediación de aguas residuales industriales. *Ingenio Magno*, 2018, vol. 9, no 2, p. 105-130. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7021685>
- VELÁSQUEZ, Johana. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 2017, vol. 8, no 1, p. 151-167. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1846/2227>
- VERA, Alexandra *et al.* Fitorremediación de aguas residuales con alto contenido de plomo utilizando Typha dominguensis y Canna generalis. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 2016, vol. 39, no 2, p. 088-095. Disponible en: [http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S025407702016000200006&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S025407702016000200006&script=sci_arttext&tlng=pt).
- VERMA, Rashmi & SUTHAR, Surindra. Performance assessment of horizontal and vertical surface flow constructed wetland system in wastewater treatment using multivariate principal component analysis. *Ecological engineering*, 2018, vol. 116, p. 121-126. disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857418300600>
- VITOLA, Deimer *et al.* “UTILIZACIÓN DE MICROALGAS COMO ALTERNATIVA PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS.” *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 13, no. 1, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2022, p. 195. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.4568>
- WANG, Wei *et al.* “Removal effects of different emergent-aquatic-plant groups on Cu, Zn, and Cd compound pollution from simulated swine

wastewater". *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 296.

Disponibile en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147972101313X?via%3Dihub>

- WEI, Zihan *et al.* Perspectives on phytoremediation of zinc pollution in air, water and soil. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2021, vol. 24, p. 100550. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352554121001777>
- XIN, Jianpan *et al.* "Pontederia cordata, an ornamental aquatic macrophyte with great potential in phytoremediation of heavy-metal-contaminated wetlands". *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, vol. 203. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651320308630?via%3Dihub>
- ZESHAN, Ali *et al.* Duckweed: An efficient hyperaccumulator of heavy metals in water bodies. *En Plant Metal Interaction*. Elsevier, 2016. p. 411-429. disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128031582000163>

## ANEXOS

Anexo N° 1: Matriz de categorización.

	<b>Problema de la Investigación</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Categorías</b>	<b>Sub Categorías</b>		
Evaluación de las técnicas de fitorremediación de metales pesados en aguas residuales industriales	¿Cuáles son las técnicas de fitorremediación que han demostrado mayor eficiencia en la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales?	Evaluar las técnicas de fitorremediación que han demostrado mayor eficiencia en la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales	Determinar la técnica fitorremediadora de mayor aplicación en la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales.	Técnicas de fitorremediación	Medio de Contención: Fitoestabilización		
					Rizofiltración		
					Medio de eliminación: Fitovolatilización		
			Identificar las principales especies fitorremediadoras en aguas residuales industriales.	Metales Pesados	As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn		
					Determinar las especies de plantas fitorremediadoras con mejores resultados en la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales.	Especies de Plantas	Emergentes
							Flotantes
Sumergidas							

Fuente: Elaboración propia

Anexo N° 2: Ficha de recolección de datos

N°	Base de Datos	Título de Investigación	Palabras Clave	Año de Publicación	Referencia Bibliográfica	Enlace
1						
2						
3						
4						
5						

Fuente: Elaboración propia