

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

“ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE FITORREMEDIACIÓN DE LAS ESPECIES MACRÓFITAS: *EICHHORNIA CRASSIPES*, *LEMNA MINOR*, *TYPHA LATIFOLIA*, *PHRAGMITES AUSTRALIS* Y *SCIRPUS CALIFORNICUS* EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES CON METALES PESADOS, 2022”

Tesis para optar el título profesional de:

**Ingeniero Ambiental**

**Autores:**

Daniel David Gutierrez Miranda  
Arturo Alberto Zapata Morante

**Asesor:**

Msce. Ing. Carlos Alberto Alva Huapaya

<https://orcid.org/0000-0002-0983-3151>

Trujillo - Perú

2023

**JURADO EVALUADOR**

Jurado 1 Presidente(a)	Ing. Renato Miñano Mera	18130961
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Ing. Wilberto Effio Quezada	42298402
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Ing. Ronald Alvarado Obeso	44562630
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

## INFORME DE SIMILITUD

### TESIS\_GUTIERREZ\_ZAPATA

#### INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	10%	1%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

#### FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	4%
2	<a href="http://ciencia.lasalle.edu.co">ciencia.lasalle.edu.co</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="http://repositorio.unfv.edu.pe">repositorio.unfv.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
4	<a href="http://repositorio.undac.edu.pe">repositorio.undac.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="http://repositorio.upn.edu.pe">repositorio.upn.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="http://apirepositorio.unh.edu.pe">apirepositorio.unh.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%

## **DEDICATORIA**

A mis padres quienes me dieron la vida, apoyo emocional y educación. Ellos sin duda alguna son el mejor ejemplo respecto a esfuerzo y dedicación, gracias a eso, y sus consejos he podido salir adelante, por ello, es posible la realización de esta tesis.

**Daniel David Gutierrez Miranda**

A mis padres y abuelos, sin el apoyo y amor incondicional para con mi formación y desarrollo, no hubiera sido posible la realización de este trabajo de investigación.

**Arturo Alberto Zapata Morante**

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a mis educadores, personas sabias, que se han esforzado en el trayecto de mi carrera universitaria para que yo pueda llegar al lugar en el que me encuentro.

Muchas gracias a mis padres por estar junto a mí en todo momento, por apoyarme, alentarme, aconsejarme, y sobre todo por confiar en mí. Ellos son mi fuente de inspiración para que yo continúe empleando todos mis esfuerzos en mi carrera profesional.

Por otro lado, quiero agradecer a mis amigos, personas importantes en mi vida y en mi desempeño académico, gracias a ellos no me he dejado vencer por nada ni por nadie, son mis pilares de apoyo emocional, no habría podido realizar todo esto sin su ayuda.

Gracias.

**Daniel David Gutierrez Miranda**

A la Universidad Privada del Norte, a todos aquellos profesores que aportaron con su valioso conocimiento a mi formación y a mis amigos, con quienes compartí clases y experiencias inolvidables, haciendo de mi estadía en la universidad unos maravillosos cinco años.

**Arturo Alberto Zapata Morante**

## TABLA DE CONTENIDO

JURADO EVALUADOR.....	2
INFORME DE SIMILITUD.....	3
DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTO .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
ÍNDICE DE FIGURAS .....	10
RESUMEN .....	12
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Realidad problemática .....	13
1.2. Antecedentes.....	16
1.2.1. Antecedentes internacionales.....	16
1.2.2. Antecedentes nacionales .....	19
1.3. Bases teóricas.....	22
1.3.1. Fitorremediación.....	22
1.3.1.1. Ventajas y desventajas de la fitorremediación .....	24
1.3.2. Macrófitas .....	26
1.3.3. <i>Eichhornia crassipes</i> .....	26
1.3.4. <i>Lemna minor</i> .....	27
1.3.5. <i>Typha latifolia</i> .....	29
1.3.6. <i>Phragmites australis</i> .....	30
1.3.7. <i>Schoenoplectus californicus</i> .....	31

1.3.8.	Humedales artificiales.....	33
1.3.9.	Metales pesados .....	34
1.3.10.	Riesgo en la salud por metales pesados .....	35
1.3.11.	Contaminación ambiental .....	35
1.4.	Formulación del problema .....	36
1.5.	Objetivos.....	36
1.5.1.	Objetivo general.....	36
1.5.2.	Objetivos específicos .....	36
1.6.	Justificación .....	37
<b>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....</b>		<b>38</b>
2.2.	Población .....	38
2.3	Muestra .....	39
2.4.	Técnica .....	39
2.5.	Materiales .....	40
2.6.	Procedimiento de obtención de datos.....	40
2.7.	Procedimiento de análisis de datos.....	42
2.8.	Aspectos éticos .....	43
<b>CAPÍTULO III: RESULTADOS.....</b>		<b>44</b>
<b>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>		<b>78</b>
4.1.	Discusión.....	78
4.2.	Conclusiones .....	96
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>101</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>109</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i>	24
<i>Ventajas y desventajas de la fitorremediación</i>	24
<i>Tabla 2</i>	24
<i>Mecanismos de la fitorremediación</i>	24
<i>Tabla 3</i>	43
<i>Clasificación de macrófitas</i>	43
<i>Tabla 4</i>	44
<i>Clasificación en base a la remoción de metales pesados</i>	44
<i>Tabla 5</i>	45
<i>Resultados obtenidos con la utilización de <i>Eichhornia crassipes</i></i>	45
<i>Tabla 6</i>	48
<i>Resultados obtenidos con la utilización de <i>Lemna minor</i></i>	48
<i>Tabla 7</i>	50
<i>Resultados obtenidos con la utilización de <i>Typha latifolia</i></i>	50
<i>Tabla 8</i>	53
<i>Resultados obtenidos con la utilización de <i>Phragmites australis</i></i>	53
<i>Tabla 9</i>	57
<i>Resultados obtenidos con la utilización de <i>Scirpus californicus</i></i>	57
<i>Tabla 10</i>	73
<i>Resultados del análisis de capacidad de fitorremediación específica</i>	73
<i>Tabla 11</i>	74
<i>Resultados del análisis de capacidad de remoción – absorción máxima</i>	74
<i>Tabla 12</i>	108
<i>Investigaciones recopiladas para <i>Eichhornia crassipes</i></i>	108
<i>Tabla 13</i>	109
<i>Investigaciones recopiladas para <i>Lemna minor</i></i>	109

<i>Tabla 14</i>	<i>110</i>
<i>Investigaciones recopiladas para Typha latifolia</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 15</i>	<i>111</i>
<i>Investigaciones recopiladas para Phragmites australis</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 16</i>	<i>112</i>
<i>Investigaciones recopiladas para Scirpus californicus</i>	<i>112</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	40
<i>Procedimiento de selección y almacenamiento de investigaciones</i>	40
<i>Figura 2</i>	41
<i>Procedimiento de análisis de datos</i>	41
<i>Figura 3</i>	47
<i>Porcentajes de remoción metálica reportados para Eichhornia crassipes</i>	47
<i>Figura 4</i>	49
<i>Porcentajes de remoción metálica reportados para Lemna minor</i>	49
<i>Figura 5</i>	52
<i>Porcentajes de remoción metálica reportados para Typha latifolia</i>	52
<i>Figura 6</i>	56
<i>Porcentajes de remoción metálica reportados para Phragmites australis</i>	56
<i>Figura 7</i>	61
<i>Porcentajes de remoción metálica reportados para Scirpus californicus</i>	61
<i>Figura 8</i>	63
<i>Comparativa de absorción – remoción para el metal hierro</i>	63
<i>Figura 9</i>	64
<i>Comparativa de absorción – remoción para el metal cobre</i>	64
<i>Figura 10</i>	65
<i>Comparativa de absorción – remoción para el metal plomo</i>	65
<i>Figura 11</i>	66
<i>Comparativa de absorción – remoción para el metal mercurio</i>	66
<i>Figura 12</i>	67
<i>Comparativa de absorción – remoción para el metal aluminio</i>	67

<i>Figura 13</i>	68
<i>Comparativa de absorción – remoción para el metal zinc</i>	68
<i>Figura 14</i>	69
<i>Comparativa de absorción – remoción para el arsénico</i>	69
<i>Figura 15</i>	70
<i>Comparativa de absorción – remoción para el cromo</i>	70
<i>Figura 16</i>	71
<i>Comparativa de absorción – remoción para el níquel</i>	71
<i>Figura 17</i>	72
<i>Comparativa de absorción – remoción para el cadmio</i>	72

## RESUMEN

La contaminación ambiental de los cuerpos de agua y la pérdida de su calidad, es una situación alarmante que afecta principalmente la salud y pone en riesgo la subsistencia de la población. Frente a esto, la ingeniería ha desarrollado estrategias de recuperación de ambientes contaminados, una de las técnicas más conocidas es la fitorremediación, mediante la cual, se recrean procesos naturales de depuración de contaminantes, utilizando especies vegetativas. Este trabajo descriptivo tuvo como objetivo analizar la capacidad de fitorremediación de cinco especies vegetativas denominadas macrófitas, para determinar su potencial de fitorremediación en cuanto a la captura y procesamiento de metales pesados presentes en aguas residuales. La metodología consistió en la revisión documental de 20 investigaciones, recolectadas de los repositorios virtuales Biblioteca UPN, Google Académico, Research Gate, Redalyc, Scielo y en el repositorio nacional Alicia Concytec; para la obtención de la información, que luego fue analizada para identificar tendencias de afinidad metálica específica y capacidad natural de fitodepuración. Los resultados permitieron concluir que, las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus*, también denominada *Schoenoplectus californicus*, poseen potencial de fitorremediación para los metales hierro, plomo, cobre, zinc, mercurio, cromo, cadmio, arsénico, aluminio y níquel.

**PALABRAS CLAVES:** Palabras clave: fitorremediación, metales pesados, *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Scirpus californicus*, humedales artificiales.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

El agua, es uno de los medios más importante para la existencia de la vida en nuestro planeta, requerimos de ella para subsistir y evolucionar como especie; sin embargo, es el ecosistema con el que menos responsabilidad ambiental se tiene; esto, deriva de la inexistente y/o deficiente gestión en cuanto al tratamiento de las aguas contaminadas que dejan las actividades económicas. A nivel mundial, la actividad que más problemas ha tenido en su adaptación al entorno medioambiental, ha sido la minería; debido a la presencia de metales pesados y la alta toxicidad de sus componentes; lo cual, evidencia su peligrosidad y su potencial como generador de impactos adversos en la salud de las personas (Menéndez y Muñoz, 2021)

Según Rachel (2008), en el mundo, más de 500 millones de toneladas de metales pesados se vierten a los cuerpos naturales de agua cada año, en base a lo que reporta la UNESCO; estos impactos en su mayoría, son ocasionados por una mala gestión de los efluentes minero – metalúrgicos; dejando así, millones de personas obligadas a depender del abastecimiento de estas aguas contaminadas; lo que deviene en un panorama desalentador en lo concerniente a la calidad de las fuentes naturales de agua y por ende, para el medio ambiente.

Una de las técnicas, que ha demostrado ser capaz de sanear aguas contaminadas con metales pesados alrededor del mundo, es la fitorremediación, debido a los satisfactorios resultados otorgados por la comunidad científica, en los que se demuestra su capacidad de remoción;

asimismo, (Jaramillo y Flores, 2012) aseguran que, las macrófitas acuáticas ofrecen una buena capacidad de fitorremediación de las aguas que contienen metales pesados, además de ser una herramienta económica y efectiva.

El impacto de la minería es uno de los problemas que afecta al ambiente y el Perú, no se encuentra libre de dicho problema; ya que, es un país con grandes yacimientos mineros; asimismo, se sabe que, la minería trae grandes beneficios económicos, pero a la vez, graves problemas socioambientales; los cuales, afectan a su área de influencia directa e indirecta; generando así, daños irreparables en el ambiente, sociedad y economía (Cayetano, 2013).

En 2021, en el departamento Huancavelica, región San Pedro de Coris; la empresa Doe Run generó el desembalse accidental de aproximadamente 67 487.80 m<sup>3</sup> de relave minero, en un área aproximada de 41 574 m<sup>2</sup>; afectando la subestación eléctrica Cobriza II y el taller de mantenimiento de la unidad minera, hasta llegar al Río Mantaro (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2019). Esta situación, definitivamente afectó a la población de San Pedro de Coris, generando daños a partir de la exposición a los metales pesados presente en el lixiviado vertido; contaminando las aguas, que después, son llevadas a la utilización en sus cultivos y alimentos.

Por otro lado, en el departamento de La Libertad, se viene suscitando una alarmante problemática de contaminación hídrica en uno de sus afluentes más representativos, el río Moche; este, viene siendo afectado a consecuencia de la existencia de pasivos ambientales de proyectos mineros, que afectan los medios de vida y la salud de las poblaciones ribereñas; que comprenden

las provincias de Santiago de Chuco, Julcán, Otuzco y Trujillo. Habiendo 354 093 personas expuestas y más de 100 hectáreas de cultivo impactadas.

El origen principal del problema de contaminación hídrica de las aguas superficiales del río Moche, es la actividad minera en el distrito Quiruvilca, en la provincia Santiago de Chuco; asentada en la cabecera de cuenca del río Moche. A finales del año 2017, la empresa Compañía Minera Quiruvilca S.A., cesó sus actividades mineras; ocasionando un problema social, de esta forma, los antiguos trabajadores optaron por realizar actividades mineras ilegales alrededor del pueblo y en las instalaciones abandonadas por la empresa; generando, gran cantidad de relave minero o sedimento derivado de pozas de cianuración implementadas de forma artesanal; dicho relave, es dispuesto irresponsablemente sin ningún criterio técnico y cuidado del ambiente y en épocas de lluvia, es arrastrado hacia las quebradas cercanas y hacia el río Shorey; afluente principal del río Moche; ocasionándole así, un agravante cuadro de contaminación ambiental (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2021).

La Autoridad Nacional del Agua, se pronunció ante dichos acontecimientos, con el fin de identificar los daños y sancionar a las empresas responsables de la afectación a los cuerpos de agua. Es innegable que la contaminación a cuerpos de agua por metales pesados en el Perú, deriva malas prácticas realizadas en la minería; es por ello, que se busca una alternativa de tratamiento que permita consolidar el cumplimiento de los valores establecidos (parámetros fisicoquímicos, orgánicos, inorgánicos y microbiológicos) comprendidos en las normas de nuestro país. En ese sentido, decidimos realizar una investigación en la que se comparan diferentes plantas que sean capaces de remover los metales pesados presentes en las aguas y así, demostrar cuál de todas las

seleccionadas es la más útil, para dar solución a problemas tan concurrentes en nuestro país, como lo es la contaminación hídrica.

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Antecedentes internacionales

Hernández y Luna (2016), realizaron una investigación titulada “Prueba piloto para la evaluación de la eficiencia de las plantas fitorremediadoras del humedal Las Tinguas, en el tratamiento de aguas residuales domésticas” en Colombia; teniendo como objetivo, evaluar la eficiencia de las plantas fitorremediadoras nativas del humedal Las Tinguas, en el tratamiento de aguas residuales domésticas, a través de la utilización de humedales artificiales; haciendo uso de una metodología experimental, basada en la implementación de tres especies propias del humedal natural: *Typha latifolia*, *Schoenoplectus californicus* y *Limnobium laevigatum*, en un humedal artificial a escala piloto alimentado con agua sintética, que recreó las condiciones fisicoquímicas del efluente vertido al humedal natural; obtuvieron que, el montaje que contuvo a las tres plantas presentó la mayor capacidad de remediación (75,17%) de hierro total, por poseer a las especies *Limnobium laevigatum* y *Typha latifolia*; concluyendo que, el sistema integrado por las especies: *Typha latifolia*, *Schoenoplectus californicus* y *Limnobium laevigatum*, evidenció una contribución significativa al tratamiento del agua residual descargada en el humedal; a pesar que, teóricamente *Schoenoplectus californicus* fue establecida como la especie con menor capacidad de fitorremediación, se evidenció una significativa capacidad de remoción de hierro (Fe) total.

Sekarjannah et. al (2019), realizaron una investigación titulada “Manejo del drenaje ácido de las minas en un humedal construido utilizando planta de Jacinto y adición de materiales orgánicos” en Indonesia. Este trabajo, tuvo como objetivo encontrar la mejor combinación de materia orgánica y tiempo de incubación en remediación del drenaje ácido de minas utilizando humedales artificiales con plantas de Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*); haciendo uso de una metodología experimental obtuvieron que, la adición de materia orgánica tuvo un efecto significativo en el aumento en el pH y una disminución en la concentración de manganeso (Mn) y hierro (Fe) en el agua residual; obteniéndose valores de remoción del 96,71% y 96,52% respectivamente y concluyendo que, la adición de materia orgánica aporta significativamente en el tratamiento de drenaje ácido de minas a través de humedales artificiales, favoreciendo el proceso de remediación del agua residual.

Amabilis et. al (2016), realizaron una investigación titulada “Remoción de mercurio por *Phragmites australis* empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados” en México; teniendo como objetivo, la evaluación de la acumulación y distribución del metal pesado mercurio (Hg) en la especie vegetal *Phragmites australis*; a través de una metodología experimental, obtuvieron como resultado la remoción de 73% de mercurio (Hg) total; concluyendo que, la especie vegetal *Phragmites australis* puede ser utilizada como barrera biológica para mercurio (Hg) en humedales artificiales sin que la presencia de bacterias metalotolerantes influya sobre la remoción y acumulación del metal.

Singh y Chakraborty (2020), realizaron una investigación titulada “Desempeño de humedales construidos modificados con sustrato orgánico que tratan el drenaje ácido de minas

(DAM) del noreste de India” en India; con el objetivo de, demostrar la efectividad de un sistema de tratamiento basado en humedales artificiales para la remediación de drenaje ácido de mina sintético; el cual, contenía los siguientes metales pesados: hierro (Fe), aluminio (Al), cobalto (Co), níquel (Ni) y cromo (Cr). De metodología experimental, el sistema de humedal artificial fue construido utilizando un sustrato rico en materia orgánica (estiércol de vaca y astillas de bambú); asimismo, se utilizó la especie vegetal *Typha latifolia* (Espadaña común). Los resultados para la remoción de metales pesados fueron: Cr (99,7) Ni (97,8%), Co (93,7%), Fe (91,6%) y Al (59,7%), donde la remoción del metal cromo, fue la más eficiente. Concluyéndose que, los humedales artificiales implementados con la especie *Typha latifolia*, en conjunto con un sustrato rico en materia orgánica, resulta una alternativa viable al tratamiento de efluentes con trazas de metales pesados.

Galván (2016), realizó una investigación titulada “Evaluación de sistemas de humedales construidos para la disminución de la concentración de metales pesados generados por los drenajes ácidos de minería” en Colombia; con el objetivo de, establecer la configuración óptima de diseño de humedal artificial construido para la disminución de zinc (Zn) y plomo (Pb), que permita tratar drenajes ácidos de mina; de metodología experimental, se utilizó la especie vegetal *Phragmites australis* (Carrizo), implementada en tres diseños diferentes de humedal artificial: flujo subsuperficial vertical, flujo subsuperficial horizontal y flujo superficial. Los resultados de remoción para el metal plomo (Pb) fueron de 98% de remoción para el diseño de flujo subsuperficial vertical, 82% para el diseño de flujo subsuperficial horizontal y 94,33% para el diseño de flujo superficial. Para el metal zinc (Zn), se obtuvo: 97% de remoción para el diseño de

flujo subsuperficial vertical; 77,5% para el diseño de flujo subsuperficial horizontal y 82% para el diseño de flujo superficial. Concluyéndose que, la configuración más óptima de diseño es el de flujo subsuperficial vertical y evidenciándose la gran capacidad de fitorremediación de la especie vegetal *Phragmites australis*.

### 1.2.2. Antecedentes nacionales

Orillo y Quiroz (2020) realizaron una investigación titulada “Evaluación de la capacidad de remoción de hierro y aluminio en efluente de mina de carbón, utilizando humedales artificiales de *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) y *Myriophyllum aquaticum* (Cola de zorro acuática)” en Perú; tuvieron como objetivo, evaluar la capacidad de remoción de los metales hierro (Fe) y aluminio (Al) en un efluente de mina de carbón, utilizando humedales artificiales. A través de una metodología experimental, se construyeron seis humedales; tres humedales por tipo de especie vegetal. El resultado para la remoción de hierro (Fe) en total con la especie *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) fue de 81% y con la especie *Myriophyllum aquaticum* (Cola de zorro acuática), 80%. Para el metal aluminio (Al), los resultados de remoción fueron: 49% con la especie *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) y 91% con *Myriophyllum aquaticum* (Cola de zorro acuática). Concluyéndose que, se logró remover exitosamente los metales hierro (Fe) y aluminio (Al) del efluente residual a través de la utilización de humedales artificiales con ambas especies.

López (2018) realizó una investigación titulada “Administración estratégica para el tratamiento de aguas ácidas de mina mediante humedales artificiales en Nyrstar Coricancha S.A.” en Perú; tuvo como objetivo, conocer el efecto que causaba la aplicación de la administración estratégica en el tratamiento de aguas ácidas de mina mediante humedales artificiales. A través de

una metodología experimental y métodos hipotéticos deductivos, se utilizó a la especie vegetal *Typha latifolia* instaurada en un humedal artificial; obteniéndose valores de reducción de acidez calculada en un 99,05%; remoción de sulfatos en un 88,61%, eliminación del metal cobre (Cu) en un 99,78%; plomo (Pb) 94,96%; zinc (Zn) 99,86%; hierro (Fe) 99,95% y para el metaloide arsénico (As) 99,95%. Concluyendo que, a partir de la utilización de un tratamiento pasivo como los humedales artificiales implementados con la especie *Typha latifolia*, se obtienen afluentes de buena calidad.

Llana (2019), realizó una investigación titulada “Análisis comparativo de la absorción del plomo total presente en la especie *Schoenoplectus Californicus* del contorno del lago Chinchaycocha” en Perú; tuvo como objetivo, evaluar la absorción del metal pesado plomo (Pb) de un efluente contaminado por actividad minera. A través de una metodología experimental (científica), donde se utilizaron humedales artificiales instaurados con la especie vegetal *Schoenoplectus Californicus* (Totora); se obtuvo que, la especie *Schoenoplectus Californicus* logró absorber 98, 102, 77, 125, 76, 71 y 304 mg/kg, de plomo (Pb); valores por encima de límite de cuantificación de AAFCO; el cual, es 40 mg/kg. Concluyendo que, el humedal artificial y en específico la especie vegetal *Schoenoplectus Californicus*, cumplió con el proceso de absorción del metal pesado plomo (Pb), presente a causa de los efluentes mineros que vertidos sin control alguno, afectan al ecosistema acuático del lago Chinchaycocha; el cual, da origen al río Mantaro, uno de ríos más importantes del Perú.

(Ávila et al, 2018) realizaron una investigación titulada “Tratamiento de aguas residuales mineras contaminadas con cobre mediante Lemna minor (lenteja de agua)” en Perú; teniendo como

objetivo, evaluar la fitorremediación del ión cobre mediante la especie hidrófila lenteja de agua (*Lemna minor*), en el tratamiento de aguas residuales mineras. A través de una metodología experimental para la cual implantaron la especie macrófita *Lemna minor* en un humedal artificial a escala piloto alimentado con una solución artificial que contenía cobre a una concentración de 4,780 ppm y en adición de una mezcla de nutrientes estimulantes; obtuvieron que, la menor concentración de cobre en el agua residual fue de 1,502 ppm Cu, reportada en la muestra número cinco, es decir, al día 28 (cuatro semanas de contacto). Las muestras siguientes obtuvieron el mismo valor por lo que se asumió la estanqueidad en la absorción del metal. El porcentaje de remoción calculado al día 28 fue de 68,57%; concluyéndose que, *Lemna minor*, es una planta con una capacidad considerable de capturar el ión cobre.

Sucari (2022), realizó una investigación titulada “Evaluación de la eficiencia de remoción de metales pesados de efluentes mineros a través de humedales artificiales empleando *Scirpus californicus* (Totora) y *Festuca dolichophylla* (Ichu), en el distrito de Morococha, Yauli, Junín” en Perú; tuvo como objetivo, evaluar la capacidad de depuración de aguas residuales de mina con presencia de metales pesados a través de un sistema de tratamiento pasivo basado en humedales artificiales con las especies vegetales *Scirpus californicus* (Totora) y *Festuca dolichophylla* (Ichu). Como parte de la metodología experimental, se instalaron dos humedales artificiales cada uno con diferente especie de planta; asimismo, se extrajeron muestras de la poza de bombeo de la Empresa Minera Austria Duvaz S.A., estas muestras fueron analizadas en base a parámetros fisicoquímicos como la temperatura y el pH; además, de los parámetros inorgánicos (metales). En ese sentido, los valores de estos parámetros estaban por encima de los Límites Máximos Permisibles (LMP); para

el pH (4,6), arsénico total (1,5 mg/L), cadmio total (0,27 mg/L), cobre total (3,49 mg/L), hierro disuelto (3,79 mg/L), plomo total (2,56 mg/L), zinc total (6,21 mg/L). Luego, al ser tratados por el humedal artificial que contenía la Totorá; se obtuvieron los siguientes resultados; pH (6,41), arsénico total (0,008 mg/L), cadmio total (0,0035 mg/L), cobre total (0,1165 mg/L), hierro disuelto (0,075 mg/L), plomo total (0,08 mg/L) y zinc total (1,1805 mg/L). Por otro lado, para la planta Ichu los valores fueron los siguientes; pH (6,15), arsénico (0,008 mg/L), cadmio total (0,008 mg/L), cobre total (0,1845 mg/L), hierro disuelto (1,85 mg/L), plomo total (0,15 mg/L) y zinc total (2,2665 mg/L). En base a estos resultados, se puede concluir que, la capacidad de remoción de ambas especies es lo suficientemente eficiente y por tanto, altamente viable de implementarse como tratamiento de efluentes mineros cargados con trazas de metales pesados; permitiendo obtener valores de concentración por debajo de los Valores Máximos Permitidos (LMP) establecidos.

### **1.3. Bases teóricas**

#### **1.3.1. Fitorremediación**

La fitorremediación es una técnica a través de la cual se utilizan las plantas y los microorganismos con el fin de descontaminar los compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos y así poder recuperar el medio en el que se emplee; en ese sentido, las plantas pueden considerarse como sistemas naturales de extracción y tratamiento de contaminantes.

Este término, abarca diferentes métodos para descontaminar el entorno mediante el uso de las plantas, los cuales son:

- Fitoextracción: es el método que consiste en la absorción de metales contaminantes a través de la acumulación en tallos y hojas y en raíces. El primer paso es la elección de la especie vegetal más adecuada para los metales presentes y las características del emplazamiento. Luego de haberse completado el desarrollo vegetativo, se procede a cortarlas y continuar con la incineración y por último, se trasladan las cenizas a un vertedero de seguridad (Delgadillo et al, 2011).
- Fitoestabilización: este método es la aplicación de ciertas especies que inmovilizan los contaminantes mediante la acumulación en las raíces; se necesita de plantas que desarrollan un denso sistema radicular para utilizar mecanismos de secuestro, lignificación o humidificación; reduciendo así la movilidad del contaminante, además, evita la migración al agua o al aire (Bernal, 2014).
- Fitodegradación: también conocida como fitotransformación, es la descomposición de los contaminantes absorbidos por las plantas mediante procesos metabólicos que pueden ocurrir de manera externa o interna en donde el principal activador de este proceso son las enzimas producidas por las plantas. Los contaminantes que se degradan son incorporados a los tejidos de las plantas convirtiéndose en nutrientes para esta (United States Environmental Protection Agency, 1999).
- Fitovolatilización: el proceso de volatilización se ocasiona por acción de las plantas a través de sus estomas para las sustancias químicas volátiles, después, estos compuestos son degradados por radicales hidroxilos en la atmósfera o permanecen como un contaminante del aire (Morikawa y Cem, 2003). Asimismo, (Alonso, 2015), define a la fitovolatilización

como la captación y modificación de los metales pesados o compuestos orgánicos, después, liberados a la atmósfera con la transpiración.

- **Rizofiltración:** es el mecanismo donde la planta acumula la mayor concentración de metales pesados en la raíz, la cual, es la parte más expuesta frente a los iones metálicos. Asimismo, para que el mecanismo se concrete, la planta debe tener la característica de una alta tasa de crecimiento y área superficial necesaria para absorber, concentrar y precipitar metales pesados en aguas residuales contaminadas (Parra, 2017). La rizofiltración podría ayudar de manera significativa a la contaminación, pero a su vez, generar otro problema de contaminantes ya que solo se transferirá los metales de fase acuosa a una fase sólida.
- **Rizodegradación:** es aquel mecanismo que descompone los contaminantes absorbidos por las plantas mediante procesos metabólicos; también abarca a los procesos ocasionados fuera de la planta, como, la degradación causada por los microorganismos asociados a la raíz. Además, cabe resaltar que la absorción depende directamente de la hidrofobicidad, solubilidad y polaridad (Environmental Protection Agency, 2000).

### **1.3.1.1. Ventajas y desventajas de la fitorremediación**

Esta técnica contiene una serie de ventajas sobre otras técnicas de descontaminación, sin embargo, es importante considerar las limitaciones inherentes a esta técnica (Segretin et al, 2010).

Ambas realidades se resumen en:

**Tabla 1**

*Ventajas y desventajas de la fitorremediación*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Costos energéticos muy inferiores debido al uso de la energía solar.</li> <li>❖ Empleo de tratamientos <i>in situ</i> con reducciones en costos y riesgos.</li> <li>❖ Adaptabilidad para la descontaminación en plazos prolongados.</li> <li>❖ Mayor velocidad de degradación para determinados compuestos.</li> <li>❖ Menor producción de residuos secundarios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ La fitotoxicidad en algunos extremos limita el crecimiento de las plantas a áreas con elevados niveles de contaminación.</li> <li>❖ Las raíces que crecen de 3 - 4 m meses restringen la remoción de metales pesados a cuerpos de agua no muy profundos.</li> <li>❖ El marco regulatorio para procesos de fitorremediación aún no está establecido.</li> </ul>

Fuente: Adaptado de Ghosh & Singh (2005).

**Tabla 2**

*Mecanismos de la fitorremediación*

Proceso	Mecanismo	Contaminantes
Fitoestabilización	Complejación	Orgánicos e inorgánicos
Fitoextracción	Hiperacumulación	Inorgánicos
Fitovolatilización	Volatilización a través de hojas	Orgánicos e inorgánicos
Fitoimmobilización	Acumulación en la rizosfera	Orgánicos e inorgánicos

	Uso de plantas y	Orgánicos
Fitodegradación	microorganismos asociados para degradar los contaminantes	
Rizofiltración	Uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua	Orgánicos e inorgánicos

Fuente: Adaptado de Ghosh & Singh (2005).

### 1.3.2. Macrófitas

Las macrófitas acuáticas son plantas que se adaptan a los medios húmedos o acuáticos, estos se designan en un grupo funcional de vegetales muy heterogéneo desde el punto evolutivo, además, es considerado importante en las cadenas tróficas de los ecosistemas acuáticos. Este grupo abarca grupos tan distintos como plantas vasculares acuáticas, briófitos, carófitos y algas filamentosas (Cirujano et al, 2010).

### 1.3.3. *Eichhornia crassipes*

También conocida como “jacinto de agua”, “buchón de agua” o “lirio acuático”; es una planta vascular flotante de agua fresca; sus tallos y hojas están conformados por sacos llenos de aire que le permiten estar la mayor parte del tiempo en la superficie del agua. Es una planta acuática perenne, de grandes hojas redondas y vistosas flores lilas con puntos amarillos en los pétalos, usualmente se pueden encontrar en superficies de ciénagas, presas, micropresas, lagunas, zanjas, arroyos y ríos (Chicas et al, 2021).

### 1.3.3.1. Reproducción

Su reproducción puede ser tanto sexual como asexual y prevalece principalmente en cuerpos de agua tropical y subtropicales. *Eichhornia crassipes* se reproduce sexualmente, a partir de flores que producen frutos en forma de cápsula, procedimiento que le permite multiplicarse, no obstante, la reproducción más sencilla que tiene la planta, es por división de los estolones que los plantones emiten durante la estación favorable; lo que origina una tupida red vegetal capaz de colonizar en poco tiempo una gran superficie acuática (Carreño, 2020).

### 1.3.3.2. Distribución geográfica

Es una planta acuática originaria de la cuenca Amazonas, además de otros cuerpos de agua de esta región, así como lagos y pantanos de Brasil y región Ecuatorial. Los últimos reportes indican que se encuentra distribuido por entre el trópico y subtrópico entre los 39°N y 39°S (Mena, 2021).

### 1.3.3.3. Condiciones del hábitat

La *Eichhornia crassipes*, vive y se desarrolla adecuadamente bajo un rango de temperatura controlada desde los 25° a 27°C, además, puede existir en aguas altamente alcalinas como ácidas; no obstante, se presenta de forma más numerosa en condiciones alcalinas. Cabe resaltar que, las heladas las conducen a la muerte, debido a su vulnerabilidad ante temperaturas bajas (Lagos, 2005)

### 1.3.4. *Lemna minor*

También conocida como “lenteja de agua” es una Magnoliophyta (planta con flores), que pertenece a la clase *Liliopsidas*, de la familia *Lemnaceae*. Su cuerpo vegetativo atañe a la forma

taloide, es decir, en la que no se aprecia la diferencia entre el tallo y las hojas. Esta planta consiste en una estructura plana de color verde y contiene una sola raíz delgada de color blanco. El tamaño de la *Lemna minor* es minúsculo, alcanzando de 2 a 4mm de longitud y 2mm de ancho. Dentro de la división de *Magnoliophytas*, es una de las especies más pequeñas que existen en el reino plantae (Arroyave, 2004).

#### **1.3.4.1. Reproducción**

La lenteja de agua es una planta monóica (tiene flores masculinas y femeninas en su mismo tallo) con flores unisexuales. Las flores masculinas están constituidas por un solo estambre y las flores femeninas consisten en un pistilo formado por un solo carpelo. Además, su fruto contiene de 1 a 4 semillas. La forma más habitual de reproducirse es la asexual, es decir, por germinación. En los bordes basales se desarrolla una yema pequeña que produce una planta nueva la cual se separa de la planta progenitora. No obstante, es bastante común encontrar las plantas agregadas formando grupos de 2 a 4 individuos (Tache, 2020).

#### **1.3.4.2. Distribución geográfica**

Esta planta se distribuye a nivel mundial. Encontrándose en varias regiones de los hemisferios norte y sur, incluyendo América, Europa, Asia, Australia y Nueva Zelanda. Se encuentra principalmente en charcos de aguas dulces, ciénagas, lagos y ríos calmados (Arroyave, 2004). *Lemna minor*, es una planta acuática flotante de rápido crecimiento y de amplia distribución tropical y subtropical, que se desarrolla principalmente en lagunas.

### 1.3.4.3. Condiciones del hábitat

La planta se desarrolla en un rango amplio de temperaturas, que varía entre 5° a 30°C con un crecimiento óptimo entre los 15° y 18°C. *Lemna minor* se adapta bien a cualquier condición de iluminación, crece rápidamente en partes calmadas y ricas en nutrientes, con altos niveles de nitrógeno y fosfatos. Además, pueden soportar un amplio rango de pH, siendo el óptimo desde 4.5 a 7.5 (Bustamante, 2018)

### 1.3.5. *Typha latifolia*

Esta especie también es llamada como “espadaña”, pertenece a la familia de las *Typhaceae* las cuales son plantas herbáceas perennes rizomatosas (con tallo subterráneo de diversas yemas, que se desarrolla de manera horizontal, pronunciando raíces y nuevos brotes), además, poseen largas hojas verdes y flores en forma de salchicha en su parte más externa. La *Typha latifolia* en su estado adulto alcanza alturas entre 3.5 – 4.0 m y poseen una inflorescencia que no presenta separación entre el polen y el pistilo (Tejeda, 2010).

#### 1.3.5.1. Reproducción

La reproducción de esta especie ocurre a través de la polinización ocasionada por el viento (en el tallo floral la inflorescencia masculina y femenina están muy próximas entre sí en un rango de 0 a 2.5cm) y produciéndose grandes cantidades de polen en tétradas; sin embargo, la reproducción más común en esta especie es la vegetativa, a través de sus rizomas (Smith, 1967).

### 1.3.5.2. Distribución geográfica

*Typha latifolia* podemos encontrarla en casi todo el territorio norteamericano, acentuándose con mayor presencia en Estados Unidos y México. Además, en países como Alaska, Gran Bretaña, India, Australia, Nueva Zelanda e India. Así como en algunos países africanos y sudamericanos (Grace y Harrison, 1986).

### 1.3.5.3. Condiciones del hábitat

La *Typha latifolia* es capaz de soportar la mayoría de climas y condiciones ambientales. Se puede encontrar desde climas tropicales, subtropicales hasta templados de zonas norte y sur. Además, prospera tanto en zonas costeras húmedas y climas continentales secos. Incluso esta especie la encontramos en elevaciones del mar de 2125 m.s.n.m. (Smith, 1967).

### 1.3.6. *Phragmites australis*

La *Phragmites australis*, también es conocida como “carrizo”, es una planta estolonífera (posee estolones) rizomatosa de estación cálida que crece de 2 a 4m de altura, con limbos foliares lisos y planos de 1 a 5 cm de ancho y de 15 a 45 cm de largo. Además, su inflorescencia es una panícula abierta de color púrpura que luego del desgrane de la semilla se torna un aspecto semejante a una bandera (González et al, 2009).

#### 1.3.6.1. Reproducción

La reproducción principal es vegetativa, es decir mediante un extenso sistema de rizomas, que dan origen a nuevas plantas, que alcanzan incluso hasta 43 pies desde la planta

madre. También, se puede reproducir por semillas arrastradas por el viento o depositadas por las aves, sin embargo, esta última forma de propagarse suele tener germinaciones bajas (Wallace et, 2021).

### **1.3.6.2. Distribución geográfica**

La *Phragmites australis* es una de las angiospermas más distribuidas alrededor del mundo, progresa en ambientes templados y tropicales, prácticamente en todos los continentes excepto la Antártida. Es razón de su distribución, no hay forma de que la supervivencia de esta especie se encuentre amenazada (Steinmann, 2008).

### **1.3.6.3. Condiciones del hábitat**

Vive en marismas, lagunas y bordes de ríos formados por densas poblaciones, desde el nivel del mar a los 1000 m de altitud. Además, crece a plena luz, pero soporta sombras. La temperatura óptima de la planta se encuentra en el calor moderado y el pH que puede tolerar la planta va desde 4.5 hasta 7.5. Mayormente se encuentra en suelos encharcados donde principalmente abunda el nitrógeno como nutriente (García, 2021).

### **1.3.7. *Schoenoplectus californicus***

También llamada totora o junco, es una especie perenne que posee rizomas (tallos subterráneos) que crecen paralelamente a la superficie del suelo, del cual brotan múltiples tallos verdes. Los tallos pueden alcanzar una medida de 1 a 4 m, son erectos cespitosos, lisos, agudamente trígonos, además, nacen a partir de los nudos de los rizomas, en forma de cilindro cortical de poco espesor sin ramificaciones (Chagua & Tardío, 2015). Además, (Hidalgo y García,

2018) añaden que, el sistema radicular consiste en que los rizomas crecen paralelos al sustrato; en ese sentido, el rizoma tiene nudos cada 2 a 6 cm, a partir de los cuales crecen verticalmente las cañas. Por otro lado, el sistema de raíces se desarrolla como una estructura similar a una red que almacena nutrientes lo cual permite sobrevivir a la planta durante las situaciones desfavorables.

### **1.3.7.1. Reproducción**

La *Schoenoplectus californicus* (totora) se reproduce de dos maneras; sexual y asexual. La primera consiste en la culminación del periodo de floración de las plantas, cuando los frutos están listos para que las semillas maduras puedan generar nuevas plantas; las semillas caen al agua y se llevan a la orilla, donde entran en contacto con el sustrato y germinan. La segunda manera corresponde a la reproducción asexual, trata de la propagación de las plantas mediante el desarrollo de los rizomas, estos, se extienden de manera horizontal bajo el suelo formando nudos cada 6 cm de los cuales se generan nuevos tallos (Chagua y Tardío, 2015).

### **1.3.7.2. Distribución geográfica**

Su distribución reside especialmente en América, abarcando desde el Sur de Estados Unidos hasta la Patagonia. Además, crece en suelos inundados, desde ambientes dulceacuícolas hasta salobres, donde puede haber influencia de mareas. Por otro lado, el nombre varía según la región en la que se encuentre, por ejemplo, en Argentina se le llama “junco”, por otro lado, en Perú y Ecuador se le dice “totora” (Sabaj, 2011).

### 1.3.7.3. Condiciones del hábitat

Las totoras son plantas de climas templados que progresan en soleadas, y soportan un amplio rango de pH 4 hasta 9. La temperatura óptima para su crecimiento y desarrollo abarca en un intervalo de 16 °C a 27 °C (Bedoya, 2014). Además, no se han hallado diferencias morfológicas importantes entre juncales de agua dulce, como el de las lagunas Vitel y de Chascomús, con los de agua salobre como el de la laguna Salada Grande o el estuario del Río de la Plata (Rossi y Tur, 1976).

### 1.3.8. Humedales artificiales

Los humedales artificiales son un material aislante colocado bajo un lecho filtrante de material poroso y una cubierta vegetal de plantas macrófitas que, mediante la incorporación de oxígeno a través de sus raíces, depura el agua mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Pérez et al, 2013).

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas contaminadas. Estos sistemas consisten en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado, a través de la cual, ocurren interacciones físicas, químicas y biológicas que, en consecuencia, permiten la depuración de las aguas (Delgadillo et al, 2010)

#### 1.3.8.1. Tipos de humedales artificiales

- Humedales artificiales de flujo libre o superficial, este es un tipo de humedal que se utiliza en condiciones aerobias al estar el agua en contacto directo con la atmósfera. Este tipo de

humedales, suele usarse para tratamientos secundarios y para crear o restaurar ecosistemas acuáticos; se caracteriza por imitar los procesos de un humedal natural (Miguel, 2013).

- Humedales artificiales de flujo subsuperficial, este tipo de sistemas no tiene una columna de agua continua, por ello, son cargados intermitentemente; por otro lado, el nivel del agua se mantiene totalmente por debajo del lecho filtrante, esto evita los problemas con la proliferación de insectos. No obstante, se caracteriza porque la circulación del agua tanto vertical como horizontal se realiza a través de un medio granular subterráneo por gravedad, con una profundidad de agua de 0.6 m (Núñez, 2016).
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical, en este tipo de humedales las aguas circulan de arriba hacia abajo, a través de un material filtrante en el que se encuentran las macrófitas. En este caso el agua es vertida desde la parte de arriba mediante una dosificación mecánica, atravesando por diferentes condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Arce, 2018).
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, estos a diferencia del anterior, circulan horizontalmente, atravesando un material filtrante, en este caso puede ser grava; al fluir el agua a tratar horizontalmente, el material filtra partículas y microorganismos, permitiendo así, la degradación del material orgánico presente (Cardenas, 2012).

### 1.3.9. Metales pesados

Los metales pesados son elementos químicos con alta densidad (mayor a  $4\text{g/cm}^3$ ), masa y peso atómico por encima de 20, algunos en dosis pequeñas resultan primordiales en nuestra dieta,

sin embargo, hay otros que no cumplen ninguna función fisiológica y resultan afectando nuestra salud de diferentes formas (Londoño et al, 2016).

### **1.3.10. Riesgo en la salud por metales pesados**

Las vías de exposición de los metales pesados se dan principalmente por dos vías de exposición: inhalación e ingesta de alimentos. La afectación de los metales pesados reside en la presencia de estos en el organismo, los cuales, se distribuyen en los órganos, tejidos, huesos y dientes, en donde se va acumulando a través del tiempo, ocasionando intoxicaciones agudas y/o crónicas; siendo así, altamente perjudiciales, llegando a ser en algunos casos cancerígenos, que luego, derivarán en malformaciones genéticas y la muerte (Reyes et al, 2016).

### **1.3.11. Contaminación ambiental**

La contaminación ambiental es la presencia de agentes físicos, químicos o biológicos, derivados de una combinación de un conjunto de agentes que son nocivos para la salud, para la seguridad y el bienestar de la población; o llegan a ser perjudiciales para los seres vivos en general (Palacios y Moreno, 2022).

Es el cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas del ambiente, el cual, tiene lugar en el aire, agua o suelo. La contaminación ambiental se aprecia cuando afecta la salud, sobrevivencia o a las actividades del ser humano y los demás organismos vivos (Colín y Jiménez, 2003).

#### **1.4. Formulación del problema**

¿Cuál es la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* en el tratamiento de efluentes con metales pesados?

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo general**

Analizar la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* en el tratamiento de efluentes con metales pesados.

##### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar a las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* para el tratamiento de efluentes con metales pesados.
- Analizar la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* para el tratamiento de efluentes con metales pesados.
- Determinar el potencial de fitorremediación de las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* en el tratamiento de efluentes con metales pesados.

## 1.6. Justificación

La contaminación ambiental originada por manejos deficientes e inadecuados de los residuos ocasionados por las actividades humanas, ya sea de manera industrial o doméstica, ocasiona un grave detrimento al ambiente y afecta directamente la salud de las poblaciones. El medio acuático es de suma importancia para la existencia de la vida y su mantenimiento, los cuerpos de agua reciben gran carga de contaminación, producto de ello, océanos, ríos, lagos y demás resultan gravemente perjudicados por las acciones económicas humanas. Puntualmente, la minería como actividad extractiva y sus residuos generados, resulta en un fuerte impacto al entorno natural, sobre todo, con la disposición de sus efluentes finales cargados de metales pesados que terminan diluyéndose en cuerpos de agua, afectando la calidad de estos. La fitorremediación como técnica innovadora, amigable con el entorno y económicamente viable, ha ganado popularidad en los últimos años para el tratamiento de las aguas residuales con carga orgánica e inorgánica, el fundamento de esta tecnología es la utilización de plantas capaces de absorber, translocar, degradar y transformar contaminantes. Bajo este marco, se han utilizado varias especies vegetales aprovechando sus potencialidades naturales para la fitodepuración. Por tanto, es necesario desarrollar contenido que permita delimitar y conocer a profundidad tanto el potencial de fitorremediación como la afinidad metálica específica de ciertas especies vegetales. Con este trabajo, se busca servir a la comunidad científica como fuente de conocimiento y base para la toma de decisiones en cuanto al diseño de sistemas de tratamiento para la descontaminación de efluentes cargados con metales pesados.

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

### 2.1. Diseño de investigación

Para la elaboración de esta tesis, se consideró el tipo de investigación descriptiva, la cual, busca detallar la realidad del objeto de estudio y proponerlo como alternativa de solución, a partir de los resultados obtenidos de los trabajos científicos. El tipo de investigación descriptiva considera los aspectos, las partes, sus clases, sus categorías o las relaciones que se pueden establecer entre varios objetos, con el fin de desenmarañar una verdad o corroborar un enunciado. Además, la investigación descriptiva se comprende cómo el acto de representar a través de palabras las características de fenómenos, hechos, situaciones, cosas, personas, de tal manera que quien lea o dilucide, los rememore en la mente (Niño, 2011).

Los trabajos descriptivos únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o en conjunto sobre los conceptos o las variables a las que se refieren; su objetivo no es indicar cómo se atañen éstas (Hernández, 2014).

### 2.2. Población

La población del presente trabajo es el universo de casi 50 investigaciones comprendidas entre tesis de pregrado, grado y artículos de investigación científica los cuales, fueron recolectados preliminarmente a través de términos clave como fitorremediación, macrófitas, metales pesados y humedales artificiales; extraídos de distintos repositorios académicos presentes en internet, que cuentan con un alto grado de formalidad y confiabilidad, para su posterior evaluación e inclusión final. El contenido de dichas investigaciones estuvo relacionado directamente con la aplicación de

la técnica conocida como fitorremediación, para el tratamiento del agua principalmente como medio afectado por presencia de metales pesados de naturaleza real o artificial, como drenajes ácidos de mina, efluentes mineros, lixiviados, aguas residuales industriales y soluciones metálicas artificiales. La totalidad de investigaciones fueron realizadas en diversos países y en los idiomas español e inglés, con una antigüedad no mayor a los veinte años de realización y/o publicación.

### **2.3 Muestra**

La muestra del presente trabajo abarca la totalidad de 20 investigaciones seleccionadas a posteriori, las cuales, cumplían con utilizar únicamente o en conjunto las cinco especies macrófitas escogidas (*Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus*) como unidad de análisis; con la finalidad de identificar teóricamente sus afinidades específicas respecto al proceso de absorción metálica. Cabe mencionar que, la selección de las cinco especies macrófitas se basó en su frecuencia y popularidad en el tratamiento de aguas residuales con carga metálica al momento de hacer la consulta y lectura de antecedentes. A su vez, las investigaciones fueron recopiladas de repositorios como: Biblioteca UPN, Google Académico, Research Gate, Redalyc, Scielo y en el repositorio nacional Alicia Concytec.

### **2.4. Técnica**

El trabajo se desarrolló bajo la técnica de registro y análisis documental, a través del cual, se obtuvieron datos y resultados de las veinte investigaciones (tesis de pregrado, grado y artículos de investigación científica) seleccionadas para luego sistematizar dicha información, con el fin de realizar el análisis de contenido correspondiente en coherencia a los objetivos planteados.

## 2.5. Materiales

El material principal para la realización de este trabajo fue la ficha de registro (Anexo 2); a través de esta herramienta de recolección de datos, se pudo sistematizar y clasificar el registro de la información leída en las investigaciones, de esta manera, se capturaron las ideas, resultados, observaciones y determinaciones alcanzadas por los investigadores, que fueron la base para el establecimiento de conclusiones. La información fue dividida en los siguientes campos: título, autor (es), año, idioma, objetivos, metodología, metales y especies macrófitas estudiadas, resultados, observaciones y conclusiones. Vale mencionar también que, dicha herramienta fue construida con el programa de ofimática Excel donde también, se realizaron las tablas y gráficos producto del procesamiento de la información.

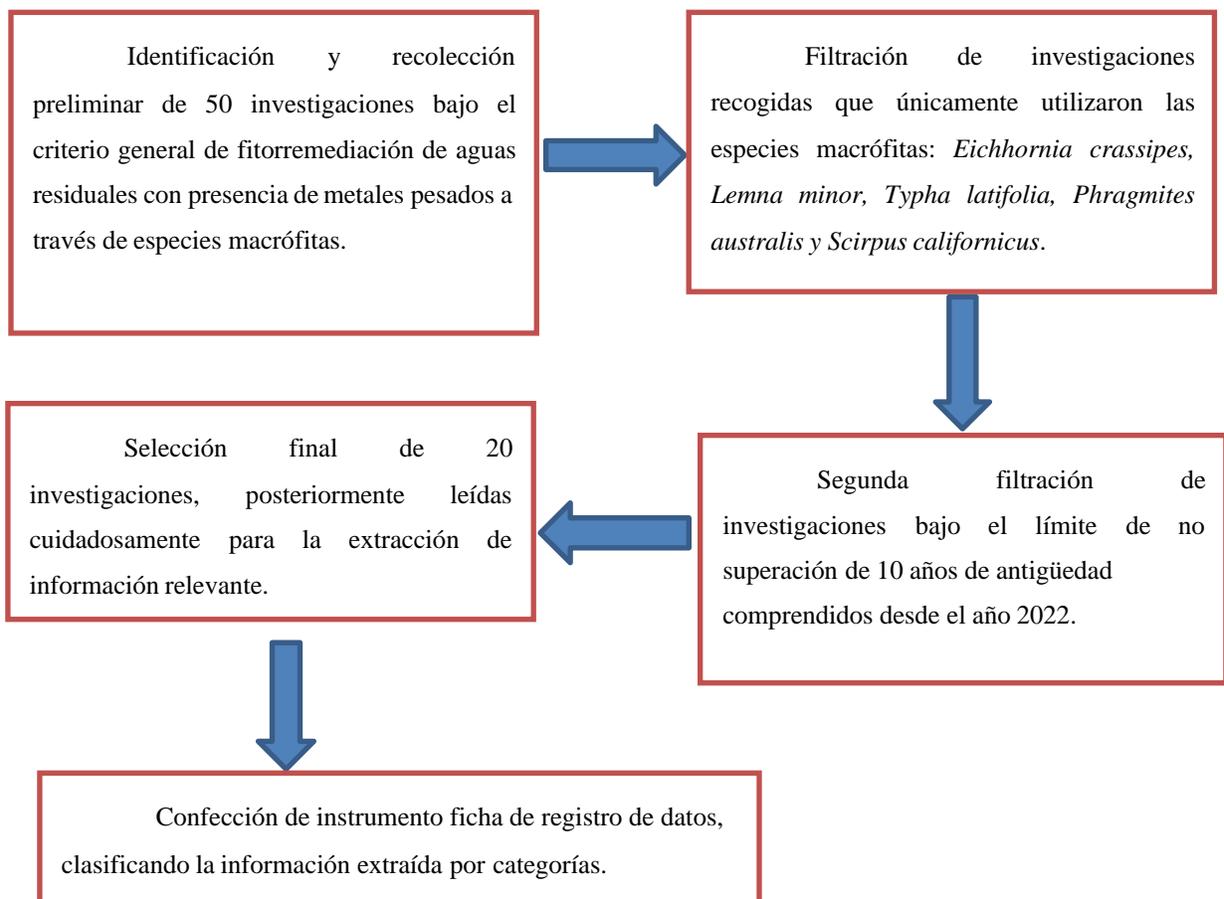
## 2.6. Procedimiento de obtención de datos

Para la obtención de datos se empezó por la búsqueda de investigaciones en internet valiéndose de los términos clave (fitorremediación, humedales artificiales, macrófitas) en los repositorios Biblioteca UPN, Google Académico, Research Gate, Redalyc, Scielo y en el repositorio nacional Alicia Concytec. De un universo de cerca de 50 investigaciones, se filtró la información centrándose únicamente en las cinco especies planteadas (*Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus*) y en efluentes con presencia de trazas de metales pesados; de esta manera, se filtraron únicamente 20 trabajos investigativos. Con todo esto, se hizo uso del instrumento de la ficha de registro de datos donde se almaceno la información de diferentes tesis y artículos científicos, considerando las partes más importantes en relación a los objetivos del trabajo de investigación, específicamente cuestiones

relacionadas con la macrófita únicamente; organizando así, ítems como: título, autor (es), año, idioma, objetivos, metodología, metales, especies macrófitas estudiadas, resultados, observaciones y conclusiones. Importante mencionar que, respecto al idioma inglés presente en varias investigaciones, la información correspondiente fue traducida y leída cuidadosamente para evitar no rescatar completamente los datos expuestos. La figura 1 resume el proceso de búsqueda, selección preliminar y filtración:

**Figura 1**

*Procedimiento de selección y almacenamiento de investigaciones*

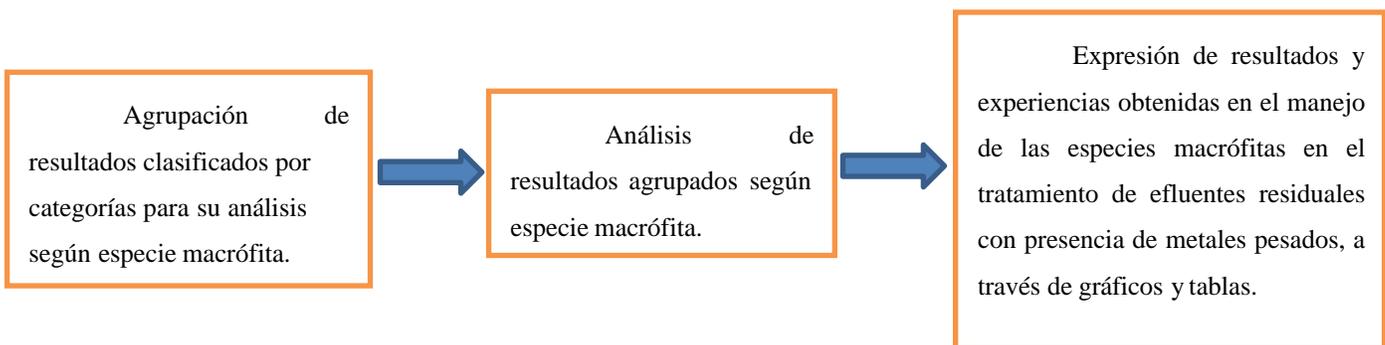


## 2.7. Procedimiento de análisis de datos

Para el análisis de datos, una vez confeccionada la ficha de registro, se agrupó la información por tipo de planta, de esta forma, se contó con una matriz de información específica para cada macrófita la cual, contenía los metales tratados en las investigaciones; en su totalidad estos fueron: hierro (Fe), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), aluminio (Al), manganeso (Mn), zinc (Zn), arsénico (As), cromo (Cr), níquel (Ni), cadmio (Cd) y cobalto (Co). De esta forma, se pudo trabajar específicamente para cada planta con los metales que dichas investigaciones habían tratado. Los resultados recogidos y procesados fueron analizados cuidadosamente y expresados a través de tablas y gráficos que permitieron discutir y establecer conclusiones, todo esto por medio del programa ofimático de hojas de cálculo Excel (2016). Cabe mencionar también que, el tratamiento estadístico de los resultados, se realizó utilizando las funciones propias del programa Excel (2016). La siguiente figura resume los procesos antes detallados:

**Figura 2**

*Procedimiento de análisis de datos*



## 2.8. Aspectos éticos

Se respetó la veracidad de los resultados publicados por los autores consultados, para el correspondiente síntesis y análisis. A su vez, también se respetó la autoría de los dueños de las publicaciones.

### CAPÍTULO III: RESULTADOS

**Objetivo Específico 01: Caracterizar a las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* para el tratamiento de efluentes con metales pesados.**

La clasificación general de las especies *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* es desarrollada en la siguiente tabla.

**Tabla 3**

*Clasificación de macrófitas*

<b>Especie</b>	<b>Familia</b>	<b>Orden</b>	<b>Clase</b>	<b>División</b>	<b>Reino</b>
<i>Lemna minor</i>	<i>Lemnaceae</i>	<i>Alismatales</i>	<i>Liliopsidas</i>	<i>Magnoliophytas</i>	<i>Plantae</i>
<i>Eichhornia crassipes</i>	<i>Pontederiaceae</i>	<i>Comelinales</i>	<i>Liliopsidas</i>	<i>Magnoliophytas</i>	<i>Plantae</i>
<i>Schoenoplectus californicus</i>	<i>Cyperaceae</i>	<i>Cyperales</i>	<i>Liliopsidas</i>	<i>Magnoliophytas</i>	<i>Plantae</i>
<i>Phragmites australis</i>	<i>Poaceae</i>	<i>Poales</i>	<i>Liliopsidas</i>	<i>Magnoliophytas</i>	<i>Plantae</i>
<i>Typha latifolia</i>	<i>Typhaceae</i>	<i>Poales</i>	<i>Liliopsidas</i>	<i>Magnoliophytas</i>	<i>Plantae</i>

Fuente: Elaboración propia.

Al observar la tabla se puede apreciar que, las cinco especies macrofitas pertenecen a cinco familias diferente: *Lemnaceae*, *Pontederaceae*, *Cyperaceae*, *Poaceae* y *Typhaceae*. Siendo todas de la clase *Liliopsidas* y división *Magnoliophytas*.

Asimismo, la caracterización no puede basarse solo en la taxonomía, por ello, se incluyen los metales pesados que estas plantas pueden tratar en efluentes. A partir de la tabla podemos observar que; *Eichhornia crassipes*, es capaz de remover mayor cantidad de metales pesados que las otras cuatro.

#### Tabla 4

Clasificación en base a la remoción de metales pesados

Nombre científico	Nombre común	Número de elementos	Metales pesados
<i>Lemna minor</i>	Lenteja de agua	4	Cd, Cu, Pb, Hg
<i>Eichhornia crassipes</i>	Jacinto de agua	6	Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Zn
<i>Phragmites australis</i>	Carrizo	3	Mn, Mg, Fe
<i>Typha latifolia</i>	Espadaña	3	Fe, Cu, Pb
<i>Scirpus californicus</i>	Totora	4	Pb, Fe, Cu, Mn

Fuente: Jaramillo y Flores (2012).

**Objetivo Específico 02: Analizar la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* para el tratamiento de efluentes con metales pesados.**

Para el desarrollo de este apartado, se analizaron los resultados y las experiencias obtenidas por diversos autores, cuya información fue plasmada en una matriz de datos de veinte investigaciones donde se utilizaron las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* como elementos sustanciales para mediar el tratamiento de aguas residuales con presencia de trazas de metales pesados, valiéndose del proceso conocido como fitorremediación. Para efectos de practicidad, se analizará por separado cada especie macrófita. Finalmente, cabe mencionar que en la sección anexos se encuentran la totalidad de investigaciones recopiladas para cada especie macrófita.

*Eichhornia crassipes*

La siguiente tabla resume la totalidad de resultados recopilados para la especie macrófita *Eichhornia crassipes*, agrupando la información por autor (es), especie macrófita, nombre común, metal, resultados y/o experiencias recogidas.

**Tabla 5**

*Resultados obtenidos con la utilización de Eichhornia crassipes*

N°	Autor (es)	Especie macrófita	Nombre común	Metal	Resultado (s)
----	------------	-------------------	--------------	-------	---------------

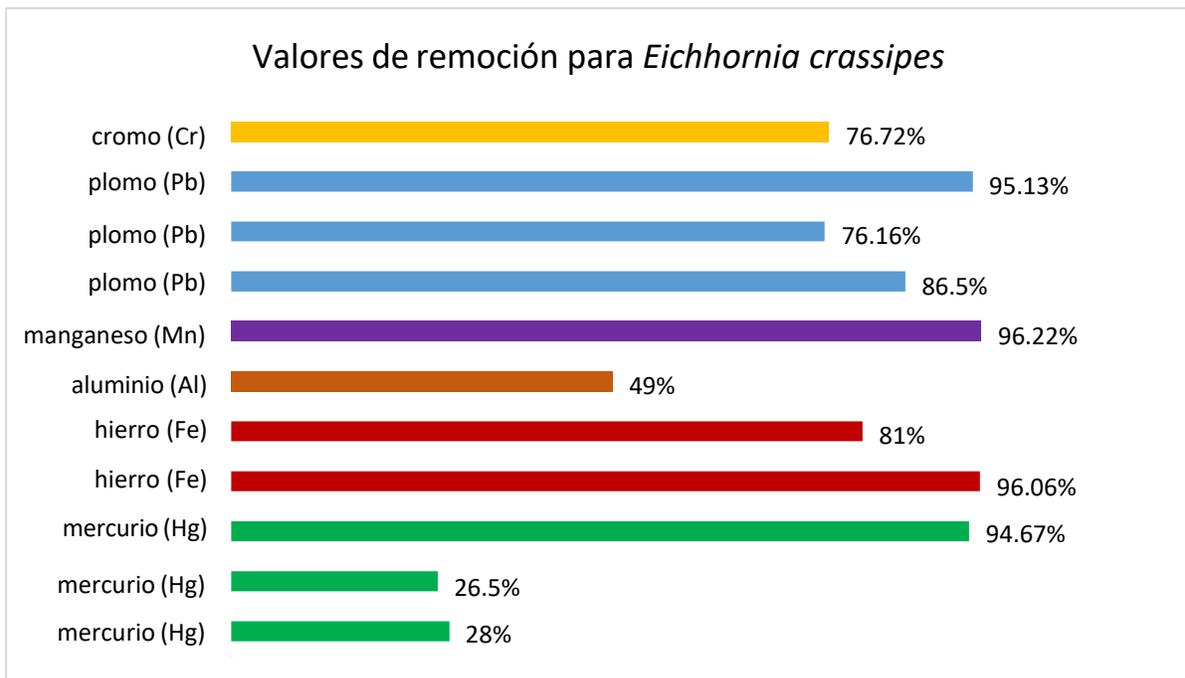
1	Jaramillo, M. y Flores, E.	<i>Eichhornia crassipes</i>	Jacinto de agua	mercurio (Hg)	Porcentaje de remoción de mercurio únicamente con <i>E. crassipes</i> : 28%. Porcentaje de remoción de mercurio tratamiento combinado <i>E. crassipes</i> y <i>L. minor</i> : 26% - 27%. Presencia de necrosis en planta.
2	Sekarjannah, F., Wardoyo S. y Raith, Y	<i>Eichhornia crassipes</i>	Hyacinth	hierro (Fe) - manganeso (Mn)	Porcentaje de remoción de hierro, absorción en raíces: 96,06%. Porcentaje de remoción de manganeso, absorción en raíces: 96,22%.
3	Orillo, S. y Quiroz, L.	<i>Eichhornia crassipes</i>	Jacinto de agua	hierro (Fe) - aluminio (Al)	Porcentaje de remoción de hierro: 81%. Porcentaje de remoción de aluminio: 49%.
4	Atehortua, E. y Gartner, C.	<i>Eichhornia crassipes</i>	Lirio Acuático, Jacinto de Agua o Buchón de Agua	chromo (Cr) - plomo (Pb)	Porcentaje de remoción de plomo con biomasa seca en solución sintética: 86,5%. Porcentaje de remoción de plomo con biomasa ultra seca en solución sintética: 76,16%. Porcentaje de remoción de plomo con biomasa seca en lixiviado: 95,13%. Porcentaje de remoción de chromo con biomasa seca en lixiviado: 76,72%.
5	Paredes, J. y Ñique, M.	<i>Eichhornia crassipes</i>	Jacinto de agua	mercurio (Hg)	Porcentaje de remoción de mercurio, absorción en raíces: 94,67% en medio acuoso básico. Estimulación con nutrientes: 7,6 cm de crecimiento radicular.

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura describe el total de porcentajes de remoción metálica obtenidos y/o calculados de las investigaciones consultadas respecto a la utilización de *E. crassipes*.

### Figura 3

*Porcentajes de remoción metálica reportados para Eichhornia crassipes*



Nota: Los metales tratados utilizando *E. crassipes* fueron: mercurio (Hg), plomo (Pb), hierro (Fe), aluminio (Al) y manganeso (Mn).

La figura anterior grafica lo contemplado en la tabla 5, al analizar detenidamente la figura, se puede observar que, de un total de seis metales tratados, el valor más alto reportado fue de 96,22% de remoción para el metal manganeso, seguido por 96,06% para el metal hierro y 95,13% para el plomo. El valor más bajo registrado fue de 26,5% de remoción para el metal mercurio.

### *Lemna minor*

La siguiente tabla resume la totalidad de resultados recopilados para la especie macrófita *Lemna minor*, agrupando la información por autor (es), especie macrófita, nombre común, metal, resultados y/o experiencias recogidas.

**Tabla 6**

*Resultados obtenidos con la utilización de Lemna minor*

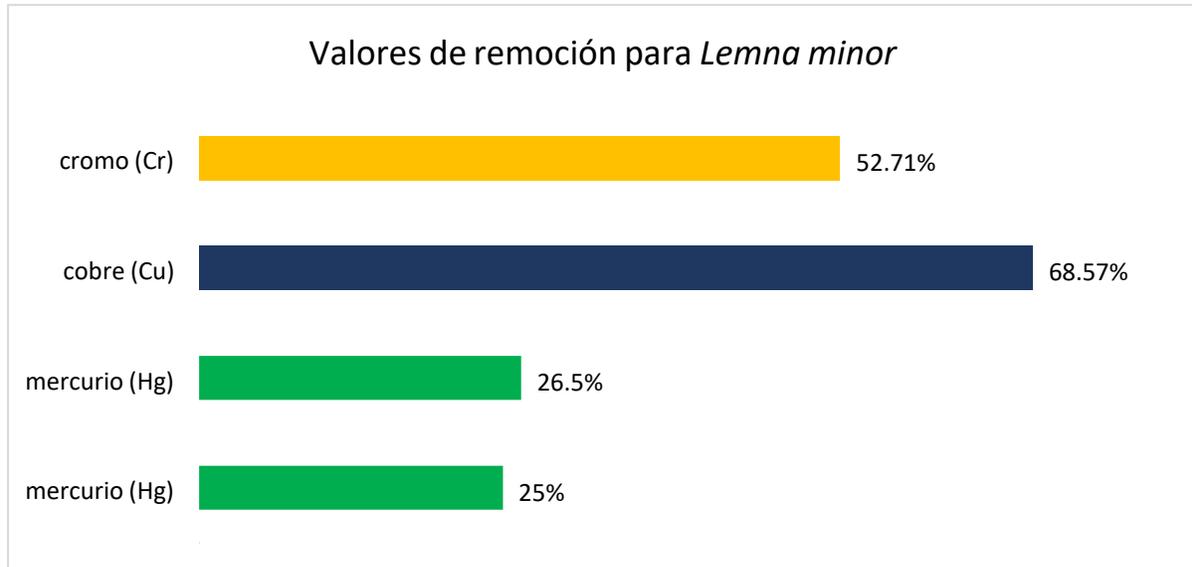
N°	Autor (es)	Especie macrófita	Nombre común	Metal	Resultado (s)
1	Jaramillo, M. y Flores, E.	<i>Lemna minor</i>	Lenteja de agua	mercurio (Hg)	Porcentaje de remoción de mercurio únicamente con <i>L. minor</i> : 24% - 26%. Porcentaje de remoción de mercurio tratamiento combinado <i>E. crassipes</i> y <i>L. minor</i> : 26% - 27%. Presencia de clorosis en planta.
2	Ávila, G.; Velit, C.; Ávila, L.; Rosales, S.; Manchego, A. y Mora, J.	<i>Lemna minor</i>	Lenteja de agua	cobre (Cu)	Porcentaje de remoción de cobre: 68,57%. Valor máximo reportado al día 28 de tratamiento.
3	Carreño, M.	<i>Lemna minor</i>	Lenteja de agua	cromo hexavalente (Cr <sup>+6</sup> )	Porcentaje de remoción de cromo hexavalente: 52,71%. Valor máximo reportado al día 06 de tratamiento en presencia de alta carga de materia orgánica y baja densidad poblacional plantar.

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura describe el total de porcentajes de remoción metálica obtenidos y/o calculados de las investigaciones consultadas respecto a la utilización de *L. minor*.

**Figura 4**

*Porcentajes de remoción metálica reportados para Lemna minor*



Nota: Los metales tratados utilizando *L. minor* fueron: mercurio (Hg), cobre (Cu) y cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ).

La figura anterior grafica lo contemplado en la tabla 6, al analizar detenidamente la figura, se puede observar que, de un total de tres metales tratados, el valor más alto reportado fue de 68,57% de remoción para el metal cobre, seguido por 52,71% para el metal cromo. El valor más bajo registrado fue de 26,5% de remoción para el metal mercurio.

*Typha latifolia*

La siguiente tabla resume la totalidad de resultados recopilados para la especie macrófita *Typha latifolia*, agrupando la información por autor (es), especie macrófita, nombre común, metal, resultados y/o experiencias recogidas.

**Tabla 7**

*Resultados obtenidos con la utilización de Typha latifolia*

N°	Autor (es)	Especie macrófita	Nombre común	Metal	Resultado (s)
1	Singh, S. y Chakraborty, S.	<i>Typha latifolia</i>	Espadaña común	cromo (Cr) - níquel (Ni) - cobalto (Co) - hierro (Fe) - aluminio (Al)	Porcentaje de eficiencia en la remoción del sistema: cromo: 99,7%; níquel: 97,8%; cobalto: 93,7%; hierro: 91,6%; aluminio: 59,7%; manganeso: no se reportan valores. Estabilización del pH: 6,4 unidades.
2	López, A.	<i>Typha latifolia</i>	Totora común	cobre (Cu) - plomo (Pb) - zinc (Zn) - hierro (Fe) - arsénico (As)	Porcentaje de eficiencia en la remoción del sistema mixto: cobre: 99,78%; plomo: 94,96%; zinc: 99,96%; hierro: 99,95%; arsénico: 99,95%. <i>T. Latifolia</i> potenció la eliminación de Zn, Pb, Cu y As.
3	Hernández, N. y Luna, J.	<i>Typha latifolia</i>	Enea	hierro (Fe)	Porcentaje de remoción de hierro: 13%; 0,19 mg/L acumulados en <i>T. latifolia</i> . Porcentaje de remoción de hierro, tratamiento combinado <i>T. latifolia</i> - <i>S. californicus</i> - <i>L. laevigatun</i> : 75,17%.

4	Kumari, M. y Tripathi, B.	<i>Typha latifolia</i>	Totora común	cobre (Cu) - cadmio (Cd) - cromo (Cr) - níquel (Ni) - hierro (Fe) - plomo (Pb) - zinc (Zn)	<p>Porcentajes de remoción metálica por <i>T. latifolia</i>:          hierro: 52,6%; zinc: 54,4%; cobre: 51,4%; cromo: 45,6%; plomo: 40%; cadmio: 39,7%.</p> <p>Porcentajes de remoción metálica por cultivo mixto <i>T. latifolia</i> - <i>P. australis</i>:          níquel: 61%; cobre: 60,9%; hierro: 59,3%; zinc: 58,7%; cromo: 58,2%; plomo: 53,6%; cadmio: 48,1%. <i>T. latifolia</i> propició los valores más bajos de remoción. <i>T. latifolia</i> demostró mayor afinidad en la captura de Pb y Zn.</p>
---	------------------------------	------------------------	--------------	---	--

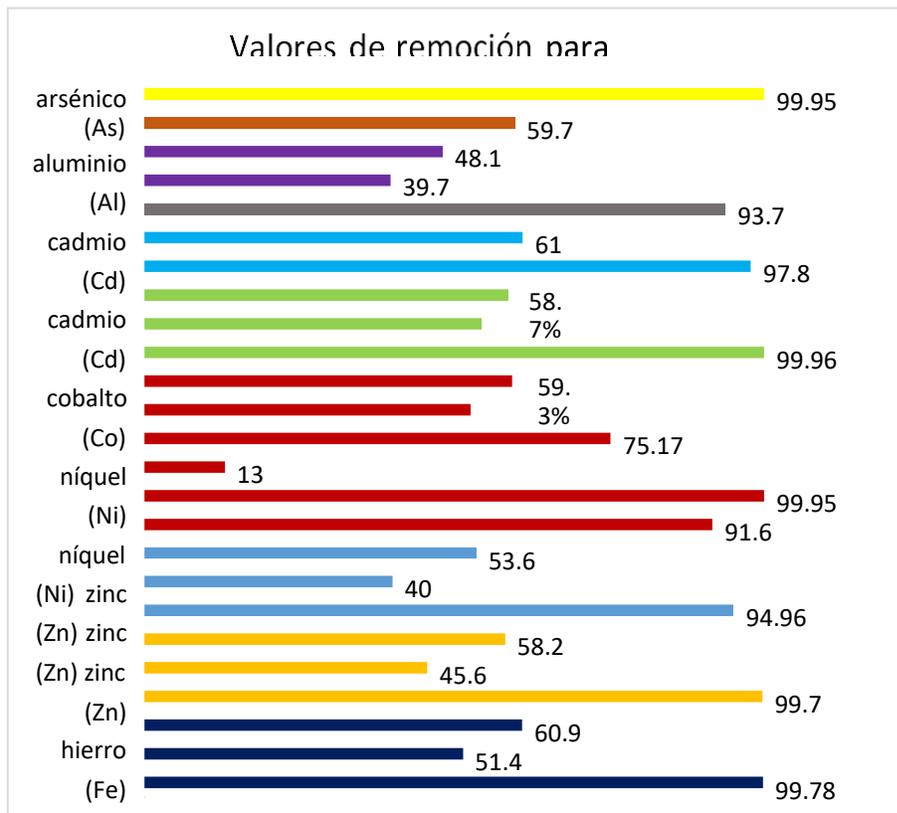
---

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura describe el total de porcentajes de remoción metálica obtenidos y/o calculados de las investigaciones consultadas respecto a la utilización de *T. latifolia*.

**Figura 5**

*Porcentajes de remoción metálica reportados para Typha latifolia*



Nota: Los metales tratados utilizando *T. latifolia* fueron: cobre (Cu), cromo (Cr), arsénico (As), aluminio (Al), cadmio (Cd), cobalto (Co), níquel (Ni), zinc (Zn), hierro (Fe) y plomo (Pb).

La figura anterior grafica lo contemplado en la tabla 7, al analizar detenidamente la figura, se puede observar que, de un total de diez metales tratados, el valor más alto reportado fue de 99,96% de remoción para el metal zinc, seguido por 99,95% para el metal hierro y arsénico y 99,78% para el metal cobre; sin embargo, coincidentemente el valor más bajo registrado fue de 13%

de remoción para el metal hierro, esto posiblemente a cuestiones de diseño y variables en el tratamiento, que han sido abordadas a detalle en el capítulo de discusiones.

### *Phragmites australis*

La siguiente tabla resume la totalidad de resultados recopilados para la especie macrófita *Phragmites australis*, agrupando la información por autor (es), especie macrófita, nombre común, metal, resultados y/o experiencias recogidas.

**Tabla 8**

*Resultados obtenidos con la utilización de Phragmites australis*

N°	Autor (es)	Especie macrófita	Nombre común	Metal	Resultado (s)
1	Amabilis, L., Siebe, C., Moeller, G. y Durán, M.	<i>Phragmites australis</i>	Carrizo	mercurio (Hg)	<p>Porcentaje de remoción total de mercurio por <i>P. australis</i> en rizomas, raíces, tallos y hojas: 6% del total de remoción del sistema.</p> <p>Porcentaje de remoción de mercurio en rizosfera metalotolerante: 59% en hojas; 32% en tallo; 4% en raíz; 5% en rizoma.</p> <p>Porcentaje de remoción de mercurio en rizosfera original: 48% en hojas; 41% en tallo; 6% en raíz; 5% en rizoma. Fitovolatilización del mercurio.</p>

2	Galván, J.	<i>Phragmites australis</i>	Carrizo	zinc (Zn) - plomo (Pb)	<p>Porcentaje de remoción metálica por <i>P. australis</i>, sistemas con siembra: HFSSH+P: plomo: 79,75% (65% en raíz; 5% en tallo; 30% en hojas), zinc: 52,41% (72% en raíz; 17% en tallo; 11% en hojas). HFS+P: plomo: 86,56% (91% en raíz; 7% en tallo; 2% en hojas), zinc: 29,79% (70% en raíz; 22% en tallo; 8% en hojas). HFSSV+P: plomo: 86,67% (80% en raíz; 9% en tallo; 11% en hojas), zinc: 67,96% (73% en raíz; 18% en tallo; 9% en hojas). La mayor absorción metálica se dio en las raíces. <i>P. australis</i> se desempeñó mejor frente a tratamientos con algas y/o sustratos.</p>
3	Pulcha, J. y Valencia, M.	<i>Phragmites australis</i>	Carrizo	cobre (Cu) - plomo (Pb) - zinc (Zn)	<p>Porcentaje de remoción metálica por <i>P. australis</i>, sistemas con siembra: cobre: 99,6% al día seis, 99,7% al día once; zinc: 99,78% al cuarto día, devolución total al día once; plomo: 99,41% al día uno, 98,68% al día siete. <i>P. australis</i> tuvo mayor capacidad depuradora para Zn y Pb.</p>

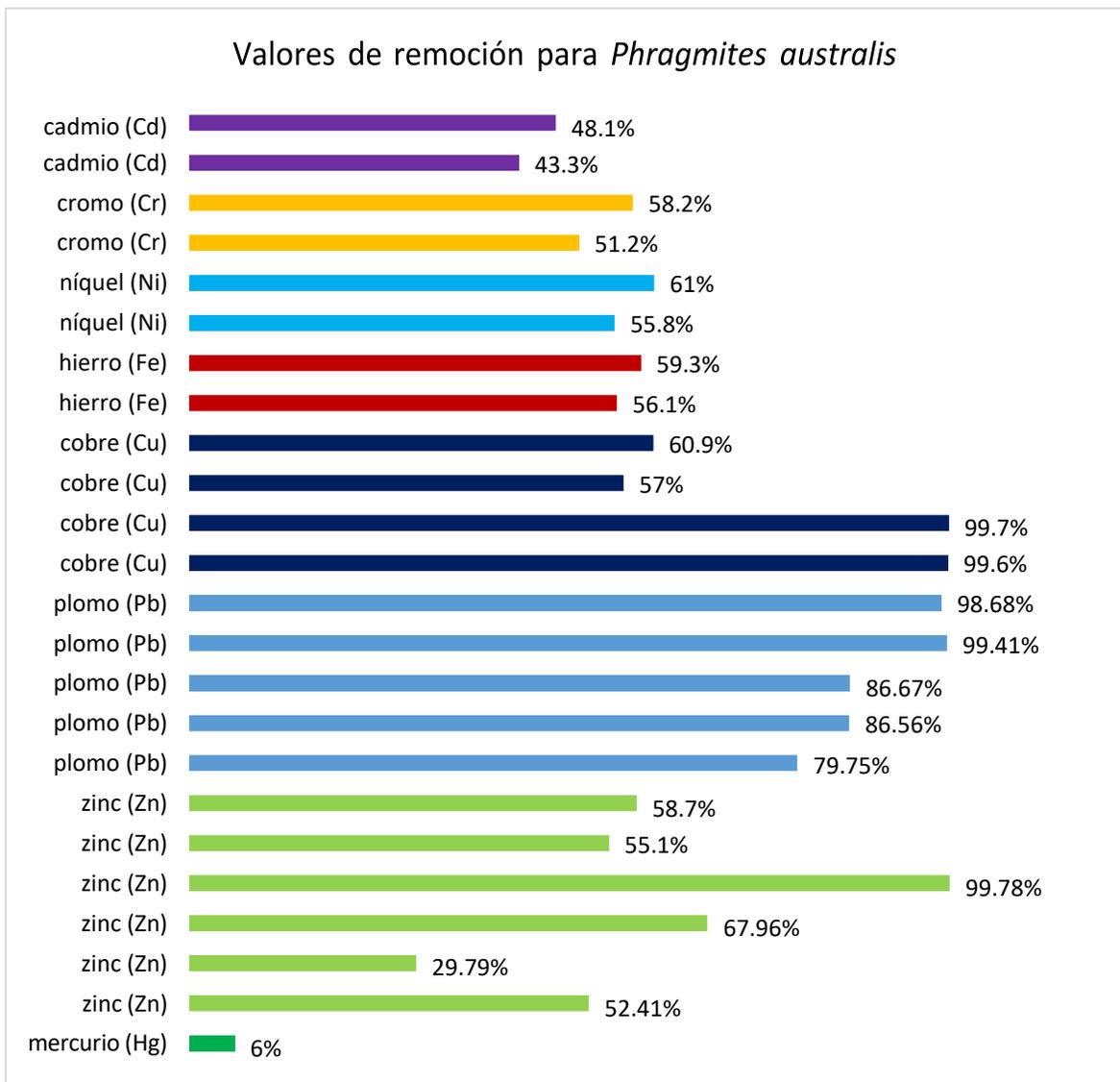
4	Kumari, M. y Tripathi, B.	<i>Phragmites australis</i>	Carrizo	<p>Porcentajes de remoción metálica por <i>P. australis</i>:          hierro: 56,1%; zinc: 55,1%;          cobre: 57%; cromo: 51,2%;          plomo: 45,7%; cadmio: 43,3%; níquel: 55,8%.</p> <p>Porcentajes de remoción metálica por cultivo mixto <i>T. latifolia</i> - <i>P. australis</i>:          níquel: 61%; cobre: 60,9%;          hierro: 59,3%; zinc: 58,7%;          cromo: 58,2%; plomo: 53,6%; cadmio: 48,1%. <i>P. australis</i> propició los valores más altos de remoción. <i>P. australis</i> demostró mayor afinidad en la captura de Cu, Cd, Cr, Ni y Fe.</p>
---	---------------------------------	-----------------------------	---------	---

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura describe el total de porcentajes de remoción metálica obtenidos y/o calculados de las investigaciones consultadas respecto a la utilización de *P. australis*.

**Figura 6**

*Porcentajes de remoción metálica reportados para Phragmites australis*



Nota: Los metales tratados utilizando *P. australis* fueron: cobre (Cu), cromo (Cr), cadmio (Cd), níquel (Ni), zinc (Zn), hierro (Fe), mercurio (Hg) y plomo (Pb).

La figura anterior grafica lo contemplado en la tabla 8, al analizar detenidamente la figura,

se puede observar que, de un total de ocho metales tratados, el valor más alto reportado fue de 99,78% de remoción para el metal zinc, seguido por 99,70% para el metal cobre y 99,41% para el metal plomo. El valor más bajo registrado fue de 6% de remoción para el metal mercurio.

### *Scirpus californicus*

La siguiente tabla resume la totalidad de resultados recopilados para la especie macrófita *Scirpus californicus*, agrupando la información por autor (es), especie macrófita, nombre común, metal, resultados y/o experiencias recogidas.

**Tabla 9**

#### *Resultados obtenidos con la utilización de Scirpus californicus*

N°	Autor (es)	Especie macrófita	Nombre común	Metal	Resultado (s)
1	Llana, I.	<i>Schoenoplectus californicus</i>	Totora	cadmio (Cd) - mercurio (Hg) - cobre (Cu) - plomo (Pb) - arsénico (As)	Potencial de bioacumulación metálico: cadmio: 10,9%; mercurio: 3,1%; cobre: 65,3%; plomo: 305,65%; arsénico: 9,95%; valores referenciales establecidos a partir de los límites máximos AAFCO y la cantidad metálica (mg/Kg) reportada de <i>S. californicus</i> en medio natural contaminado; captura en condiciones naturales de crecimiento y control. La absorción natural del Pb, Cu y As es significativa. La absorción natural de Cd y Hg es reducida.

2	Licapa, G.	<i>Scirpus californicus</i>	Totora	hierro (Fe) - cobre (Cu)	<p>Porcentaje de eficiencia en la remoción del sistema:          hierro: 97,33% en sistema con sustrato uno; 97,66% en sistema con sustrato dos; cobre: 84,50% en sistema con sustrato uno; 90,12% en sistema con sustrato dos. <i>S. californicus</i> potenció la remoción y la estabilidad del sistema. Sistema con</p>
sustrato uno; mayor cantidad de materia orgánica.					
3	Sucari, L.	<i>Scirpus californicus</i>	Totora	arsénico (As) - cadmio (Cd) - cobre (Cu) - plomo (Pb) - zinc (Zn) - hierro (Fe)	<p>Porcentaje de eficiencia en la remoción del sistema sembrado con <i>S. californicus</i>: arsénico: 96%; cadmio: 97,31%; cobre: 92,67%; hierro: 98,02%; plomo: 94,63%; zinc: 80,99%. Crecimiento máximo de <i>S. californicus</i>: 31,6 cm. Estabilización del pH en presencia de <i>S. californicus</i>: 6,41 unidades. <i>S. californicus</i> propicia una alta eficiencia de remoción metálica en el sistema.</p>

4	Hernández, N. y Luna, J.	<i>Schoenoplectus californicus</i>	Junco	hierro (Fe)	<p>Porcentaje de remoción de hierro: 86%; 0,30 mg/L acumulados en <i>S. californicus</i>. Porcentaje de remoción de hierro, tratamiento combinado <i>T. latifolia</i> - <i>S. californicus</i> - <i>L. laevigatun</i>: 75,17%. <i>S. californicus</i> presentó una alta capacidad de fitorremediación de hierro total.</p>
5	Diaz, L. y Peralta, L.	<i>Scirpus californicus</i>	Totora	cadmio (Cd) - plomo (Pb)	<p>Porcentaje de remoción metálica con <i>S. californicus</i>: plomo: 5,924% en solución única a 20 ppm (3,47% de absorción en raíz; 2,44% en tallos), cadmio: 0,2% en solución única a 20 ppm (0,08% en raíz; 0,11% en tallo), plomo: 3,473% en solución mixta a 80 ppm, cadmio: 1,667% en solución mixta a 20 ppm. Exposición al Pb: leve coloración amarillenta. Exposición al Cd: toxicidad moderada. Alta bioacumulación de Pb. Pobre bioacumulación de Cd.</p>

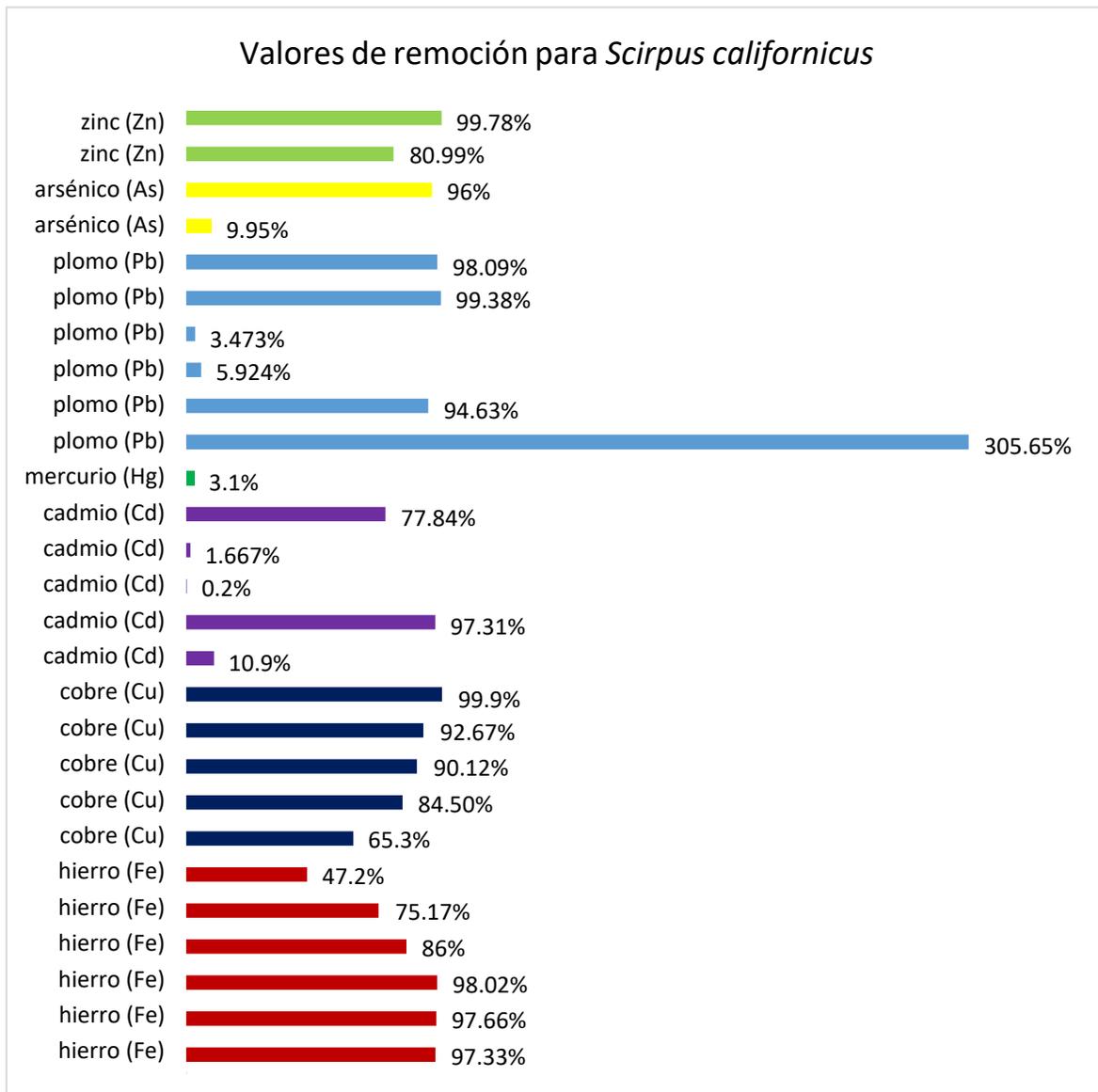
6	Fernández, L.	<i>Scirpus californicus</i>	Totora	cadmio (Cd)	<p>Porcentaje de remoción de cadmio con <i>S. californicus</i>: 77,84% de acumulación en raíces, solución a 2,0 ppm de cadmio. Concentraciones menores a 1,0 ppm, <i>S. californicus</i> incrementó su número de raíces (crecimiento).</p> <p>Concentraciones mayores a 1,5 ppm, <i>S. californicus</i> incrementó su longitud radicular (engrosamiento de raíces). Cd en altas concentraciones intoxica a <i>S. californicus</i> luego la planta se adapta a la toxicidad, modificando su estructura radicular para seguir hiperacumulando.</p>
7	Cuadrado, W., Vicuña, C. y Torres, E.	<i>Scirpus californicus</i>	Totora	hierro (Fe)	<p>Porcentaje de eficiencia en la remoción del sistema sembrado con <i>S. californicus</i>: hierro: 47,2%, valor máximo reportado al día doce de tratamiento. Absorción de hierro en <i>S. Californicus</i>: 22,74% en raíz - rizoma; 37,06% en tallo sumergido; 36,67% en tallo aéreo.</p>
8	Pulcha, J. y Valencia, M.	<i>Scirpus californicus</i>	Totora	cobre (Cu) - plomo (Pb) - zinc (Zn)	<p>Porcentaje de remoción metálica por <i>S. californicus</i>, sistemas con siembra: cobre: 99,9% al día cuatro, valor constante al día once; zinc: 99,78% al cuarto día, devolución total al día once; plomo: 99,38% al día uno, 98,09% al día siete. <i>S. californicus</i> tuvo mayor capacidad depuradora para Cu y Pb. Pb es rápidamente absorbido al comienzo, luego es devuelto por intoxicación.</p>

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura describe el total de porcentajes de remoción metálica obtenidos y/o calculados de las investigaciones consultadas respecto a la utilización de *S. californicus*.

**Figura 7**

*Porcentajes de remoción metálica reportados para Scirpus californicus*



Nota: Los metales tratados utilizando *S. californicus* fueron: cobre (Cu), cadmio (Cd), zinc (Zn), hierro (Fe), mercurio (Hg), arsénico (As) y plomo (Pb).

La figura anterior grafica lo contemplado en la tabla 9, al analizar detenidamente la figura, se puede observar que, de un total de siete metales tratados, el valor más alto reportado fue de 305,65% de remoción para el metal plomo, seguido por 99,99% para el metal cobre y 99,78% para el metal zinc. El valor más bajo registrado fue de 0,2% de remoción para el metal cadmio.

**Objetivo Específico 03: Determinar el potencial de fitorremediación de las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* en el tratamiento de efluentes con metales pesados.**

Para efectos de entendimiento, el potencial de fitorremediación puede ser definido como la afinidad específica para la absorción eficiente de ciertos metales que presenta cada macrófita en función a sus características y propiedades intrínsecas.

De esta forma, se muestran las comparaciones entre las cinco especies macrófitas respecto a su afinidad específica de fitodepuración para un metal en específico; apreciándose así las potencialidades de dichas plantas al utilizarlas en sistemas de tratamiento teniendo como fundamento la fitorremediación.

Cabe mencionar que, los valores porcentuales son las medias de absorción y remoción calculados a partir de la información recogida de las investigaciones.

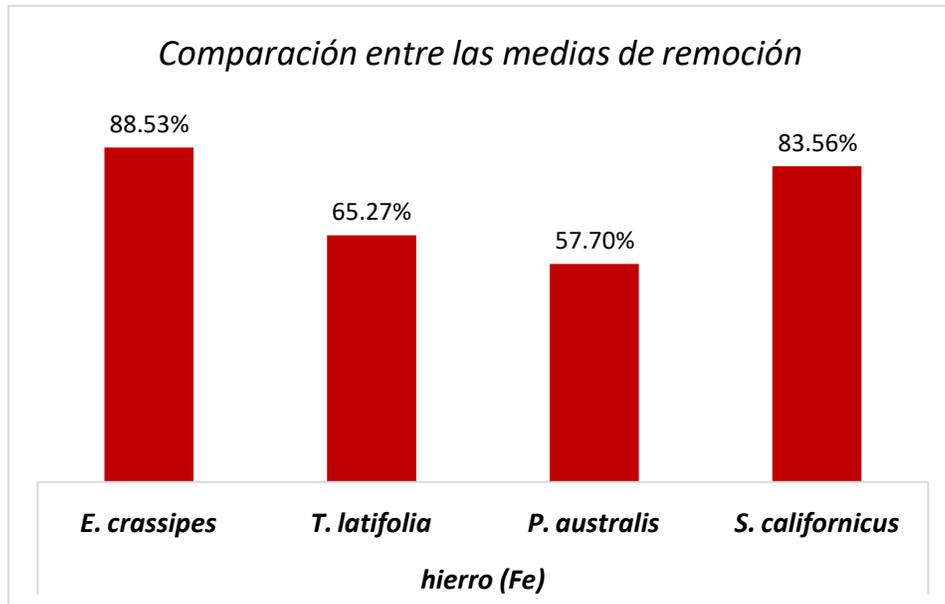
La comparativa es correspondiente a los metales: hierro (Fe), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), aluminio (Al), zinc (Zn), arsénico (As), cromo (Cr), níquel (Ni) y cadmio (Cd), por ser los más significativos.

A continuación, se muestra la figura 8 que contiene la comparativa de macrófitas para el

metal hierro.

### Figura 8

*Comparativa de absorción – remoción para el metal hierro*

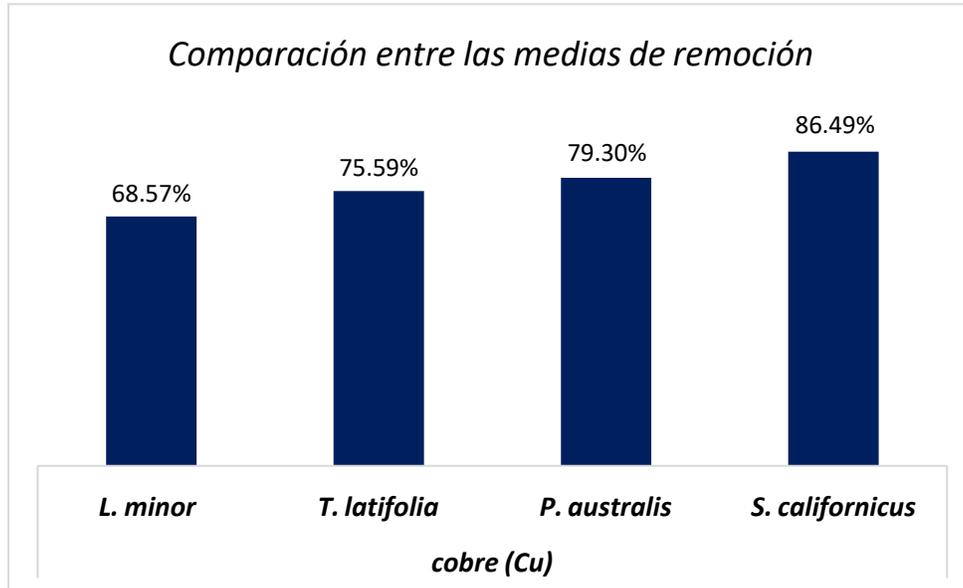


Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *E. crassipes*, *S. californicus* y *T. latifolia* poseen un considerable potencial de fitorremediación para el metal hierro.

Siguiendo con el análisis para el metal cobre, se muestra la siguiente figura:

**Figura**

*Comparativa de absorción – remoción para el metal cobre*

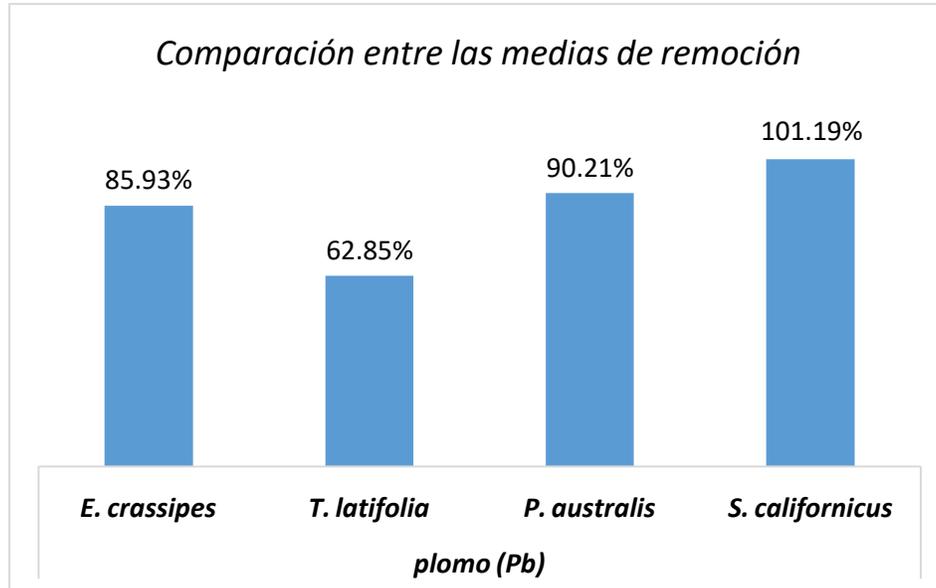


Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *S. californicus*, *P. australis* y *T. latifolia* poseen un considerable potencial de fitorremediación para el metal cobre.

Respecto al análisis para el metal plomo, se muestra la siguiente figura:

**Figura 66**

*Comparativa de absorción – remoción para el metal plomo*

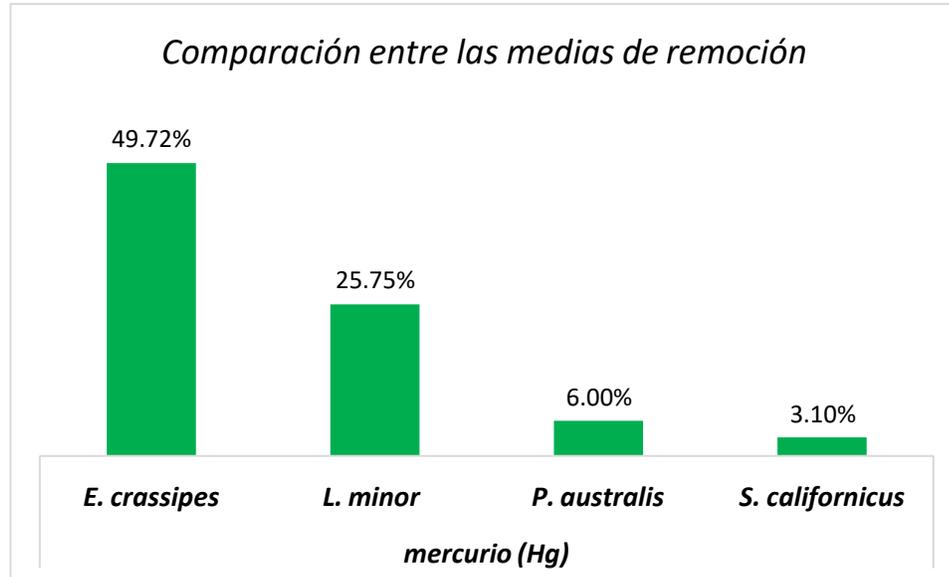


Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *S. californicus*, *P. australis* y *E. crassipes* poseen un considerable potencial de fitorremediación para el metal plomo.

Respecto al análisis para el metal mercurio, se muestra la siguiente figura:

**Figura 67**

*Comparativa de absorción – remoción para el metal mercurio*

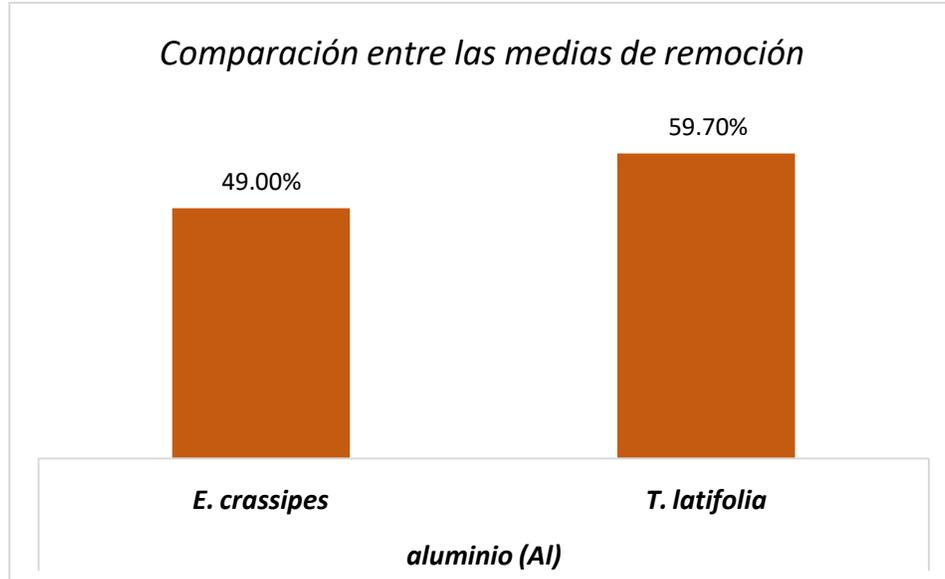


Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *E. crassipes*, *L. minor* y *P. australis* poseen un considerable potencial de fitorremediación para el metal mercurio.

Respecto al análisis para el metal aluminio, se muestra la siguiente figura:

**Figura 68**

*Comparativa de absorción – remoción para el metal aluminio*

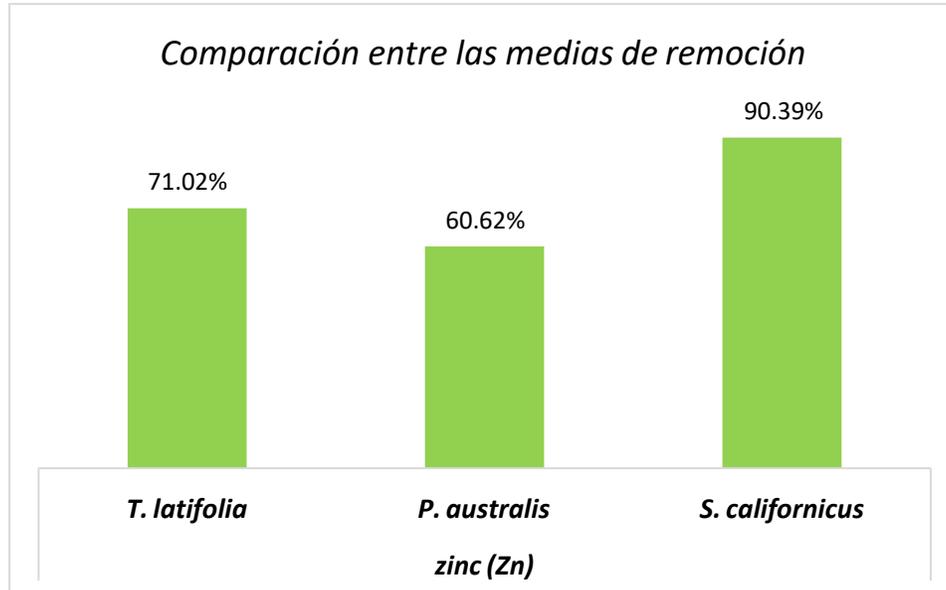


Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *T. latifolia* y *E. crassipes* poseen un considerable potencial de fitorremediación para el metal aluminio.

Respecto al análisis para el metal zinc, se muestra la siguiente figura:

**Figura 69**

*Comparativa de absorción – remoción para el metal zinc*

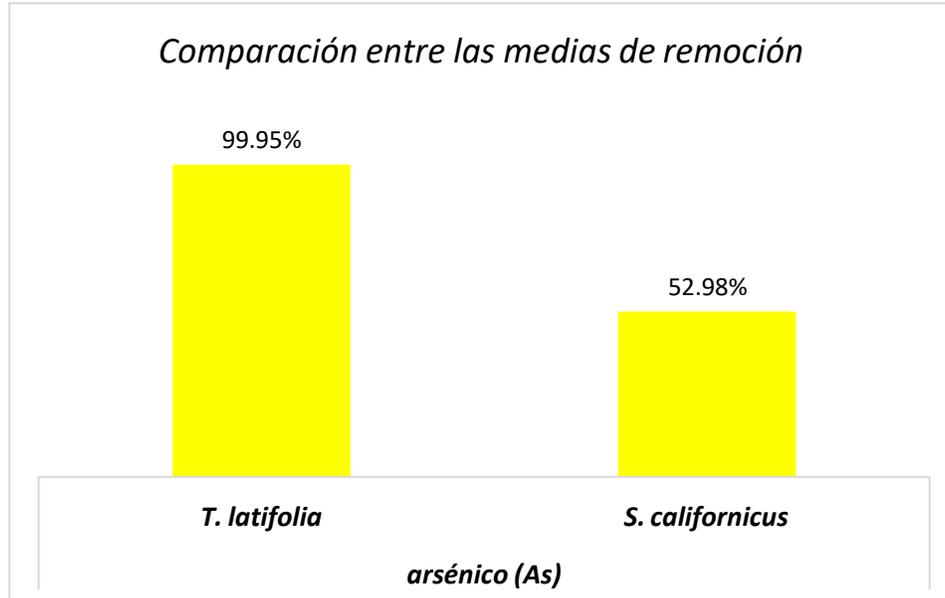


Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *S. californicus* y *T. latifolia* poseen un considerable potencial de fitorremediación para el metal zinc.

Respecto al análisis para el metal arsénico, se muestra la siguiente figura:

**Figura 70**

*Comparativa de absorción – remoción para el arsénico*

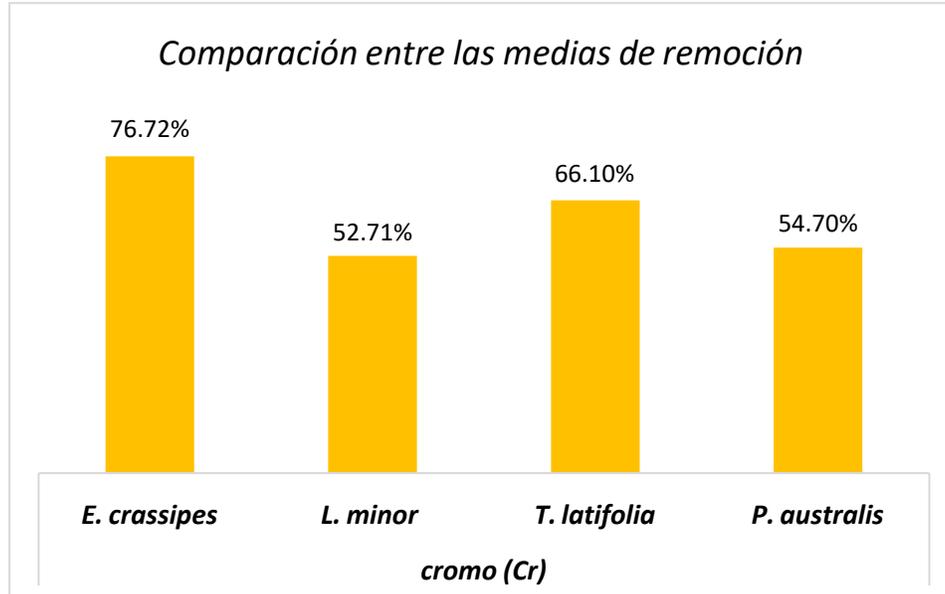


Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *T. latifolia* y *S. californicus* poseen un considerable potencial de fitorremediación para el metal arsénico.

Respecto al análisis para el metal cromo, se muestra la siguiente figura:

**Figura 71**

*Comparativa de absorción – remoción para el cromo*

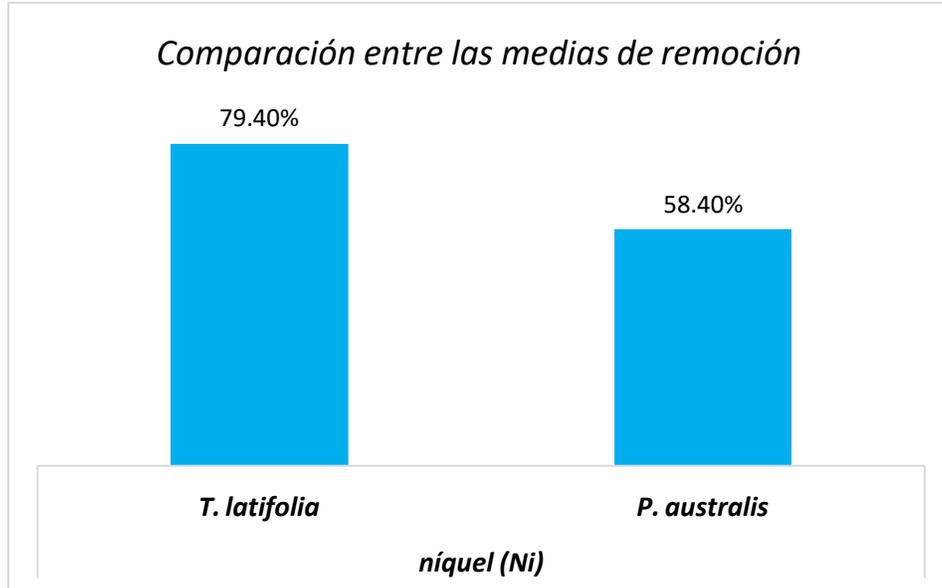


Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *E. crassipes*, *T. latifolia* y *P. australis* poseen un considerable potencial de fitorremediación para el metal cromo.

Respecto al análisis para el metal níquel, se muestra la siguiente figura:

**Figura 72**

*Comparativa de absorción – remoción para el níquel*

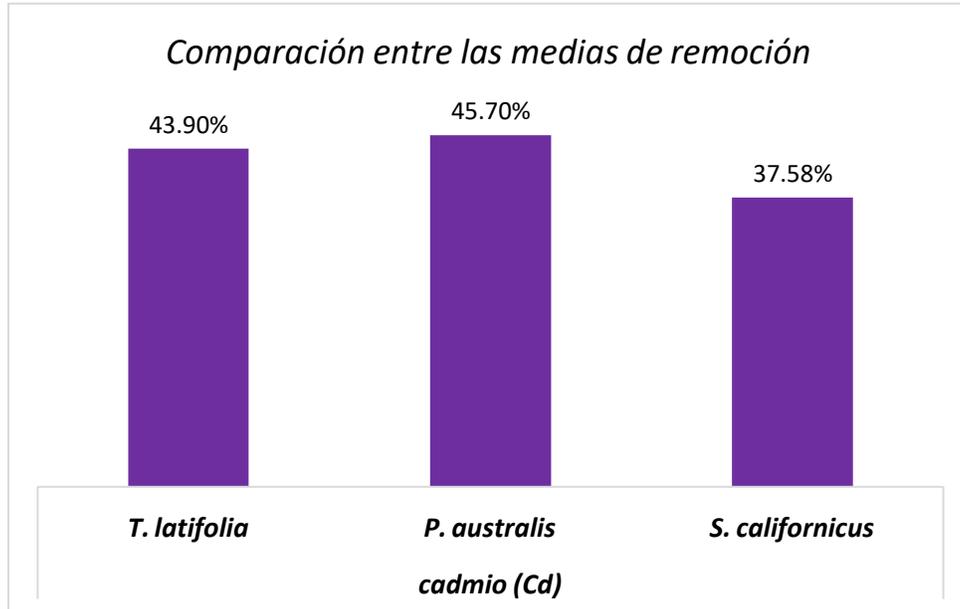


Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *T. latifolia* posee un considerable potencial de fitorremediación para el metal níquel.

Respecto al análisis para el metal cadmio, se muestra la siguiente figura:

**Figura 17**

*Comparativa de absorción – remoción para el cadmio*



Al observar la figura y con base en los porcentajes de remoción – absorción extraídos de las investigaciones; se puede deducir que, *P. australis* y *T. latifolia* poseen un considerable potencial de fitorremediación para el metal cadmio.

**Objetivo General: Analizar la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* en el tratamiento de efluentes con metales pesados.**

Tomando en consideración los alcances desarrollados hasta este punto para dar cumplimiento a los objetivos específicos planteados inicialmente; se presentan las siguientes tablas las cuales, agrupan la información procesada respecto al análisis de capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites*

*australis* y *Scirpus californicus*, en su utilización como herramientas biológicas de remediación

para tratar efluentes con metales pesados; identificando de esta forma, las tendencias de afinidad natural específica para cada metal, así como los valores de remoción – absorción máximos alcanzados.

**Tabla 10**

*Resultados del análisis de capacidad de fitorremediación específica*

<b>Especie Macrófita</b>	<b>Afinidad específica de fitorremediación</b>
<i>Eichhornia crassipes</i>	Fe, Pb, Hg, Al, Cr
<i>Lemna minor</i>	Cu, Hg, Cr
<i>Typha latifolia</i>	Fe, Cu, Pb, Al, Zn, As, Cr, Ni, Cd
<i>Phragmites australis</i>	Fe, Cu, Pb, Hg, Zn, Cr, Ni, Cd
<i>Scirpus californicus</i>	Fe, Cu, Pb, Hg, Zn, As, Cd

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior difiere con lo establecido por Jaramillo y Flores (2012) quienes indicaron de forma teórica la afinidad metálica para las cinco macrófitas estudiadas; es así que, *E. crassipes*, según el análisis de datos experimentales de las veinte investigaciones, no posee capacidad significativa de fitorremediación para los metales cadmio, cobre y zinc. Por otro lado, *L. minor*, siguiendo con lo establecido, no posee capacidad significativa de fitorremediación para los metales cadmio y plomo. *P. australis* no posee capacidad significativa de fitorremediación para el metal manganeso; además, se menciona al magnesio (Mg), el cual no se estudió en este trabajo. *S. californicus* no posee capacidad significativa de fitorremediación para el metal manganeso.

igualmente.

La siguiente tabla contiene los niveles máximos de remoción o absorción obtenidos, sirviendo como base a futuras investigaciones al momento de tomar decisiones en el uso de las macrófitas para el tratamiento de un metal o conjunto en específico.

**Tabla 11**

*Resultados del análisis de capacidad de remoción – absorción máxima*

<b>Especie Macrófita</b>	<b>Remoción - Absorción máxima</b>									
<i>Eichhornia crassipes</i>	Fe: 88,53%	Pb: 85,93%	Hg: 49,72%	Al: 49,00%	Cr: 76,72%					
<i>Lemna minor</i>	Cu: 68,57%	Hg: 25,75%	Cr: 52,71%							
<i>Typha latifolia</i>	Fe: 65,27%	Cu: 75,59%	Pb: 62,85%	Al: 59,70%	Zn: 71,02%	As: 99,95%	Cr: 66,10%	Ni: 79,40%	Cd: 43,90%	
<i>Phragmites australis</i>	Fe: 57,70%	Cu: 79,30%	Pb: 90,21%	Hg: 6,00%	Zn: 60,62%	Cr: 54,70%	Ni: 58,40%	Cd: 45,70%		
<i>Scirpus californicus</i>	Fe: 83,56%	Cu: 86,49%	Pb: 101,19%	Hg: 3,10%	Zn: 90,39%	As: 52,98%	Cd: 37,58%			

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, y a modo de sugerencia, situándonos en la cobertura geográfica del Perú y sus diversas características climáticas y topográficas; tomando como base las condiciones en las que se desarrollan las macrófitas estudiadas, podemos establecer una distribución para la aplicación de estas en determinadas regiones, es así que:

- *Eichhornia crassipes*, por ejemplo, se desarrolla bajo temperaturas elevadas pero su temperatura óptima para su pleno desarrollo oscila entre 25 y 27° C; soportando medios tanto ácidos como alcalinos. La región en la que principalmente prolifera es en Iquitos,

debido a que esta macrófita es originaria de la cuenca del Amazonas. En ese sentido,

*Eichhornia crassipes* puede aplicarse en regiones como: Caballococha, Santa Rosa del Yáviri e Iquitos, entre otras regiones que compartan condiciones similares a estos.

- *Lemna minor*, es una especie que se desarrolla en temperaturas usualmente bajas, con un crecimiento óptimo aproximadamente entre 15 a 18° C; requiere de cuerpos de agua ricos en nutrientes, principalmente nitrógeno y fosfatos. Debido a las condiciones en las que crece, su aplicación se extendería por departamentos con climas fríos como Puno, Moquegua y Cusco.
- *Typha latifolia*, esta macrófita tiene la capacidad de desarrollarse en la mayoría de los climas y condiciones ambientales, desde climas tropicales, subtropicales, hasta en climas templados, húmedos y secos. No obstante, esta especie usualmente se encuentra en

elevaciones de 2125 m.s.n.m., bajo estos criterios, inducimos que *Typha latifolia* se puede aplicar desde departamentos como Ica, Tumbes; así como en Cajamarca y Moquegua.

- *Phragmites australis*, la condición en que se desarrolla esta especie es variada, la podemos encontrar en humedales lagunas y bordes de ríos; a una altitud desde aproximadamente 1000 m.s.n.m., normalmente prospera en climas templados y tropicales, pero no en lugares excesivamente fríos. En base a las características de la planta, esta especie se puede aplicar en departamentos como La Libertad, Ica, Lima, Tacna y Cajamarca. Cabe resaltar que, es una macrófita que no puede soportar heladas.
- *Schoenoplectus californicus*, es una especie que necesita de temperaturas altas desde 16 a 27°C; progresando incluso en soleadas. En el Perú, podemos ver su crecimiento e impacto sobre todo en nuestras costas, en lugares como La Libertad, Piura, Lambayeque, Tumbes; hasta incluso Lima. Por lo que, aplicarlo en estas regiones sería totalmente viable.

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1. Discusión

En esta sección se desarrolla el análisis exhaustivo de los resultados recopilados donde el denominador común, fue un proceso de fitorremediación de metales pesados a través de diversos tratamientos empleando humedales artificiales, biofiltros, entre otros. El análisis permitirá evaluar las potencialidades fitodepuradoras de las cinco especies macrófitas en cuestión.

Para un correcto abordaje, se procederá a analizar los resultados desglosando cada especie macrófita, con la finalidad de determinar tendencias de afinidad metálica y capacidad de captura específica.

#### *Eichhornia crassipes*

Las investigaciones seleccionadas para *E. crassipes*, trataron los siguientes metales: mercurio, plomo, hierro, aluminio y manganeso; valores contemplados en la tabla 5 y figura 3.

Es así que, para el metal mercurio, presente en dos investigaciones; Jaramillo y Flores (2012), a través de un humedal artificial de flujo libre o superficial (HFS), implantado en tratamiento único y combinado con *E. crassipes* y *L. minor* y operado durante quince días; obtuvieron una remoción del 28% de mercurio, únicamente con *E. crassipes*. Frente a la exposición, algunos ejemplares presentaron necrosis debido a la toxicidad; sin embargo, *E. crassipes* demostró resistencia y alta absorción de mercurio. Este metal debido a sus características, tiende a sedimentarse por lo cual, los autores recomiendan recircular el flujo que alimenta a la planta. En adición, Paredes y Ñique (2015) obtuvieron un valor de absorción máxima

de mercurio en raíces de 94,67% en medio básico y a baja concentración del metal. El suministro de nutrientes permitió un crecimiento radicular de hasta 7,6 cm de longitud; es importante mencionar que, en las raíces ocurre la adherencia iónica y se alojan microorganismos que potencian la depuración metálica. *E. crassipes* fue capaz de soportar y extraer el mercurio sin que una alta carga de nutrientes afecte el proceso por competencia de sitios de adsorción y limitación en la biodisponibilidad por formación de complejos competidores. En lo que respecta al desenvolvimiento de la planta, los autores nos ilustran que, a medida que *E. crassipes* adsorbe el tóxico, tiende a neutralizar el pH de su medio acuoso (aproximadamente 7,2 unidades); sin embargo, una mayor exposición al mercurio afecta el equilibrio de neutralización (capacidad buffer), ralentizándose y/o estancándose el amortiguamiento del pH. Un medio acuoso básico, cercano a nueve unidades, propicia una mayor disociación y adsorción de iones de mercurio. En contraparte, un medio acuoso ácido, menor a cuatro unidades, produce una repulsión electrostática reduciendo la cantidad de sitios activos disponibles para mediar la adsorción de iones de mercurio. Por tanto, se resalta la importancia de regular el pH del efluente a tratar y la concentración metálica inicial para obtener los mejores resultados en la remoción metálica con *E. crassipes*. Cabe mencionar que, dicho proceso consta de dos etapas: biosorción o adsorción rápida, donde ocurre adherencia y acumulación en la superficie, seguido por un transporte lento e irreversible hacia el interior de la célula denominado bioacumulación, mediado por difusión de iones a través de la membrana celular o mediado por proteínas transportadoras activas hacia el interior de la célula. *E. crassipes* removió de manera cuantitativa y heterogénea el mercurio durante intervalos de tiempo iguales; sin embargo, el fenómeno de saturación en la adsorción del metal (pico de adsorción),

produce la desorción o devolución paulatina del metal a través de las raíces cuando se saturan los sitios de adsorción; un mayor tiempo de contacto ocasiona una menor rapidez en la remoción metálica y por tanto en la bioacumulación.

El metal plomo fue abordado por Atehortua y Gartner (2013), quienes procesaron tallos de *E. crassipes* para producir biomasa seca (80 °C durante 2 horas) y biomasa ultra seca (200 °C durante 6 horas), para tratar una solución artificial de plomo y un lixiviado de botadero. Los resultados indicaron que, la biomasa seca de *E. crassipes* permitió remover un 86,5% del plomo artificial hasta su pico de adsorción a los 15 minutos. Por otro lado, la biomasa ultra seca de *E. crassipes* removió un 76,16% del plomo de la misma solución artificial. En lo que respecta a la remoción de plomo del lixiviado, la biomasa seca de *E. crassipes* permitió remover un 95,13% de plomo. Se observa que, la mayor remoción de plomo, se dio con la biomasa seca, esto debido a que, todavía conserva gran parte de sus moléculas de celulosa, hemilcelulosa, lignina y el agua enlazada que poseen grupos hidroxilos que forman puentes de hidrógeno con los metales, propiciando reacciones de complejación con aminoácidos que permiten ligarlos; proceso favorecido por la estructura porosa de material que amplía la superficie de adsorción metálica. La biomasa ultra seca perdió agua enlazada y volátiles que la vuelven más hidrofóbica y menos adsorbente.

Para el metal hierro se obtuvieron óptimos resultados utilizando *E. crassipes* en humedales artificiales; es así que, Sekarjannah, Wardoyo y Raith (2019), lograron una absorción en raíces del 96,06% de hierro en su sistema de tratamiento donde, una mayor cantidad de materia orgánica (estiércol de vaca compostado) y específicamente la *E. crassipes*, potenciaron la remoción total

del hierro a los 33 días de tratamiento. Para el tratamiento de aguas residuales de mina, Orillo y Quiroz (2020), obtuvieron un 81% de remoción de hierro donde, la presencia de la planta, potenció la remoción del metal luego de una fase de adaptación al medio estresante. En ambos casos, *E. crassipes* brindó estabilidad y continuidad en la remoción total de hierro presente en las aguas contaminadas tratadas en los humedales artificiales.

El metal aluminio fue tratado por Orillo y Quiroz (2020), quienes obtuvieron un 49% de remoción de aluminio, en su humedal artificial implantado con *E. crassipes*, observándose un valor mucho menor que el conseguido para el hierro.

Para el metal manganeso, Sekarjannah, Wardoyo y Raith (2019), obtuvieron un valor de absorción en raíces de 96,22%; siendo este mayor que el obtenido para el hierro y donde también *E. crassipes* coadyuvó considerablemente en la remoción de aluminio en el humedal artificial.

Finalmente, para el metal cromo, los autores Atehortua y Gartner (2013) obtuvieron una remoción de 76,72% de cromo del lixiviado tratado, utilizando biomasa seca de *E. crassipes*; demostrando como dicho material de constitución lignocelulósica y por consiguiente altamente hidrofílica, es muy efectiva como adsorbente de cromo.

Por tanto, en el ejercicio de establecer tendencias de afinidad de remoción específica y en base a los resultados podemos establecer que, *E. crassipes* es una especie macrófita muy efectiva en el tratamiento de los metales: manganeso, hierro, plomo y cromo; seguida en menor cantidad para los metales: mercurio y aluminio.

*Lemna minor*

Las investigaciones seleccionadas para *L. minor*, trataron los siguientes metales: mercurio, cobre y cromo; valores contemplados en la tabla 6 y figura 4.

En lo que respecta al metal mercurio, nuevamente Jaramillo y Flores (2012), a través de su humedal artificial de flujo superficial, implantado en tratamiento único y combinado con *E. crassipes* y *L. minor* y operado durante quince días; obtuvieron una remoción del 25% de mercurio únicamente con *L. minor*. Frente a la exposición, algunos ejemplares presentaron clorosis debido a la toxicidad. La absorción de mercurio fue menor respecto a la especie anterior, sin embargo, debido a las características de pequeño tamaño de *E. crassipes* se presenta una reproducción más rápida lo cual, en condiciones favorables de control, puede incrementar la remoción metálica.

*L. minor* posee una capacidad considerable para capturar el ión cobre; así lo demostraron Ávila, et al. (2018), quienes luego de recolectar *L. minor* de un entorno natural, estimularla con nutrientes y adaptarla en un medio acuoso durante 5 días; obtuvieron una remoción máxima de 68,57% de cobre al día 28 de tratamiento, punto en el cual, se produjo el estancamiento en la remoción del metal por parte del humedal artificial, posiblemente por el punto de saturación en la adsorción.

Como se ha mencionado anteriormente, *L. minor* experimenta un crecimiento exponencial; Carreño (2014) lo establece entre el primer y el tercer día; dicho autor, a través de su investigación y luego de estimular con nutrientes y adaptar la planta en una solución de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ); obtuvo una remoción de 52,71% al día seis de contacto, en presencia de 60 mg/L de ácido húmico y una biomasa de 45 plantas. *L. minor* removió de manera más eficiente a altas

concentraciones de materia orgánica (ácido húmico) y baja densidad poblacional, donde se favorece una mejor dispersión de la solución. La materia orgánica estimula el crecimiento de *L. minor* y la complejación de iones metálicos (quelación) a través de los sitios activos para la biosorción. La concentración inicial del cromo en la solución y del ácido húmico influyen directamente en la remoción final del metal. Después de la máxima remoción, se inicia un proceso de liberación del cromo retenido y este es devuelto al efluente, esto explicado por el punto de saturación en la biosorción.

Frente al cromo, concentraciones menores a 2,0 mg/L de Cr<sup>+6</sup> no producen un efecto tóxico severo e inhibitorio en las plantas, presentándose una adaptación rápida y crecimiento normal.

Por tanto, en el ejercicio de establecer tendencias de afinidad de remoción específica y en base a los resultados podemos establecer que, *L. minor* es una especie macrófita muy efectiva en el tratamiento de los metales: cobre, cromo y mercurio; siempre y cuando se manejen adecuadamente las variables inmersas y detalladas anteriormente.

### *Typha latifolia*

Las investigaciones seleccionadas para *T. latifolia*, trataron los siguientes metales: cobre, cromo, arsénico, aluminio, cadmio, cobalto, níquel, zinc, hierro y plomo; valores contemplados en la tabla 7 y figura 5.

Para el metal cobre y la capacidad de *T. latifolia* para removerlo, tenemos dos tipos diferentes de resultados, por un lado, López (2018), obtuvo una remoción de cobre de 99,78% en un humedal artificial que hacía parte de un tratamiento mixto coadyuvante en una planta de

tratamiento de aguas ácidas de mina. La presencia de la planta específicamente, potenció la remoción del cobre en el sistema. Por otro lado, Kumari y Tripathi (2015), obtuvieron una remoción de tipo absorción en planta de 51,4% para el cobre a través de biofiltros tipo batch, a su vez, al evaluar un cultivo mixto implantado con *T. latifolia* y la macrófita *P. australis*, se evidenció un alza en la remoción de cobre y demás metales en general; esto debido a un incremento en la rizosfera propiciado por ambas especies, sirviendo de medio de soporte para el crecimiento de microorganismos, que favorecen la inmovilización de metales y la absorción por las plantas; sin embargo, *T. latifolia* únicamente otorgó los valores de remoción más bajos en este caso para el cobre.

Respecto al cromo, los autores antes mencionados, obtuvieron una absorción en planta de 45,6% en su cultivo únicamente con *T. latifolia*. Cabe mencionar que, la inmovilización de iones metálicos en la rizosfera, la absorción a través de raíces y la precipitación (oxidación por oxígeno disuelto y atmosférico), permitieron incrementar el pH de ácido – neutro a alcalino, evidenciándose la capacidad buffer de la macrófita. Nuevamente *T. latifolia*, únicamente otorgó los valores de remoción más bajos para cromo y donde la acumulación de metal en la planta, depende directamente de la concentración inicial del efluente y la especie vegetal en específico. A su vez, Singh y Chakraborty (2020), valiéndose de un humedal de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de un drenaje ácido de mina sintético durante seis meses; obtuvieron una remoción de cromo de 99,7%. Siendo este un valor más elevado que el anterior, no obstante, dicha remoción fue estimada de manera general en el humedal donde *T. latifolia* medió procesos de biosorción, bioacumulación y translocación de los metales. En lo concerniente a la estabilización del equilibrio

químico, el humedal subió el pH de 2,1 a 6,4 unidades, posiblemente por la acción del sustrato rico en materia orgánica y específicamente la capacidad buffer de la planta.

El metaloide arsénico fue reportado por López (2018), quien obtuvo una remoción en sistema de 99,95%; valor bastante alto de depuración a los 30 días de tratamiento.

El aluminio fue reportado por Singh y Chakraborty (2020), con un valor de remoción en sistema de 59,7%; siendo este el valor más bajo en su investigación. Posiblemente *T. latifolia*, tenga afinidad media para la captura del ión aluminio. Otro metal que fue analizado por ambos autores fue el manganeso, para el cual, no se presentaron resultados, probablemente se sedimentó y absorbió en el lecho del humedal sin que *T. latifolia* pueda absorberlo.

Para el cadmio, el cual aparenta ser un metal muy nocivo para las macrófitas, Kumari y Tripathi (2015), obtuvieron una absorción en planta de 39,7% de cadmio; valor más bajo obtenido en su investigación. Además, se observó que, de manera general a medida que aumentó el tiempo de contacto, aumentó la remoción metálica hasta el punto de saturación a los catorce días.

Respecto al cobalto, Singh y Chakraborty (2020), alcanzaron una remoción en humedal de 93,7% de cobalto; valor más elevado que el de metales como el hierro.

El níquel también fue reportado por ambos investigadores, obteniendo un valor de 97,8%; siendo el segundo más alto después del cromo.

El zinc fue trabajado en más de una investigación, es así que, Singh y Chakraborty (2020), reportaron una absorción en planta de 52,4%; estableciendo que *T. latifolia* a pesar de presentar un bajo rendimiento en la remoción metálica frente a otras macrófitas, removió eficazmente el

zinc. López (2018), obtuvo una remoción en humedal de 99,86% para el zinc, valor bastante elevado que evidencia una alta afinidad de *T. latifolia* para capturarlo.

Respecto al hierro, Kumari & Tripathi, (2015) reportaron una absorción en planta de 52,6% de hierro, siendo este, el valor de absorción más alto reportado para dicha macrófita; en adición, Hernández y Luna (2016), a través de un humedal artificial implantado con *T. latifolia* y *S. californicus*, recolectadas de un humedal natural para el tratamiento de agua residual sintética durante dos meses; obtuvieron una absorción en planta de 13% para hierro; apreciándose que, *T. latifolia* presenta una muy baja fitorremediación de hierro. En lo concerniente a la utilización de *T. latifolia* en humedales artificiales; Singh y Chakraborty (2020), reportaron una remoción alta de hierro en sistema de 91,6%. Cabe mencionar que, respecto al hierro, en un humedal ocurren procesos de adsorción, absorción en plantas y precipitación por oxidación de ion ferroso a férrico, por acción del oxígeno atmosférico. La variabilidad en los resultados para la remoción de hierro en humedal y la absorción en planta permiten establecer a *T. latifolia* como una macrófita con afinidad media – baja para la captura del ión hierro.

Finalmente, para el metal plomo, se observa una absorción en planta de 40% según Kumari y Tripathi (2015), donde *T. latifolia*, a pesar de otorgar los valores de remoción más bajos; removió eficientemente el plomo, estableciéndose como un valor medio de remoción. Por otro lado, López (2018), en su humedal, reportó una remoción en sistema de 94,96% de plomo. Se puede dilucidar entonces que *T. latifolia* posee una afinidad media – alta para la captura del ión plomo.

Por tanto, en el ejercicio de establecer tendencias de afinidad de remoción específica y en base a los resultados podemos establecer que, *T. latifolia* es una especie macrófita muy efectiva en el tratamiento de los metales: arsénico, cobalto, níquel, cobre, zinc, cromo, hierro y plomo; seguida en menor cantidad para los metales: cadmio y aluminio.

### *Phragmites australis*

Las investigaciones seleccionadas para *P. australis*, trataron los siguientes metales: cadmio, cromo, níquel, hierro, cobre, plomo, zinc y mercurio; valores contemplados en la tabla 8 y figura 6.

En lo que respecta al mercurio, Amabilis, et al. (2016), reportaron una remoción únicamente con planta de 6% del total de mercurio removido a través de un humedal artificial, implantado con *P. australis* e inoculado con un consorcio microbiano metalotolerante, adicionalmente al cultivo microbiano original; se apreció que *P. australis*, en presencia de una rizosfera metalotolerante, acumuló un 59% del mercurio en sus hojas, un 32% en tallos, un 4% en raíces y un 5% en sus rizomas y con su rizosfera original, acumuló un 48% en hojas, 41% en tallo, 6% en raíces y 5% en rizoma; cabe mencionar que, el mercurio fue fitovolatilizado hacia la atmósfera a través del fenómeno conocido como translocación, mediado por la planta. De todo esto se puede observar como *P. australis* procesa el mercurio a través del mecanismo de la fitovolatilización y como la presencia de cepas metalotolerantes, asociadas a la rizosfera, favorecen la adsorción, bioacumulación y posterior translocación hacia las hojas; incrementando la volatilización del mercurio.

Para el metal zinc, Galván (2016), obtuvo diferentes valores de remoción en función al diseño del humedal artificial donde se implantó *P. australis*; sometido a condiciones diferentes de irrigación y aireación, a través de un diseño de flujo subsuperficial horizontal; se alcanzó una absorción en planta de 52,41% de zinc donde un 72% se acumuló en las raíces, un 17% en tallos y un 11% en hojas; en un diseño de flujo superficial o libre se alcanzó una absorción en planta de 29,79% de zinc donde un 70% se acumuló en las raíces, un 22% en tallos y un 8% en hojas finalmente, en un diseño de flujo subsuperficial vertical, se logró una absorción en planta de 67,96% de zinc donde un 73% se acumuló en raíces, un 18% en tallos y un 9% en hojas. Respecto a la relación entre *P. australis* y el diseño de implantación se aprecia que, la mayor absorción se da cuando únicamente las raíces están en contacto con el efluente cargado del metal y además, la planta está sometida a una mayor aireación. *P. australis* concentra la mayor cantidad del zinc en sus raíces evidenciándose en una baja translocación hacia las partes aéreas; la presencia de la planta en el humedal propicia más la remoción de zinc que otros medios como algas y sustratos inorgánicos; sin embargo, también se observa una tendencia a la desorción del zinc después de un prolongado tiempo de contacto; la experiencia de Pulcha y Valencia (2019) al utilizar *P. australis* en un humedal artificial, previa adaptación a una solución de zinc, ilustra cómo después de alcanzar el pico de adsorción de zinc al cuarto día de tratamiento con una remoción de 99,78%; la planta libera paulatinamente el metal hasta el día once donde la concentración vuelve a ser la inicial, asumiéndose que, la asimilación del zinc por parte de *P. australis* es un mecanismo competitivo – consecutivo de etapas de reacción reversibles, no obstante *P. australis* posee una alta capacidad para depurar el zinc debido a su biotipo resistente.

Se puede dilucidar que *P. australis* posee una afinidad alta para la captura del ión zinc, sin embargo, una vez alcanzada la saturación en la absorción, inicia un proceso de desorción del metal.

En lo concerniente al plomo, los dos autores antes mencionados, también compartieron experiencias de remoción, por un lado, Galván (2016) con un diseño de flujo subsuperficial horizontal, logró una absorción en planta de 79,75% de plomo donde un 65% se acumuló en las raíces, un 5% en tallos y un 30% en hojas; en un diseño de flujo libre, logró una absorción en planta de 86,56% de plomo donde un 91% se acumuló en las raíces, un 7% en tallos y un 2% en hojas; finalmente, en un diseño de flujo subsuperficial vertical, logró una absorción en planta de 86,67% de plomo donde un 80% se acumuló en raíces, un 9% en tallos y un 11% en hojas; de estamanagera, se aprecia nuevamente como la mayor absorción de plomo ocurre en las raíces de *P. australis* además de en presencia de una mayor aireación y la priorización en el contacto de las raíces, amplifica la absorción de un metal. Respecto a la capacidad de *P. australis* de retener el plomo, Pulcha y Valencia (2019), dejan en evidencia como la mayor absorción de planta se dio al primer día con un valor de 99,41%, seguido por una baja al séptimo día con un 98,68% de absorción; esta tendencia de desorción o liberación del plomo es explicado como una respuesta derecuperación a la toxicidad del plomo. Por tanto, *P. australis* es capaz de absorber efectivamente el plomo al día uno de tratamiento, pero su alta toxicidad, imposibilita su retención en el tiempo. En adición, Kumari y Tripathi (2015), obtuvieron una absorción en planta de 45,7% para plomo, el cual se puede fijar como un valor medio. Se puede dilucidar que *P. australis* posee una afinidadmedia - alta para la captura del ión plomo, sin embargo, una vez alcanzada la saturación en la

absorción en los días iniciales del contacto, inicia un proceso de desorción del metal por intoxicación.

Abordando el metal cobre, Pulcha y Valencia (2019) obtuvieron una remoción de 99,6% al sexto día de tratamiento; un nuevo análisis arrojó un 99,7% al día once, posiblemente alcanzado el pico de adsorción; se evidencia que el cobre no resulta en un metal altamente dañino para *P. australis*, el cual, no tiene necesidad de liberarlo por intoxicación. En contraposición a la alta remoción, Kumari y Tripathi (2015), reportaron en su sistema de tratamiento un 57% de remoción mediado por *P. australis*; de esta forma, se puede establecer que *P. australis* posee una afinidad media – alta para la absorción del cobre sin que este le sea altamente dañino y por respuesta de recuperación sea liberado al medio nuevamente.

Para fines de abreviación y al no presentarse más resultados para contrastar; los metales hierro, níquel, cromo y cadmio se presentan en valores de remoción medios, obtenidos a través de la implantación de *P. australis* en un biofiltro; es así que, Kumari y Tripathi (2015), reportaron absorciones en planta de 56,1% para hierro, 55,8% para níquel, 51,2% para cromo y 43,3% para cadmio. *P. australis* demuestra capacidad para capturar cobre, cadmio, cromo, níquel y hierro; en ese orden de afinidad media respectivamente.

Por tanto, en el ejercicio de establecer tendencias de afinidad de remoción específica y en base a los resultados podemos establecer que, *P. australis* es una especie macrófita muy efectiva en el tratamiento de los metales: plomo, cobre, zinc, níquel, hierro y cromo; seguida en menor cantidad para los metales: cadmio y mercurio.

### *Scirpus californicus*

Las investigaciones seleccionadas para *S. californicus*, trataron los siguientes metales: cobre, cadmio, zinc, hierro, mercurio, arsénico y plomo; valores contemplados en la tabla 9 y figura 7.

Para el metal cobre se recopilaron diversos resultados que permitieron un análisis más detallado, de esta forma, se muestran resultados de absorción en planta y en sistema; respecto a la absorción netamente en sistema, se reporta una remoción máxima de 99,9% de cobre al cuarto día de tratamiento y donde al evaluar cambios en la remoción al onceavo día, esta seguía siendo constante; Pulcha y Valencia (2019) señalan que *S. californicus* en su sistema de tratamiento, proporcione estabilidad y magnificación en la remoción metálica a través de mecanismos de adsorción, fitoextracción y volatilización; a su vez, en sus rizosferas albergaron microorganismos tolerantes que bioacumulan en sus células y fijan los metales pesados a las raíces. Otro valor elevado de remoción de cobre fue reportado por Sucari (2022), quien obtuvo una remoción de 92,67% en su humedal artificial operado durante 5 meses; *S. californicus* creció hasta 31,6 cm de altura observándose retrasos en su crecimiento durante los meses más fríos. Ambos autores concuerdan que, el fundamento del humedal, es la ocurrencia de procesos de sedimentación, precipitación química, adsorción, absorción e interacción biológica para la captación metálica. Además, *S. californicus*, como vegetación, proporciona una superficie para la formación de películas bacterianas que facilitan la filtración y adsorción de metales totales y disueltos transformándolos en sustancias inocuas e insolubles. La absorción metálica en un humedal artificial implantado con *S. californicus*, está sujeta a factores externos y no únicamente a la

fitorremediación de la planta; un sustrato con alta carga de materia orgánica puede hacer la diferencia; es así que (Licapa, 2015), obtuvo remociones en sistema de 90,12% y 84,50% donde un sustrato enriquecido con materia orgánica, permitió una remoción general más alta. Los mecanismos de fitorremediación de *S. californicus*, implantada en el humedal, favorecieron la depuración del drenaje ácido de mina; brindando estabilidad e incrementado la remoción que la caliza, la microbiota y el sustrato realizan. Cuando *S. californicus* crece de manera natural en ambientes afectados por contaminación metálica, como es el caso de las actividades mineras, es capaz de adaptarse al medio y absorber metales. Llana (2019) estableció un potencial de bioacumulación de cobre para la planta de 65,3%; observándose una afinidad natural media – alta por el cobre luego de analizar *S. californicus*, presente en un lago con contaminación minera.

En lo concerniente al metal cadmio, el autor citado anteriormente, estableció un potencial de bioacumulación para cadmio de 10,9%; deduciéndose que, independientemente de la cantidad de metales presentes en el suelo, se aprecia la capacidad natural de *S. californicus* para bioacumular ciertos metales en específico más que otros; siguiendo esto, la planta posee una afinidad baja para la absorción del cadmio. En adición, Díaz y Peralta (2017) luego de estimular *S. californicus*, extraída de un medio natural y tratar un efluente durante 34 días; obtuvieron una absorción en planta de 0,2% de cadmio, donde un 0,08% se acumuló en raíces y un 0,11% se acumuló en tallos. Como se viene mencionando ya, la mayor absorción se da principalmente en las raíces. Se puede entonces apreciar que, el cadmio se absorbe muy pobremente; las proteínas de transporte activo intracelular son débilmente estimuladas por el cadmio; sin embargo, en un tratamiento combinado se observó que, metales como el plomo, favorecen la bioacumulación del cadmio por activación

indirecta de las proteínas transportadoras permitiendo la hiperacumulación, de esta forma, se obtuvo una remoción de 1,667%. Hasta este punto, se puede establecer que *S. californicus* posee una afinidad baja para la captura del cadmio, no obstante, Fernández (2013) obtuvo resultados favorables; el análisis radicular de *S. californicus*, luego de una operación de 15 días, permitió obtener una absorción en raíces máxima de 81,16% para una solución baja a 0.5 ppm; en una solución de cadmio a 2.0 ppm, se obtuvo un valor de 77,84%; concluyéndose que, *S. californicus* posiblemente tolere y bioacumule concentraciones por encima a 2.0 ppm de cadmio. La toxicidad del cadmio ocasiona cambios en la morfología de *S. californicus*; cambios en la coloración y el crecimiento. La planta incrementó su número de raíces (crecimiento) a concentraciones menores a 1.0 ppm de cadmio. Además, incrementó su longitud radicular (engrosamiento de raíces) a concentraciones mayores a 1.5 ppm de cadmio. El cadmio en altas concentraciones, intoxica a *S. californicus* inhibiendo el crecimiento, la elongación de raíces y propiciando cambios en la coloración; frente a esto, la planta responde con cambios en su estructura radicular; específicamente un engrosamiento o ensanchamiento de las raíces como estrategia de adaptación para seguir hiperacumulando el cadmio. Esta experiencia es respaldada por Sucari (2022) quien obtuvo, a través de un humedal artificial, una remoción en sistema de 97,31% de cadmio. Frente todo esto podemos dilucidar que, *S. californicus* posee una afinidad baja – media para la absorción del cadmio; dicho metal en altas concentraciones es tóxico para la planta la cual responde adaptándose al medio estresante. En bajas concentraciones, la planta remueve de manera más eficiente el metal.

Para el metal zinc, los ya mencionados Pulcha y Valencia (2019), a través de su humedal implantado con *S. californicus*; reportaron una remoción de zinc de 99,72% al segundo día de tratamiento; siendo ese valor el pico de adsorción, luego, la planta devolvió paulatinamente el zinc hasta el onceavo día donde la concentración del metal en la solución era la inicial; se asume que, la asimilación del zinc es un mecanismo competitivo – consecutivo de etapas de reacción reversibles. A su vez, Sucari (2022) reportó una remoción alta de zinc en sistema de 80,99%; se puede deducir entonces que, *S. californicus* posee una afinidad media – alta para la captura del zinc, donde el pico de adsorción se da en los primeros días, seguido por la desorción del metal en los días posteriores. De esta manera, con un control específico del tiempo, se pueden obtener absorciones máximas de zinc por parte de la planta para después terminar con el tratamiento, antes que ocurra la liberación del metal.

Respecto al metal hierro, se recogen experiencias de remediación en humedales artificiales implantados con *S. californicus*; de esta manera, la remoción en sistema más alta fue de 98,02% reportada por Sucari (2022), luego de 5 meses de operación; seguido por Licapa (2015), con una máxima remoción de 97,66%, con el sustrato con mayor cantidad de materia orgánica y 97,33% de hierro con el sustrato de menor cantidad de materia orgánica, luego de 48 horas de contacto. Por otro lado y abordando la absorción únicamente en planta, Hernández y Luna (2016), luego del análisis de las macrófitas utilizadas; reportaron una absorción de 86%, siendo este un valor elevado que demuestra una alta fitorremediación de hierro por parte de *S. californicus*. Cabe mencionar que, en un humedal ocurren procesos de adsorción, absorción en plantas y precipitación por oxidación de ion ferroso a férrico, por acción del oxígeno atmosférico. En añadidura, Cuadrado,

Vicuña y Torres (2015), obtuvieron una absorción en planta de 47,2% de hierro, reportada al día doce de tratamiento donde un 22,74% se acumuló en las raíces y rizomas, un 37,06% en los tallos sumergidos y un 36,67% en los tallos aéreos. La mayor absorción de hierro se realizó en las partes medias de la planta (tallos sumergidos) seguida por los tallos aéreos y las raíces; observándose la translocación del metal y evidenciándose que, *S. californicus* posee capacidad natural para bioacumular hierro. Por tanto, podemos deducir que *S. californicus* posee una afinidad alta para la captura del hierro.

Para el mercurio, se recoge la experiencia de Llana (2019); quien obtuvo un valor de 3,1%; establecido como potencial de bioacumulación natural para dicho metal, de esta manera se evidencia que, *S. californicus* posee muy baja afinidad para la captura del mercurio en condiciones naturales.

Para el metaloide arsénico, nuevamente Llana (2019) reportó un valor de 9,95%; siendo este un valor medio de absorción natural; de esta forma, *S. californicus* posee afinidad natural media para la absorción del arsénico. En añadidura, Sucari (2022) reportó una remoción en sistema de 96%, valor bastante elevado que permite establecer una afinidad media – alta de *S. californicus* para la absorción y remoción en sistema para el metaloide.

Finalmente, para el metal plomo, se evidencia una muy alta afinidad para la captura de este metal, por un lado, Llana (2019) estableció un potencial de bioacumulación de aproximadamente 305,65% donde queda demostrado que *S. californicus* posee afinidad natural elevada para dicho metal. Respecto al comportamiento de *S. californicus* frente al plomo, Pulcha y Valencia (2019)

señalan que, el plomo es removido al primer día de tratamiento, sin embargo, su toxicidad imposibilita su retención en el tiempo; esto con base en una remoción experimental de 99,38% al primer día y 98,09% al séptimo día, donde la planta devolvió paulatinamente el plomo absorbido en respuesta de recuperación a su toxicidad. Por otro lado, Diaz y Peralta (2017) reportaron una absorción de plomo en planta de 5,924% donde un 3,47% se acumuló en raíces y un 2,44% se acumuló en tallos, siendo estos valores muy bajos de absorción y donde el plomo a pesar de su toxicidad, no ocasionó cambios severos respecto al color, crecimiento y grosor de la planta, salvo una pequeña coloración amarillenta en el ápice y margen de las hojas; sin embargo, una exposición prolongada provoca un deterioro progresivo de sus raíces y tallos. En lo concerniente a la utilización de *S. californicus* en humedales, Sucari (2022) reportó una remoción en sistema de 94,63% de plomo tras 5 meses de operación de un efluente minero. Por tanto, se puede establecer que *S. californicus* posee una afinidad alta para la absorción del plomo.

Por tanto, en el ejercicio de establecer tendencias de afinidad de remoción específica y en base a los resultados podemos establecer que, *S. californicus* es una especie macrófita muy efectiva en el tratamiento de los metales: plomo, zinc, cobre, hierro y arsénico; seguida en menor cantidad para los metales: cadmio y mercurio.

#### **4.2. Conclusiones**

El presente trabajo tuvo como objetivo principal el realizar un análisis de la capacidad de fitorremediación de cinco especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus*; tomando como base las experiencias y resultados de investigaciones científicas consultadas. Estas macrófitas son ampliamente utilizadas

en el tratamiento de aguas residuales con carga orgánica e inorgánica, específicamente esta investigación se centró en la presencia de metales pesados en efluentes residuales. Los beneficios de la fitorremediación como tratamiento pasivo son la utilización de tecnologías amigables con el medio ambiente donde se reproducen procesos de depuración natural, abaratando costos y maximizando eficiencias, por tanto, se vuelve necesario indagar, agrupar y generar conocimiento acerca de las macrófitas y sus potencialidades naturales; que sirva como base para la toma de decisiones en el diseño de sistemas de tratamiento que se fundamenten en la fitorremediación.

Luego del análisis detallado de resultados podemos concluir específicamente para cada objetivo planteado, de esta forma se establece lo siguiente.

#### Conclusión Específica 01:

Concluimos que las cinco especies macrófitas seleccionadas pertenecen a cinco familias diferentes: *Lemnaceae*, *Pontederiaceae*, *Cyperaceae*, *Poaceae* y *Typhaceae*; sin embargo, todas pertenecen a la clase *Liliopsidas* y división *Magnoliophytas*.

Asimismo, se identificaron los metales específicos que según la literatura puede fitorremediar cada macrófita en cuestión. Es así que, *E. crassipes* teóricamente posee mayor afinidad y potencial para tratar los metales Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Zn. *L. minor* posee capacidad para tratar los metales Cd, Cu, Pb, Hg. *T. latifolia* posee capacidad para tratar Fe, Cu, Pb. *P. australis* posee capacidad para tratar Mn, Mg, Fe. Y *S. californicus* posee capacidad para tratar Pb, Fe, Cu, Mn.

#### Conclusión Específica 02:

Para la especie *E. crassipes*, el análisis preliminar de resultados arrojó que, los valores más altos reportados de remoción fueron para los metales Mn, Fe y Pb y el mínimo para el metal Hg. Para la especie *L. minor*, los valores más altos reportados fueron para Cu y Cr y el mínimo para Hg. Para la especie *T. latifolia*, los valores más altos reportados fueron para Zn, Fe, As y Cu y el mínimo para Fe. Para la especie *P. australis*, los valores más altos reportados fueron para Zn, Cu y Pb y el mínimo para Hg. Finalmente, para la especie *S. californicus*, los valores más altos reportados fueron para Pb, Cu y Zn y el mínimo para Cd.

#### Conclusión Específica 03:

El análisis y sistematización de los resultados, permitió establecer tendencias de afinidad natural específica para ciertos metales en particular, de esta forma, se pudo delimitar el potencial de fitorremediación de cada especie macrófita estudiada, es decir, la potencialidad específica de una especie para capturar eficientemente un metal pesado o un conjunto de varios de estos; siendo este el fundamento para su utilización apropiada dentro de un sistema de tratamiento de aguas afectadas con metales pesados.

Bajo esta premisa se pudo concluir que, para el metal hierro (Fe) las especies que poseen potencial de fitorremediación significativo son: *E. crassipes*, *T. latifolia*, *P. australis* y *S. californicus*. Para el metal cobre (Cu) se tiene a: *L. minor*, *T. latifolia*, *P. australis* y *S. californicus*. Para el metal plomo (Pb) se tiene a: *T. latifolia*, *P. australis* y *S. californicus*. Para el metal mercurio (Hg) se tiene a: *E. crassipes*, *L. minor*, *P. australis* y *S. californicus*. Para el metal aluminio (Al) se tiene a: *E. crassipes*. Para el metal zinc (Zn) se tiene a: *T. latifolia*, *P. australis* y *S. californicus*.

Para el metal arsénico (As) se tiene a: *T. latifolia* y *S. californicus*. Para el metal cromo (Cr) se tiene a: *E. crassipes*, *L. minor*, *T. latifolia* y *P. australis*. Para el metal níquel (Ni) se tiene a: *T. latifolia* y *P. australis*. Para el metal cadmio (Cd) se tiene a: *T. latifolia*, *P. australis* y *S. californicus*.

#### Conclusión General:

Debido a la variabilidad en los resultados, puesto que, bien por un lado las mediciones se realizaron directamente al cuerpo de las especies macrófitas (plantas); por ejemplo la medición directa de concentración metálica en raíces o tallos; o bien de manera indirecta, a través del análisis de efluentes tratados en sistemas como los humedales artificiales, implantados con las especies macrófitas donde la remoción total es mediada por varios factores independientes al accionar de las plantas; se requirió de un análisis exhaustivo y profundo de no solo resultados sino también de experiencias y variables en la utilización de las especies, por ello y como fruto de un extensivo trabajo en el capítulo discusión; se puede concluir con base en lo trabajado que: *Eichhornia crassipes* posee potencial de fitorremediación para los metales manganeso (Mn), hierro (Fe), plomo (Pb) y cromo (Cr) y en menor medida para los metales mercurio (Hg) y aluminio (Al). *Lemna minor* posee potencial de fitorremediación para los metales manganeso (Mn), hierro (Fe), plomo (Pb) y cromo (Cr). *Typha latifolia* posee potencial de fitorremediación para los metales arsénico (As), cobalto (Co), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), cromo (Cr), hierro (Fe) y plomo (Pb) y en menor medida para los metales cadmio (Cd) y aluminio (Al). *Phragmites australis* posee potencial de fitorremediación para los metales plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn), níquel (Ni), hierro (Fe) y cromo (Cr) y en menor medida para los metales cadmio (Cd) y mercurio (Hg).

Finalmente, *Scirpus californicus* también denominada *Schoenoplectus californicus*, posee potencial de fitorremediación para los metales plomo (Pb), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y arsénico (As) y en menor medida para los metales cadmio (Cd) y mercurio (Hg).

Por tanto, con la realización de esta investigación se deja evidencia de las afinidades naturales de dichas macrófitas para ciertos metales en específico, además, se recogen experiencias de manejo y control que permitan sacar el mayor provecho posible al momento de diseñar un sistema de tratamiento, en aras de lograr la remoción metálica y la depuración de las aguas residuales, haciéndole frente a la problemática de la contaminación ambiental por actividades antrópicas.

## REFERENCIAS

- Alonso, V. (2015). *Rizofiltración de plomo del agua de la piscina de relaves de la minera orenas s.a. del Cantón Camilo Ponce Enriquez-Azuay, utilizando coriandium sativum (culantro) en humedales artificiales*. Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/2852>
- Amabilis, L., Siebe, C., Moeller, G., & Durán, M. (2016). Remoción del mercurio por *Phragmites australis* empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 32(1), 47-53. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v32n1/0188-4999-rica-32-01-00047.pdf>
- Arce, P. (2018). *Humedales Artificiales: Una alternativa para tratamiento de aguas de producción*. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. Obtenido de <http://52.0.229.99/bitstream/20.500.11839/7132/1/091369-2018-I-GA.pdf>
- Arroyave, M. (2004). La lenteja de agua (*Lemna minor* L.): una planta acuática promisoría. *Escuela de Ingeniería Antioquia*(1), 33-38. Obtenido de <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/121/121>
- Atehortua, E., & Gartner, C. (2013). Estudios preliminares de la biomasa seca de *Eichhornia crassipes* como absorbente de plomo y cromo en aguas. *Revista Colombiana de Materiales*, 4, 81-92. <https://doi.org/https://doi.org/10.17533/udea.rcm.15084>
- Ávila, G., Velít, C., & Ávila, L. (2018). Tratamiento de aguas residuales mineras contaminadas con cobre mediante *Lemna minor* (lenteja de agua). *Prospectiva Universitaria*, 15(1), 101-104. <https://doi.org/https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2018.15.859>
- Bedoya, B. (2014). *Evaluación de la actividad fitorremediadora del *Schoenoplectus californicus* "junco" en agua contaminada con arsénico, Tacna 2013*. Universidad Nacional Jorge Grohmann, Tacna. Obtenido de <https://goo.su/Of8T>

- Bernal, A. (2014). Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(2), 245-258. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5590911>
- Bustamante, B. (2018). *Evaluar índices productivos de pollos alimentados con 5, 10 y 15% lenteja de agua (Lemna minor) fresca reemplazando balanceado*. Universidad Técnica de Machala, Machala. Obtenido de [http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/13265/1/DE00011\\_TRABAJODETITULACION.pdf](http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/13265/1/DE00011_TRABAJODETITULACION.pdf)
- Cardenas, A. (2012). *Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios*. Universidad de Sevilla, Sevilla. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70357/>
- Carreño, U. (2020). *Buchón de agua (Eichhornia crassipes): impulsor de fitorremediación*. Fundación Universitaria. Obtenido de <https://goo.su/iQImsPt>
- Cayetano, J. (2013). *Cumplimiento de la normatividad ambiental por el sector minero metalúrgico y su impacto ambiental en el Río Mantaro - Región Junín*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Chagua, R., & Tardío, J. (2015). *Evaluación de remoción de cobre y zinc por la planta nativa Scirpus Californicus (totora) en la comunidad de Pomachaca - Tarma*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Tarma. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1939>
- Chicas, S., Melara, A., & Pérez, M. (2021). *Propuesta para el manejo y control del Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) en el lago Suchitlán, El Salvador*. Universidad El Salvador, El Salvador.
- Cirujano, S., Molina, A., & Cezón, K. (2010). *MITECO*. Obtenido de [https://www.miteco.gob.es/es/agua/formacion/06-Macrofitos-Santos%20Cirujano\\_tcm30-175307.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/agua/formacion/06-Macrofitos-Santos%20Cirujano_tcm30-175307.pdf)

- Colín, A., & Jiménez, M. (2003). *Química ambiental*. Principios básicos de contaminación. <https://doi.org/https://goo.su/hLSRt>
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, J., & Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 597-612. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso de Agua (Centro de AGUA). <https://doi.org/https://goo.su/rI4jdqu>
- Díaz, L., & Peralta, L. (2017). *Estudio comparativo de la capacidad de acumulación para Cadmio y Plomo de Scirpus Californicus (totora) y Stypa Ichu (Ichu) Bajo condiciones hidropónicas*. Universidad Católica de Santa María, Santa María. Obtenido de <https://bibliotecadigital.oducal.com/Record/ir-UCSM-6412>
- Environmental Protection Agency. (2000). Introduction to Phytoremediation. Obtenido de <https://www.clu-in.org/download/remed/introphyto.pdf>
- Galván, J. (2016). *Evaluación de sistemas de humedales construidos para la disminución de la concentración de metales pesados generados por los drenajes ácidos de minería*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/eaad0e75-1030-47ef-a38f-2fdd1e83e2a5/content>
- García, B. (2021). *Evaluación de la eficiencia de Phragmites australis (carrizo común) y Lemna minor (Lenteja agua) en la disminución de dureza total del agua, distrito de Chocope - Ascope, 2021*. Universidad Nacional San Martín, Ascope.
- González, R., Ortiz, C., & Gerritsen, P. (2009). Usos populares y aprovechamiento del carrizo: estudio de caso en la costa sur, de Jalisco, México. *Economía, sociedad y territorio*, 9(29), 185-207. <https://doi.org/https://goo.su/g4DqL2>

- Grace, J., & Harrison, J. (1986). The biology of canadian weeds: *Typha latifolia*, *Typha angustifolia* and *Typha xglauca*. *Canadian Journal of Plant Science* , 66(2), 361-379. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4141/cjps86-051>
- Hernández, N., & Luna, J. (2016). *Prueba piloto para la evaluación de la eficiencia de las plantas fitorremediadoras del humedal Las Tlinguas, en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad La Salle, Bogotá, Colombia. Obtenido de [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/347/](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/347/)
- Hidalgo, J., & García, J. (2018). Totorá (*Schoenoplectus californicus* (C.A. Mey.) Soják) and its potential as a construction material. *Industrial Crops and Products*, 112, 467-480. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.029>
- Jaramillo, M., & Flores, E. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (Lenteja de agua) y Eichhornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de actividad minera*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Kumari, M., & Tripathi, B. (2015). Efficiency of *Phragmites australis* and *Typha latifolia* for heavy metal removal from wastewater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112(1), 80-86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.034>
- Lagos, C. (2005). *Utilización del jacinto acuático Eichhornia crassipes ((Mart) Solms 1883) como sistema de tratamiento para la eliminación de materia orgánica y color en efluente de la celulosa kraft*. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción. Obtenido de <https://goo.su/Nov3k>
- Licapa, G. (2015). *Influencia del Tiempo de Retención y Compensación del Sustrato en la Remoción de Hierro y Cobre del Drenaje Ácido de Mina en Humedales Artificiales*. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca. Obtenido de <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1553>

- Llana, I. (2019). *Análisis comparativo de la absorción del plomo total presente en la especie Schoenoplectus Californicus del contorno del lago Chinchaycocha*. Universidad Daniel Alcides Carrion, Cerro de Pasco, Perú.
- Londoño, L., Londoño, P., & Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales en la salud humana y animal. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Industrial*, 14(2), 145-153. [https://doi.org/10.18684/BSAA \(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA (14)145-153)
- López, A. (2018). *Administración estratégica para el tratamiento de aguas ácidas de mina mediante humedales artificiales en Nyrstar Coricancha S.A.* Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5018>
- Mena, A. (2021). Propiedades del *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua), *Schoenoplectus californicus* (Junco), y el *Phragmites australis* (Carricillo). *Revista del Instituto de Investigación de Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 24(47), 101-108. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20656>
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros. *PAIDEIA XXI*, 11(1), 141-154. <https://doi.org/doi:10.31381/paideia.v11i1.3622>
- Miguel, C. (30 de 01 de 2013). *iAgua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/carolina-miguel/los-humedales-artificiales-componentes-y-tipos>
- Morikawa, H., & Cem, E. (2003). Basic processes in phytoremediation and some applications to air pollution control. *Chemosphere*, 52(9), 1553-1558. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00495-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00495-8)
- Niño, V. (2011). *Metodología de la Investigación*. Ediciones de la U. Obtenido de [https://books.google.com.pe/books/about/Metodolog%C3%ADa\\_de\\_la\\_investigaci%C3%B3n\\_Dise%C3%B1o.html?id=CyejDwAAQBAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_Dise%C3%B1o.html?id=CyejDwAAQBAJ&redir_esc=y)
- Núñez, R. (2016). *Tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel familiar, con Humedales Artificiales de flujo subsuperficial Horizontal, mediante la especie macrófita emergente*

- Cyperus Papyrus* (Papiro). Universidad Peruana Unión, Lima. Obtenido de <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/555>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (11 de Julio de 2019). OEFA. Obtenido de <https://www.oefa.gob.pe/oefa-supervisa-derrame-de-relave-de-doe-run-al-riomantaro/ocac07/>
- Orillo, S., & Quiroz, L. (2020). *Evaluación de la capacidad de remoción de hierro y aluminio en efluente de mina de carbón, utilizando humedales artificiales de Eichhornia crassipes y Myrophyllyum*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/23893>
- Palacios, Í., & Moreno, D. (2022). Contaminación Ambiental. *Revista Científica Mundo de Investigación y el Conocimiento*, 6(2), 93-103. [https://doi.org/10.26820/recimundo/6.\(2\).abr.2022.93-103](https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(2).abr.2022.93-103)
- Paredes, J., & Ñique, M. (2015). Optimización de la fitorremediación de mercurio en humedales de flujo continuo empleando *Eichhornia crassipes* "Jacinto de Agua". *Investigación y Amazonía*, 5(1), 44-49. Obtenido de <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/57/44>
- Parra, F. (2017). *Rizofiltración de aguas de riego agrícola contaminados por metales pesados en comunidades del municipio de Atlixco, Puebla*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12371/967>
- Pérez, R., Alfaro, C., Sasa, J., & Agüero, J. (2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Uniciencia*, 27(1), 332-340. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=475947762019>
- Pulcha, J., & Valencia, M. (2019). *Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/14458>

- Rachel, O. (2008). *IAgua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/2008/02/agua-y-salud-una-vision-mundial>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>
- Rossi, J., & Tur, N. (1976). Autoecología de *Scirpus Californicus*. *Boletín de la Sociedad Argentina Botánica*, 17(3), 280-288. Obtenido de <http://botanicaargentina.org.ar/wp-content/uploads/2018/09/280-288082.pdf>
- Sabaj, V. (2011). *Extracción de "juncos" Schoenoplectus californicus en el Área Protegida Humedales del Santa Lucía (Uruguay): contexto ecológico, socioespacial y perspectivas de manejo sustentable*. Universidad de La Republica de Uruguay, Montevideo. Obtenido de <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/3910/1/uy24-15287.pdf>
- Segretin, M., Bey, P., & Mentaberry, A. (2010). *Fitorremediación*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Obtenido de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/111945>
- Sekarjannah, F., Wardoyo, S., & Ratih, Y. (2019). Managment of mine acid drainage in a cosntructed wetland using hyacinth plant and addition of organic materials. *Jorunal Of Degraded and Mining Lands Managment*, 6(4), 1847-1855. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2019.064.1847>
- Singh, S., & Chakraborty, S. (2020). Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North - Eastern India. *Journal of Hazardous Materials*, 397(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122719>
- Smith, G. (1967). Experimental and Natural Hybrids in North American Typha (Typhaceae). *The American Midland Naturalist*, 78(2), 257-287. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2485231>

- Steinmann, V. (2008). *Flora de bajo y de regiones adyacentes*. Catalogue of New World grasses. Obtenido de <http://inecolbajo.inecol.mx/floradelbajo/documentos/fasciculos/ordinarios/Gramineae%20Subfamilia%20Arundinoideae%20158.pdf>
- Sucari, L. (2022). *Evaluación de la eficiencia de remoción de metales pesados de efluentes mineros a través de humedales artificiales empleado Scirpus californicus (totora) y Festuca dolichopylla (ichu), en el Distrito de Morococha, Yauli. Junín*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú. Obtenido de <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2445>
- Tache, K. (2020). *Lenteja de agua (Lemna minor); una promisoriosa planta con potencial en el cuidado ambiental y alimentario para seres humanos y animales*. Universidad del Sinú, Cartagena de Indias. Obtenido de <https://goo.su/GW3ZGfU>
- Tejeda, J. (2010). *Diseño de un humedal para la remoción de Cd, As, y Cr con plantas de Typha latifolia (espadaña)*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí. Obtenido de <https://goo.su/uJMU>
- United States Environmental Protection Agency. (1999). *Phytoremediation Resource Guide*. En E. M. Support, *Phytoremediation Resource Guide* (págs. 1-56).
- Wallace, V., Siegel, A., & Sowizral, K. (2021). *Información de plantas invasoras*. University of Connecticut. Obtenido de <https://goo.su/ZyvqcjY>

## ANEXOS

Anexo N° 1: Investigaciones recopiladas según cada especie macrófita

**Tabla 12**

*Investigaciones recopiladas para Eichhornia crassipes*

N°	Título	Autor (es)	Año	Idioma
1	Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales <i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua), y <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera	Jaramillo, M. y Flores, E.	2012	Español
2	Management of mine acid drainage in a constructed wetland using hyacinth plant and addition of organic materials	Sekarjannah, F., Wardoyo S. y Raith, Y	2019	Inglés
3	Evaluación de la capacidad de remoción de hierro y aluminio en efluente de mina de carbón, utilizando humedales artificiales de <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua) y <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Cola de zorro acuática)	Orillo, S. y Quiroz, L.	2020	Español
4	Estudios preliminares de la biomasa seca de <i>Eichhornia crassipes</i> como adsorbente de plomo y cromo en aguas	Atehortua, E. y Gartner, C.	2013	Español
5	Optimización de la fitorremediación de mercurio en humedales de flujo continuo empleando <i>Eichhornia crassipes</i> "Jacinto de agua"	Paredes, J. y Ñique, M.	2016	Español

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 13**

*Investigaciones recopiladas para Lemna minor*

Nº	Título	Autor (es)	Año	Idioma
1	Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales <i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua), y <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera	Jaramillo, M. y Flores, E.	2012	Español
2	Tratamiento de aguas residuales mineras contaminadas con cobre mediante <i>Lemna minor</i> (lenteja de agua)	Ávila, G.; Velit, C.; Ávila, L.; Rosales, S.; Manchego, A. y Mora, J.	2018	Español
3	Evaluación de un sistema de fitorremediación para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) y materia orgánica empleando como modelo de estudio aguas residuales sintéticas	Carreño, M.	2014	Español

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 14**

*Investigaciones recopiladas para Typha latifolia*

N°	Título	Autor (es)	Año	Idioma
1	Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North-Eastern India	Singh, S. y Chakraborty, S.	2020	Inglés
2	Administración estratégica para el tratamiento de aguas ácidas de mina mediante humedales artificiales en Nyrstar Coricancha S.A.	López, A.	2018	Español
3	Prueba piloto para la evaluación de la eficiencia de las plantas fitorremediadoras del humedal Las Tinguas, en el tratamiento de aguas residuales domésticas	Hernández, N. y Luna, J.	2016	Español
4	Efficiency of Phragmites australis and Typha latifolia for heavy metal removal from wastewater	Kumari, M. y Tripathi, B.	2015	Inglés

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 15**

*Investigaciones recopiladas para Phragmites australis*

N°	Título	Autor (es)	Año	Idioma
1	Remoción de mercurio por <i>Phragmites australis</i> empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados	Amabilis, L., Siebe, C., Moeller, G. y Durán, M.	2016	Español
2	Evaluación de sistemas de humedales construidos para la disminución de la concentración de metales pesados generados por los drenajes ácidos de minería	Galván, J.	2016	Español
3	Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas de residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales	Pulcha, J. y Valencia, M.	2019	Español
4	Efficiency of <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha latifolia</i> for heavy metal removal from wastewater	Kumari, M. y Tripathi, B.	2015	Inglés

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 16**

*Investigaciones recopiladas para Scirpus californicus*

Nº	Título	Autor (es)	Año	Idioma
1	Análisis comparativo de la absorción del plomo total presente en la especie <i>Schoenoplectus Californicus</i> del contorno del lago Chinchaycocha	Llana, I.	2019	Español
2	Influencia del tiempo de retención y composición del sustrato en la remoción del hierro y cobre del drenaje ácido de mina en humedales artificiales	Licapa, G.	2015	Español
3	Evaluación de la eficiencia de remoción de metales pesados de efluentes mineros a través de humedales artificiales empleando <i>Scirpus californicus</i> (Totorá) y <i>Festuca dolichophylla</i> (Ichu), en el distrito de Morococha, Yauli, Junín	Sucari, L.	2022	Español
4	Prueba piloto para la evaluación de la eficiencia de las plantas fitorremediadoras del humedal Las Tinguas, en el tratamiento de aguas residuales domésticas	Hernández, N. y Luna, J.	2016	Español
5	Estudio comparativo de la capacidad de acumulación para cadmio y plomo de <i>Scirpus californicus</i> (Totorá) y <i>Stypa ichu</i> (Ichu) bajo condiciones hidropónicas	Díaz, L. y Peralta, L.	2017	Español

<b>6</b>	Capacidad acumuladora de cadmio en raíces de <i>Scirpus californicus</i> expuesta a diferentes concentraciones de nitrato de cadmio en condiciones de laboratorio	Fernández, L.	2013	Español
<b>7</b>	Evaluación de la planta <i>Scirpus californicus</i> (Totora) en la eficiencia de remoción de hierro en un prototipo de humedal construido de flujo superficial	Cuadrado, W., Vicuña, C. y Torres, E.	2015	Español
<b>8</b>	Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas de residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales	Pulcha, J. y Valencia, M.	2019	Español

Fuente: Elaboración propia.

Anexo N°2: Ficha de registro de datos

Número	Título	Idioma	País	Autor(es)	Año	Descripción (Objetivo - Metodología)	Especie (es)	Metales	Descripción del Tratamiento	Resultados	Conclusiones
1	Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales <i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua), y <i>Eichornia crassipes</i> (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera	Español	Ecuador	Jaramillo, M. y Flores, E.	2012	OG: Disminuir la concentración de sales de mercurio (Hg) utilizando plantas que lo bioacumulan. OE's: Establecer capacidad de absorción de cada planta. Identificar reducción de DBO <sub>5</sub> - DQO en el agua residual. MET: Diseño experimental de construcción de estanque o lagunas artificiales con macrófitas (Humedal Artificial) como sistema de tratamiento del agua residual.	<i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua), y <i>Eichornia crassipes</i> (Jacinto de agua)	sales de mercurio (Hg)	El tratamiento experimental constó de doce (12) recipientes donde se realizaron 3 tipos de tratamiento y 4 repeticiones: a) Jacinto de agua (7 especies) más grava. B) Lenteja de agua (30 gramos) más grava y c) Combinado (4 especies de Jacinto y 15 gramos de Lenteja) aforados con una solución con Hg y tratados a la intemperie durante 15 días. Sistema de tratamiento de flujo libre.	Ambas especies presentaron cambios en su estructura: Jacinto de agua presentó necrosis y Lenteja de agua presentó clorosis. El tratamiento a) presentó un porcentaje de remoción total de 28%, el tratamiento b) presentó un porcentaje de remoción total de entre 24 - 26% y el tratamiento c) presentó 26 - 27%	La utilización de ambas especies es una alternativa viable a los métodos convencionales de desintoxicación. Debido a sus ventajas económicas y su mínimo impacto al ambiente. La capacidad de absorción de ambas especies para el mercurio se estableció en 29,5% de remoción. El mercurio tiene una alta tendencia a sedimentarse por lo cual se recomienda usar un flujo recirculado. El tratamiento único con la planta Jacinto de agua presentó mayor absorción del mercurio además de presentar una mayor resistencia. Lenteja de agua tiene una rápida reproducción lo cual se puede aprovechar para incrementar la absorción en condiciones adecuadas de crecimiento. El tratamiento combinado demostró que ambas plantas otorgan un rendimiento medio de absorción por lo tanto



							compost por una parte de aserrín y A3: dos partes de compost por una parte de aserrín. Los tiempos de incubación evaluados fueron: 15 días y 33 días.	<i>Eichornia crassipes</i> (raíces). Debido a la naturaleza de la investigación solo consideraremos los siguientes resultados: <b>RESULTADOS DEL CÁLCULO DE FE Y MN, ABSORCIÓN EN RAÍCES:</b> Concentración promedio final de Fe en plantas: 0,2375 ppm. Concentración promedio final de Mn en plantas: 0,2525 ppm. Entonces mis porcentajes de remoción son: 96,06 % para Fe y 96,22% para Mn; valores de remoción de planta en raíces.
--	--	--	--	--	--	--	---	--

3	Remoción de mercurio por <i>Phragmites australis</i> empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados	Español	México	Amabilis, L., Siebe, C., Moeller, G. y Durán, M.	2016	OG: Evaluar la acumulación y la distribución de mercurio (Hg) removido por el carrizo ( <i>Phragmites australis</i> ) como barrera biológica en un sistema de humedal artificial y su interacción con bacterias tolerantes a metales pesados.	<i>Phragmites australis</i> (Carrizo)	mercurio (Hg)	Se construyeron nueve (9) humedales artificiales a escala de laboratorio, se utilizó como sustrato roca volcánica denominada tezontle. Seis (6) de los nueve contenedores fueron sembrados con una planta de Carrizo (tallo - raíz - rizoma), de estos seis, tres (3) fueron inoculados con un consorcio microbiano de cepas tolerantes a metales pesados. Los (3) sistemas restantes se usaron como testigos con únicamente el tezontle. Los nueve sistemas operaron por 304 días.	Distribución del mercurio acumulado en Carrizo ( <i>resultados necesarios</i> ): Las seis (6) plantas fueron extraídas, secadas y pulverizadas (rizomas - raíces - hojas - tallos). Los resultados indican que específicamente el sistema sin el consorcio microbiano metalotolerante, acumuló 48% de Hg en las hojas, 41% en el tallo, 6% en raíz y 5% en rizoma. Por otro lado, el sistema con el consorcio microbiano acumuló 59% en hojas, 32% en tallo, 4% en raíz y 5% en rizoma. Independientemente de la configuración, ambos removieron el 6% de total de Hg presente en el sistema. Gran parte del Hg fue volatilizado a la atmósfera, parte de este proceso fue magnificado por el carrizo el cual	Con base en los resultados del presente trabajo es posible concluir que <i>Phragmites australis</i> puede ser utilizada como barrera biológica para mercurio en HA sin que la presencia de las bacterias metalotolerantes influya sobre la remoción y acumulación del metal dentro del sistema. No obstante, los resultados también indicaron que la mayor proporción del mercurio removido es transferido a la atmósfera por volatilización. Además, cabe mencionar que los microorganismos convencionales asociados a la rizosfera pueden verse inhibidos frente a la resistencia de cepas tolerantes disminuyendo la bioadsorción.
---	--	---------	--------	--	------	---	---------------------------------------	---------------	---	---	---



4	Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North-Eastern India	Inglés	India	Singh, S. y Chakraborty, S.	2020	OG: Evaluar el rendimiento de un humedal artificial de flujo subsuperficial a escala de laboratorio utilizando un sustrato rico en materia orgánica (estiércol de vaca más astillas de bambú) para la remediación de un drenaje ácido de mina sintético, plantado con la especie <i>Totora</i> común.	<i>Typha latifolia</i> (Totora común)	cromo (Cr), níquel (Ni), cobalto (Co), hierro (Fe) y aluminio (Al)	A través de un humedal artificial piloto, se trató un drenaje ácido de mina sintético que presentaba un pH menor a 2,5 y contenía los metales pesados Fe, Mn, Al, Co, Ni y Cr y sulfatos. El efluente tratado en un humedal de flujo subsuperficial horizontal fue ingresado en niveles ascendentes de concentración: 10,25,40,70 y 100% para facilitar la aclimatación de la planta y la estabilidad del sistema. El tiempo de retención hidráulico fue de siete (7) días y se operó durante seis (6) meses.	El funcionamiento del humedal piloto, permitió subir el pH de 2,1 a 6,4 además de presentar una eficiencia en la remoción de: Cr (99,7%), Ni (97,8%), Co (93,7%), Fe (91,6%) y Al (59,7%) y 44-75% en la reducción de sulfato. Para el metal Mn no se presentan resultados.	La planta <i>Typha latifolia</i> (Espadaña común) implantada en un humedal artificial potenciado con un sustrato rico en materia orgánica, demostró una alta eficiencia en la estabilización del pH y la remoción de metales pesados a excepción del metal manganeso (Mn) el cual pudo haberse sedimentado y absorbido en el lecho. Los procesos mediados por la planta fueron: bioacumulación y translocación.
---	---	--------	-------	-----------------------------	------	---	---------------------------------------	--	---	---	---

5	Evaluación de sistemas de humedales construidos para la disminución de la concentración de metales pesados generados por los drenajes ácidos de minería	Español	Colombia	Galván, J.	2016	OG: Establecer la configuración óptima de humedales construidos para la disminución de zinc (Zn) y plomo (Pb) al tratar drenajes ácidos de mina. OE's: Comparar las eficiencias de remoción para ambos metales en diferentes configuraciones de construcción, evaluar el efecto del cambio en la concentración de ambos metales en el comportamiento de los sistemas y contrastar el uso de planta o alga en la disminución de ambos metales.	<i>Phragmites australis</i> (Carrizo)	zinc (Zn) y plomo (Pb)	La metodología de tratamiento consistió en la construcción de siete (7) humedales artificiales: 01 HFSSH con planta, 01 HFSSH sin planta, 01 HFS con planta, 01 HFS sin planta ni alga, 01 HFSSV con planta y 01 HFSSV sin planta. Operados durante dos fases con un tiempo de retención hidráulica de 22 y 23 semanas respectivamente (fase de aclimatación y operación). Para uniformizar se utilizó un drenaje ácido de mina artificial.	Resultados específicos respecto al proceso de fitorremediación mediado por la planta <i>Phragmites australis</i> : Análisis Inicial: Sistema HFSSH+P (21 mg Pb <sup>+2</sup> /kg seco - 216,3 mg Zn <sup>+2</sup> /kg seco), Sistema HFS+P (36 mg Pb <sup>+2</sup> /kg seco - 305,7 mg Zn <sup>+2</sup> /kg seco) y Sistema HFSSV+P (27 mg Pb <sup>+2</sup> /kg seco - 134,4 mg Zn <sup>+2</sup> /kg seco). Análisis Final: Sistema HFSSH+P (103,7 mg Pb <sup>+2</sup> /kg seco - 454,5 mg Zn <sup>+2</sup> /kg seco), Sistema HFS+P (267,8 mg Pb <sup>+2</sup> /kg seco - 435,4 mg Zn <sup>+2</sup> /kg seco) y Sistema HFSSV+P (50,4 mg Pb <sup>+2</sup> /kg seco - 419,5 mg Zn <sup>+2</sup> /kg seco). Valores de absorción finales presentados por la especie <i>Phragmites australis</i> : 1) Sistema HFSSH+P: Zn (72% de absorción en raíz, 17% de absorción en tallo y 11% de absorción en hoja).	Los resultados permiten concluir que los sistemas HFSSV y HFS son la configuración más óptima para el tratamiento de drenajes ácidos de mina. Los sistemas implementados con la especie <i>Phragmites australis</i> mostraron un mejor desempeño frente a los tratamientos con únicamente algas o sustrato. En lo que respecta a la capacidad de absorción únicamente con la planta, se obtuvieron los porcentajes de remoción para cada sistema. Sistema HFSSH+P (79,75% Pb - 52,41% Zn), Sistema HFS+P (86,56% Pb - 29,79% Zn) y Sistema HFSSV+P (86,67% Pb - 67,96% Zn).
---	---	---------	----------	------------	------	---	---------------------------------------	------------------------	---	---	---



6	Evaluación de la capacidad de remoción de hierro y aluminio en efluente de mina de carbón, utilizando humedales artificiales de <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua) y <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Cola de zorro acuática)	Español	Perú	Orillo, S. y Quiroz, L.	2020	OB: Evaluar la capacidad de remoción de los metales hierro (Fe) y aluminio (Al) presentes en un efluente de mina carbonífera utilizando como tratamiento humedales artificiales con las especies: <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua) y <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Cola de zorro acuática).	<i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua) y <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Cola de zorro acuática)	hierro (Fe) y aluminio (Al)	La metodología de tratamiento consistió en la construcción de seis (6) humedales artificiales, tres (3) implementados con la especie <i>Eichhornia crassipes</i> y tres (3) con la especie <i>Myriophyllum aquaticum</i> . Dichos sistemas fueron alimentados con aguas residuales ácidas de mina y operados después de un período de adaptación de las plantas. La toma de muestras se realizó cada 24 horas durante la etapa de operación.	Resultados experimentales respecto al porcentaje de remoción del sistema implementado con ambas plantas: <i>Eichhornia crassipes</i> (Fe: 81% - Al: 49%) y <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Fe: 80% - Al: 91%).	Se concluye que la remoción de los metales hierro (Fe) y aluminio (Al) a través del tratamiento de efluentes de mina con ambas especies es una alternativa viable y eficiente.
7	Administración estratégica para el tratamiento de aguas ácidas de mina mediante humedales artificiales en Nyrstar Coricancha S.A.	Español	Perú	López, A.	2018	OB: Conocer el efecto que causa la aplicación de la administración estratégica en el tratamiento de aguas ácidas de mina (calidad del efluente y costos) mediante humedales artificiales en la empresa minera Nyrstar Coricancha S.A.	<i>Typha latifolia</i> (Totora común)	cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), hierro (Fe) y arsénico (As)	La metodología consistió en la construcción de un humedal artificial piloto como sistema de tratamiento pasivo coadyuvante en la planta de tratamiento de aguas ácidas de mina de la compañía minera Nyrstar Coricancha S.A. Dicho humedal recibía el influente aligerado en carga de metales pesados y pH incrementado de procesos de tratamiento anteriores. El humedal operó por 30 días con toma de muestras cada 24 horas.	Los resultados conseguidos con la aplicación del tratamiento mixto "ALD - Celdas de oxidación - Humedal de laboratorio" se consideran exitosos, mejorado la calidad de efluente, los resultados promedio de remoción son: metal cobre (Cu) 99,78%, plomo (Pb) 94,96%, zinc (Zn) 99,86%, hierro (Fe) 99,95% y para el metaloide arsénico (As) 99,95%. Cabe mencionar que dichos resultados son obtenidos luego del tratamiento	Se concluye que los humedales artificiales son una excelente alternativa como tratamiento pasivo para aguas ácidas de mina, teniendo costos de implementación y operación muy bajos. Además, se observa que la especie <i>Typha latifolia</i> se utilizó satisfactoriamente y que su capacidad de fitorremediación ayudó a potenciar la remediación del influente inicial.





									<p>natural. Las muestras analizadas fueron únicamente del afluente y el efluente de DAM.</p>	<p>mayores para Fe y Cu.</p>	<p>mecanismos de fitorremediación en conjunto con el sustrato, su microbiota, la caliza y demás procesos involucrados, lograron una remoción significativa y estable de ambos metales.</p>
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	------------------------------	--

10	Evaluación de la eficiencia de remoción de metales pesados de efluentes mineros a través de humedales artificiales empleando <i>Scirpus californicus</i> (Totora) y <i>Festuca dolichophylla</i> (Ichu), en el distrito de Morococha, Yauli, Junín	Español	Perú	Sucari, L.	2022	OG: Evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados de efluentes mineros a través de humedales artificiales empleando <i>Scirpus californicus</i> y <i>Festuca dolichophylla</i> OE's: Evaluar el crecimiento de las plantas <i>Scirpus californicus</i> y <i>Festuca dolichophylla</i> en humedales artificiales alimentados con efluentes mineros (trazas de metales pesados). Evaluar la diferencia en la concentración de los metales en el afluente y efluente al tratarlos con humedales artificiales utilizando ambas plantas. Comparar la eficiencia en la remoción de metales de ambos sistemas implantados con Totora e Ichu.	<i>Scirpus californicus</i> (Totora) y <i>Festuca dolichophylla</i> (Ichu)	arsénico total (As), cadmio total (Cd), cobre total (Cu), plomo total (Pb), zinc total (Zn) y hierro disuelto (Fe)	La metodología consistió en la construcción de un humedal artificial para el tratamiento de efluentes mineros provenientes de la Unidad Minera Austria Duvaz. Se construyeron dos (02) humedales artificiales, utilizando grava y el suelo de recolección de las plantas Ichu o Paja brava y Totora, sembradas una en cada humedal respectivamente. Se esperaron 60 días de adaptación para seguir con la operación y toma de muestras (inicialmente, durante y finalmente) del efluente minero durante cinco (05) meses. Se analizó el crecimiento de ambas plantas, la concentración de metales y el pH.	Resultados en lo que respecta al crecimiento de las especies: La especie <i>Scirpus californicus</i> llegó hasta un máximo de 31,6 cm. La especie <i>Festuca dolichophylla</i> llegó hasta un máximo de 27,5 cm. La adaptación natural de una especie sobre otra al clima y la altitud es significativa. Por otro lado, el análisis de resultados finales permitió establecer valores promedio de remoción diferentes con ambas plantas: Humedal plantado con Totora: As (96%), Cd (97,31%), Cu (92,67%), Fe (98,02%), Pb (94,63%) y Zn (80,99%). Humedal plantado con Ichu: As (96%), Cd (93,85%), Cu (88,40%), Fe (51,19%), Pb (89,93%) y Zn (63,50%). Estabilización del pH: Totora: 6,41 e Ichu: 6,15 (la	Se concluye que, ambas plantas tuvieron un comportamiento ascendente y que el Ichu tuvo un mayor crecimiento debido a que es una especie adaptada al clima y la altitud; Totora tiene una tasa de crecimiento más pausada durante los meses más fríos. El aumento en el pH del efluente se debe a la presencia de piedras calizas molidas a la salida del sistema. En ambos humedales artificiales ocurren procesos de sedimentación, precipitación química, absorción e interacción biológica y captación por parte de la vegetación. El humedal como sistema fija físicamente los contaminantes en la superficie del sustrato y la materia orgánica. La vegetación por su parte proporciona una superficie para la formación de películas bacterianas que facilitan la filtración y adsorción de metales totales y
----	--	---------	------	------------	------	--	--	--	--	---	--



11	Prueba piloto para la evaluación de la eficiencia de las plantas fitorremediadoras del humedal Las Tinguas, en el tratamiento de aguas residuales domésticas	Español	Colombia	Hernández, N. y Luna, J.	2016	OG: Evaluar la eficiencia de las plantas fitorremediadoras del Humedal Las Tinguas, en el tratamiento de aguas residuales domésticas a través de una prueba piloto. OE's: Seleccionar tres (03) especies presentes en el humedal que presenten mejores porcentajes de remoción teóricos. Realizar pruebas pilotos con las especies seleccionadas en lo que respecta al tratamiento de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Plantear un diseño de sistema de tratamiento basado en la eficiencia en la fitorremediación de las especies en cuestión.	<i>Typha latifolia</i> (Enea), <i>Schoenoplectus californicus</i> (Junco) y <i>Limnobiium laevigatum</i> (Buchón cucharita)	hierro total (Fe)	La metodología consistió en la identificación botánica de las plantas presentes en el humedal y la selección de tres (03) especies que teóricamente tienen mayor capacidad de fitorremediación. Además de la caracterización del agua presente en el humedal. En base a esto se construyó un humedal artificial a escala piloto que fue alimentado con agua sintética que recrea las mismas condiciones fisicoquímicas del agua residual vertida en el humedal natural. El tratamiento constó de un humedal artificial que fue implantado con las tres (03) especies juntas, dos (02) plantas por cada especie trasladadas del humedal natural; un segundo que solo contuvo la especie con menor capacidad fitorremediadora teórica ( <i>Schoenoplectus californicus</i> ) y el blanco sin especie alguna (solo el suelo natural como sustrato). El suelo procedente del humedal natural fue utilizado como sustrato y soporte de las plantas. La operación duró dos (02) meses con toma de muestras semanales.	Resultados: valores iniciales de hierro (Fe) presentes en las plantas: Enea (1,43 mg/L), Buchón (2,87 mg/L) y Junco (0,35 mg/L). Resultados finales de hierro total (Fe) obtenido por maceración de las plantas al final del tratamiento: Enea (1,62 mg/L), Buchón (5,41 mg/L) y Junco (0,65 mg/L). Por tanto, el porcentaje de remoción experimental por planta para hierro total (Fe): Enea (13%), Buchón (89%) y Junco (86%). La planta con mayor porcentaje de remoción fue el Buchón, debido a que a nivel radicular posee un mecanismo que permite formar complejos entre el metal pesado y los aminoácidos presentes en las células vegetales, actuando como un biofiltro de metales pesados, además,	Se concluye que el sistema integrado por las especies: <i>Typha latifolia</i> , <i>Schoenoplectus californicus</i> y <i>Limnobiium laevigatum</i> evidenció una contribución significativa al tratamiento del agua residual descargada en el humedal, obteniéndose una remoción de 75,17% de hierro (Fe) total. A pesar que teóricamente <i>Schoenoplectus californicus</i> , utilizada únicamente en el segundo humedal, fue establecida como la especie con menor capacidad de fitorremediación, se evidenció una significativa capacidad de remoción de hierro (Fe) total.
----	--	---------	----------	--------------------------	------	---	---	-------------------	---	--	---



12	Estudios preliminares de la biomasa seca de <i>Eichhornia crassipes</i> como adsorbente de plomo y cromo en aguas	Español	Colombia	Atehortua, E. y Gartner, C.	2013	OB: Demostrar la capacidad de la planta <i>E. crassipes</i> para adsorber metales pesados en aguas, utilizando su biomasa seca para la remoción de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales contaminadas.	<i>Eichhornia crassipes</i> (Lirio Acuático, Jacinto de Agua ó Buchón de Agua)	cromo (Cr) y plomo (Pb)	<p>La metodología consistió en la recolección de tallos de <i>Eichhornia crassipes</i> de mayor volumen en una localidad de Antioquia, Colombia. Posteriormente, los tallos fueron secados (48 horas a temperatura ambiente y 80°C durante 2 horas), triturados, molidos e uniformizados entre 0,18 y 0,84 mm. Además, se realizó una modificación superficial del material molido a través de un tratamiento térmico a 200°C durante 6 horas para evaluar adicionalmente su capacidad de adsorción. Para el análisis de la capacidad de adsorción de metales pesados de ambos materiales: <u>Material triturado</u>: se procedió a colocar este en una solución de acetato de plomo a razón de (0,4, 1 y 2 gr/L) a 50 rev/min durante 15, 30 y 45 minutos, a su vez, se colocó la misma configuración en una solución de lixiviado proveniente de un vertedero donde se identificó plomo (Pb) y cromo (Cr). <u>Material con modificación superficial</u>: se procedió a colocar este en una solución de acetato de plomo a razón de (0,4, 1 y 2 gr/L) a 50 rev/min durante 15, 30 y 45 minutos.</p>	<p>Resultados: Análisis físico: Se observa la estructura esponjosa y bulbosa que le permite acumular agua y aire permitiéndole flotar. Además, de la presencia de grupos hidroxilo que forman enlaces de hidrógeno. Los tallos poseen una humedad del 90%, el material seco y triturado posee 5,9% de humedad. Análisis físico del material con modificación superficial: con el incremento en la temperatura va perdiendo agua y volátiles, hemilcelulosa, celulosa y lignina. Análisis químico: presencia mayoritaria de potasio, calcio, cloro, manganeso y aluminio, no se halló presencia de plomo y cadmio. Reacciones de complejación con aminoácidos le permiten ligar metales. Resultados medida de</p>	<p>Se concluye que <i>E. crassipes</i> seca y molida, por ser un material de constitución lignocelulósica y por consiguiente altamente hidrofílica, es muy efectiva como adsorbente de Pb y Cr presente en soluciones. La <i>E. crassipes</i> puede ser utilizada como adsorbente de metales pesados en aguas residuales, no sólo en procesos de fitorremediación, sino también aprovechando su biomasa seca. Se concluyó que como material adsorbente, la planta no requiere de mayores tratamientos además del molido fino, puesto que el material tratado no mostró un incremento en la adsorción de plomo.</p>
----	---	---------	----------	-----------------------------	------	--	--	-------------------------	--	--	--





13	<p>Estudio comparativo de la capacidad de acumulación para cadmio y plomo de <i>Scirpus californicus</i> (Totora) y <i>Stypa ichu</i> (Ichu) bajo condiciones hidropónicas</p>	Español	Perú	Díaz, L. y Peralta, L.	2017	<p>OG: Realizar un estudio comparativo de la capacidad de acumulación de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en <i>Scirpus californicus</i> (Totora) y <i>Stypa ichu</i> (Ichu) bajo condiciones hidropónicas. OES: Determinar la respuesta morfo fisiológica de las plantas frente a la exposición de cadmio y plomo. Evaluar las concentraciones de ambos metales en tallos y raíces de ambas plantas. Determinar la especie con mejor capacidad de acumulación y menor daño producido frente a la exposición a ambos metales.</p>	<p><i>Scirpus californicus</i> (Totora) y <i>Stypa ichu</i> (Ichu)</p>	<p>cadmio (Cd) y plomo (Pb)</p>	<p>La metodología consistió en la recolección de <i>Stypa ichu</i> y <i>Scirpus californicus</i> de sus hábitats naturales, considerando 40 ejemplares de mediana edad y buen crecimiento radicular de cada especie que luego fueron cuidadosamente trasladadas hacia un invernadero de sistema hidropónico con condiciones de exposición reguladas: cantidad de luz, temperatura y aireación; protección frente a precipitaciones, vientos, etc. Se adaptó un medio de cultivo específico que brinde las condiciones adecuadas para el correcto crecimiento de las plantas. El diseño del tratamiento consistió: Tratamiento 1: adición de Pb soluble: 20, 50 y 80 ppm. Tratamiento 2: adición de Cd soluble: 20, 50 y 80 ppm. Tratamiento 3: adición de Pb y Cd solubles: 20, 50 y 80 ppm. Para cada especie evaluada se utilizó una bandeja conteniendo tres (03) ejemplares de la misma especie por cada concentración y se realizaron los tres tratamientos. El registro de información (pH, temperatura y absorción) se realizó de forma diaria y semanal. La operación duró 34 días.</p>	<p>Resultados de acumulación de plomo (Pb) en <i>Scirpus californicus</i>: Tratamiento 1: a 20 ppm se dio el mayor porcentaje de absorción total: 5,924% (3,47% en raíces y 2,44% en tallos), observándose mayor retención en las raíces. La acumulación de plomo no generó cambios severos en el color, crecimiento y grosor de la planta salvo una pequeña coloración amarillenta en el ápice y margen de las hojas. Resultados de acumulación de cadmio (Cd) en <i>Scirpus californicus</i>: Tratamiento 2: en general la acumulación de cadmio (Cd) en la totora fue muy baja, el mayor porcentaje de absorción a 20 ppm fue de 0,2% (0,08% en raíces y 0,11% en tallos) esto indica que la</p>	<p>Se concluye que el tiempo de exposición a los metales pesados en ambas especies provocó un deterioro progresivo en sus raíces y tallos, siendo el cadmio (Cd) el más perjudicial. Se obtuvo que la mayor absorción de ambos metales de dio en las raíces. <i>Scirpus californicus</i> demostró un buen crecimiento y potencial para la acumulación de metales pesados.</p>
----	--	---------	------	------------------------	------	---	--	---------------------------------	---	---	---



14	Capacidad acumuladora de cadmio en raíces de <i>Scirpus californicus</i> expuesta a diferentes concentraciones de nitrato de cadmio en condiciones de laboratorio	Español	Perú	Fernández, L.	2013	OB: Determinar la capacidad acumuladora de cadmio en raíces de <i>Scirpus californicus</i> (Totora) expuesta a diferentes concentraciones de cadmio en solución a partir del nitrato de cadmio en condiciones de laboratorio.	<i>Scirpus californicus</i> (Totora)	cadmio (Cd)	La metodología consistió en la recolección aleatoria de 100 unidades de Totora adultas extraídas de un humedal en la localidad de Moche. Luego fueron trasladadas hacia el laboratorio. La etapa de adaptación y aclimatación duró 30 días. Para el proceso experimental se utilizaron las yemas o raíces de aproximadamente 5 - 7 centímetros de longitud. El proceso experimental consistió de cinco (5) tratamientos a diferentes concentraciones: 0, 0.5, 1, 1.5 y 2 ppm. Se realizaron diez repeticiones por concentración instalándose una plántula en cada unidad experimental durante un tiempo de 15 días.	Resultados de absorción de cadmio (Cd) en raíces de <i>Scirpus californicus</i> : valores porcentuales de acumulación: T1 (0 ppm): 0%; T2 (0.5 ppm): 81,16%; T3 (1.0 ppm): 79,06%; T4 (1.5 ppm): 75,73%; T5 (2.0 ppm): 77,84%. Los resultados permiten deducir que la planta posiblemente tolere concentraciones mayores a 2 ppm adecuándose para seguir bioacumulando. Sin embargo, los resultados también reportan cambios en la morfología de las plantas, cambios de color y crecimiento como consecuencia de la toxicidad, disminuyendo la acumulación de cadmio sin embargo, se reporta también engrosamiento de las raíces como adaptación al estrés propiciado una hiperacumulación de cadmio. Frente a	Se concluye que, altas concentraciones de cadmio (Cd) puede inhibir el crecimiento y la elongación de las raíces de <i>Scirpus californicus</i> propiciando un engrosamiento radicular como estrategia de adaptación a la toxicidad para seguir acumulando al metal. <i>Scirpus californicus</i> tiene capacidad de tolerar, sobrevivir y acumular altas concentraciones de cadmio sin embargo según el grado de exposición al cadmio (Cd) se aprecian cambios de color en las plantas, crecimiento y engrosamiento de raíces.
----	---	---------	------	---------------	------	---	--------------------------------------	-------------	---	---	--

										esto, el 24% de las plantas presentaron un incremento en la aparición de nuevas raíces específicamente en T1, T2 y T3 donde la exposición al cadmio fue menor. Por otro lado, el 23% y 13% (T4 y T5) evidenciaron un incremento en la longitud radicular (engrosamiento de raíces) debido a una mayor exposición de cadmio.	
15	Evaluación de la planta <i>Scirpus californicus</i> (Totora) en la eficiencia de remoción de hierro en un prototipo de humedal construido de flujo superficial	Español	Perú	Cuadrado, W., Vicuña, C. y Torres, E.	2015	OG: Evaluar la eficiencia de remoción de hierro (Fe) con la planta <i>Scirpus californicus</i> en un prototipo de humedal construido de flujo libre o superficial. OE'S: Determinar la eficiencia del sistema en la remoción de hierro de la solución. Determinar la absorción de hierro por la raíz - rizomas, tallo sumergido y tallo aéreo de la especie <i>Scirpus californicus</i> .	<i>Scirpus californicus</i> (Totora)	hierro (Fe)	La metodología consistió de la construcción del prototipo de humedal artificial donde se implantaron noventa (90) plantas de <i>Scirpus californicus</i> recogidas en los alrededores de una comunidad en Tarma. Se seleccionaron los ejemplares que contaban con buen tamaño y estado físico de raíz, rizoma, tallo sumergido y tallo aéreo. El efluente estuvo constituido por 480 L de solución a 5.0 mg/L de hierro. El diseño experimental constó de cuatro (04) tratamientos: T1: análisis de hierro en raíz-rizoma, tallo sumergido y tallo aéreo (partes estudiadas) inicialmente. T2: análisis de hierro en	Resultados: Determinación de la eficiencia de remoción de hierro (Fe) por parte del sistema: valor porcentual de hierro eliminado de la solución inicial: T1: 0%, T2: 17,6%, T3: 30% y T4: 47,2%. Se observa que, el mayor porcentaje de remoción de hierro de la solución se dio a los 12 días de tratamiento. Determinación de la absorción de hierro (Fe) por parte de la planta (raíz-rizoma, tallo sumergido y aéreo): valor	Se concluye que la mayor remoción de hierro (Fe) de la solución inicial a través del humedal artificial implantado con <i>Scirpus californicus</i> se dio a los 12 días (T4) y donde la mayor acumulación de hierro se dio en la raíz-rizoma de las plantas seguido por el tallo sumergido y el tallo aéreo. De esto se puede dilucidar como el metal es transportado a través de la planta hacia sus partes superiores y como la raíz y rizoma tienden a acumular más metal. Se

								partes estudiadas después de 04 días. T3: análisis de fierro en partes estudiadas después de 08 días y T4: análisis de fierro en partes estudiadas después de 12 días.	porcentual de acumulación de fierro (Fe) en compartimentos estudiados luego de 12 días (T4): Raíz-rizoma: 22,74%; Tallo sumergido: 37,06% y Tallo aéreo: 36,67%.	concluye también que Scirpus californicus es una planta con capacidad bioacumuladora, siendo este un proceso natural que permite el desarrollo de las plantas.
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

16	Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales	Español	Perú	Pulcha, J. y Valencia, M.	2019	<p>OG: Evaluar la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas residuales por medio de humedales artificiales. OE'S: Proponer un diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. Evaluar la disminución de la concentración de contaminantes en las aguas residuales.</p>	<p><i>Scirpus californicus</i> (Totora) y <i>Phragmites australis</i> (Carrizo)</p>	<p>cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn)</p>	<p>La metodología consistió en la construcción de un sistema compuesto por celdas que simula un humedal artificial. Cada celda fue subdividida en dos subceldas en las cuales se implantó: Totora y Carrizo por separado respectivamente y el tiempo de adaptación fue de una semana. El sustrato utilizado fue piedra chancada en la base donde se enraizaron las plantas. En la celda número 2, 3 y 4 se cuantificó el contenido de cobre, zinc y plomo respectivamente. El efluente a tratar fue una solución artificial. Se tomaron muestras durante los siete (7) días que duro el experimento. Adicionalmente se evaluaron muestras luego de once (11) días más para determinar tendencias de remoción.</p>	<p>Los resultados obtenidos por pruebas de absorción atómica para determinar la concentración de metales pesados en el efluente durante la operación del sistema: <b>Metal cobre (Cu)</b>: Se obtuvo que la concentración de cobre del efluente artificial en los sistemas con <i>Phragmites australis</i> fue decreciendo a medida que avanzaron los días, obteniéndose la remoción máxima: 99,6% al sexto día. Luego de once días adicionales, se llegó a un valor máximo de 99,7%. La concentración de cobre del efluente artificial en los sistemas con <i>Scirpus californicus</i> fue decreciendo a medida que avanzaron los días, obteniéndose la remoción máxima: 99,9% al cuarto día, siendo probable que la planta llegase a su punto de</p>	<p>Se concluye que: <i>Phragmites australis</i> tuvo mayor capacidad depuradora para el metal zinc (Zn) y que <i>Scirpus californicus</i> tuvo mayor capacidad depuradora para el metal cobre (Cu). La remoción de cobre (Cu) obtuvo resultados más favorables y estables durante el tratamiento siendo la Totora más eficiente. La remoción de zinc (Zn) fue más eficiente con el Carrizo, Totora alcanzó valores de remoción mayores que para el cobre, sin embargo, la consistencia en la depuración en ambos casos es menor. La remoción de plomo (Pb) fue más efectiva para el Carrizo (biotipo más resistente), ambas especies lo removieron al primer día. La toxicidad del plomo hace ambas plantas no puedan retenerlo en el tiempo. En un sistema de humedal artificial ambas plantas brindan estabilización en la remoción y la</p>
----	---	---------	------	---------------------------	------	--	---	---	---	--	--

										<p>           saturación (adsorción máxima), luego de once días adicionales la remoción se mantuvo constante.         </p> <p> <b>Metal zinc (Zn):</b>            Se obtuvo que la concentración de zinc del efluente artificial en los sistemas con <i>Phragmites australis</i> fue decreciendo a medida que avanzaron los días, obteniéndose la remoción máxima: 99,78% al cuarto día. La concentración de zinc del efluente artificial en los sistemas con <i>Scirpus californicus</i> fue decreciendo a medida que avanzaron los días, obteniéndose la remoción máxima: 99,72% al segundo día. Sin embargo, una vez alcanzado el pico de remoción, el Carrizo y la Totorá detuvieron la acumulación de zinc para luego devolver el metal al         </p>	<p>           magnifican al ser tolerantes y propiciar mecanismos de adsorción, fitoextracción y volatilización, además de ser soporte a bacterias tolerantes a la acumulación de metales en sus células.         </p>
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--





17	Optimización de la fitorremediación de mercurio en humedales de flujo continuo empleando <i>Eichhornia crassipes</i> "Jacinto de agua"	Español	Perú	Paredes, J. y Ñique, M.	2016  OG: Estudiar la remoción de mercurio divalente ( $Hg^{+2}$ ) con la especie <i>Eichhornia crassipes</i> en tres medios con rango de pH diferentes. OE's: Evaluación de la concentración de nutrientes apropiada para el crecimiento de la planta. Evaluación de la adaptación de la planta a tres diferentes medios de pH (ácido, neutro y básico) sometiéndola a concentraciones crecientes de mercurio. Determinación del porcentaje de remoción de mercurio a diferentes concentraciones del metal en solución (0,05 ppm - 0,5 ppm) en los tres medios de pH. Evaluación de la variación en la capacidad de remoción de mercurio de la planta en intervalos regulares de tiempo (cada hora durante once horas). Determinar la remoción total de mercurio en un sistema de humedal artificial de flujo continuo a escala de laboratorio.	<i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua)	mercurio (Hg)	La metodología consistió de distintas fases en función a los objetivos trazados: <b>Aplicación de nutrientes:</b> Se prepararon soluciones de nitrato de potasio a distintas concentraciones (0-50-100-150-200 ppm) colocándose una planta de Jacinto de agua en cada unidad de estudio durante diez (10) días. <b>Exposición elevada al tóxico:</b> Se prepararon soluciones con mercurio (Hg) al 1-3-5 ppm y se colocaron las plantas para evaluar su tolerancia. Se reguló el pH de los medios a ácido, neutro y básico. <b>Tratamiento a diferentes medios de pH:</b> Se configuraron cinco (05) tratamientos (soluciones: 0-0,05-0,1-0,2-0,3-0,5 ppm de mercurio) durante diez (10) días. Se implantó una planta de Jacinto de agua por cada unidad de estudio. Se ajustó el pH a ácido, neutro y básico, cambiantes durante el tiempo de evaluación (capacidad buffer de la planta). <b>Evaluación de remoción de Hg a intervalos de tiempo iguales:</b> Utilizando una solución de Hg a 0,2 ppm y dos (2) plantas en cada unidad de estudio se realizó el tratamiento, se tomaron muestras cada hora durante once horas. Finalmente, se	Se obtuvieron resultados en función a los objetivos establecidos: <b>Efecto de la aplicación de nutrientes en el desenvolvimiento de la planta:</b> La dosis óptima reportada fue 150 ppm de nitrato de potasio; evidenciándose el mayor tamaño de raíz: 7,6 cm. Las raíces ejercen el efecto fitodepurador, a su vez alojan microorganismos que potencian la extracción del metal. <i>E. crassipes</i> demostró una excelente capacidad de soportar y extraer el Hg sin que los altos niveles de nutrientes afecten el proceso (competencia de ambos por sitios de adsorción y limitación de la biodisponibilidad por formación de complejos competidores entre sí). <b>Efecto del incremento en la</b>	Se concluye que <i>Eichhornia crassipes</i> presenta una gran capacidad de amortiguamiento del pH en los medios ácidos y básicos, sin embargo, a mayor concentración del metal se afecta la capacidad buffer de la planta. En el medio básico se logró la mayor remoción porcentual de mercurio esto corroborado en un mayor peso de las raíces a medida que aumentó la concentración de mercurio, evidenciándose la absorción. La cinética de remoción con Jacinto, no fue proporcional a lo largo del periodo de evaluación explicado por el punto de saturación de la adsorción y la variación en la rapidez de bioacumulación.
----	--	---------	------	-------------------------	--	---	---------------	---	---	--

								<p>aplicó el tratamiento en un humedal artificial piloto de flujo continuo con efluente artificial (12,5 ppm Hg) con pH alcalino, para evaluar la eficiencia del sistema.</p>	<p><b>exposición al Hg en el pH:</b> El medio de estudio con pH neutro tendió a disminuir ligeramente a mayor concentración de Hg. El medio ácido tendió a aumentar su pH, sin embargo, a mayor concentración disminuye la capacidad de neutralización del sistema. El medio básico disminuye su pH, no obstante, a mayor concentración de Hg se ralentiza este proceso. Por tanto, a medida que se da el proceso de adsorción del tóxico se tiende a neutralizarse el pH (aproximadamente 7,2) pero a mayor exposición (se afecta el equilibrio de neutralización).</p> <p><b>Efecto del medio con pH variado en la remoción de mercurio:</b> En el medio básico (pH: 9) se obtuvo el porcentaje de remoción más alto: 94,67% donde a</p>
--	--	--	--	--	--	--	--	---	--





18	Efficiency of <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha latifolia</i> for heavy metal removal from wastewater	Inglés	India	Kumari, M. y Tripathi, B.	2015	<p>OG: Evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados de las especies <i>Phragmites australis</i> y <i>Typha latifolia</i> cultivadas solas y en conjunto. OE's: Determinar la remoción de metales pesados de ambas especies por separado. Determinar la remoción de metales pesados de ambas especies en cultivos mixtos. Determinar la relación entre el tiempo de retención y la remoción de metales pesados.</p>	<i>Phragmites australis</i> y <i>Typha latifolia</i>	cobre (Cu), cadmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni), hierro (Fe), plomo (Pb) y zinc (Zn)	<p>La metodología consistió en la recolección de aguas residuales urbanas mezcladas con efluentes industriales sin tratar de cinco puntos de monitoreo en la ribera del río Ganges en India para ser tratadas en biofiltros tipo batch. Se implementaron cuatro (04) biofiltros como unidades de tratamiento: T1: Únicamente con <i>Phragmites australis</i>, densidad de 40 plantas/m<sup>2</sup>. T2: Únicamente con <i>Typha latifolia</i>, densidad de 40 plantas/m<sup>2</sup>. T3: Mixto de <i>Phragmites australis</i> con <i>Typha latifolia</i>, densidad de 20 plantas/m<sup>2</sup> respectivamente por donde fluyó el agua colectada durante un período de 14 días. El T4 (blanco) no llevó ninguna planta y solo se evaluó la remoción metálica por precipitación. Las plantas fueron aclimatizadas durante 7 días en agua destilada para ser sembradas en los biofiltros con 50 litros de agua residual. Se tomaron muestras diarias a partir del día 06 al 14. Las plantas fueron secadas, molidas y digeridas.</p>	<p>Resultados: Rol de las plantas en la remoción de metales pesados: <i>Phragmites australis</i> (Cu: 57%; Fe: 56,1%; Ni: 55,8%; Zn: 55,1%; Cr: 51,2%; Pb: 45,7% y Cd: 43,3%), <i>Typha latifolia</i> (Fe: 52,6%; Zn: 52,4%; Cu: 51,4%; Cr: 45,6%; Pb: 40% y Cd: 39,7%), Cultivo mixto <i>P. australis</i> + <i>T. latifolia</i> (Ni: 61%; Cu: 60,9%; Fe: 59,3%; Zn: 58,7%; Cr: 58,2%; Pb: 53,6% y Cd: 48,1%). Los valores de remoción más elevados para los metales: Cu, Cd, Cr, Ni, Fe, Pb y Zn se dieron en el cultivo mixto. Los valores de remoción menores se dieron únicamente con <i>T. latifolia</i>. Los excelentes porcentajes de remoción obtenidos con el cultivo mixto puede deberse a un incremento en la rizosfera propiciado por ambas especies lo cual proporciona</p>	<p>Conclusiones según objetivos específicos: 1) La mejor eliminación de metales pesados se dio con el cultivo mixto, una rizosfera mixta de ambas especies potenció el crecimiento de microorganismos, la inmovilización del metal y la absorción de las plantas. En el monocultivo, <i>P. australis</i> se desempeñó mejor que <i>T. latifolia</i> para remover: Cu, Cd, Cr, Fe, Ni, Pb y Zn. 2) Se evidenció una relación positiva entre el tiempo de contacto y la remoción de los metales hasta llegar a un punto de estancamiento (día 14). 3) El cálculo del balance de masa permitió demostrar que la cantidad de metal retirado del agua residual se presentó en el cuerpo de las plantas cosechadas y en la precipitación natural de óxidos. 4) <i>Phragmites australis</i> demostró mayor capacidad para capturar: cobre (Cu),</p>
----	--	--------	-------	---------------------------	------	--	--	---	--	--	--



19	Tratamiento de aguas residuales mineras contaminadas con cobre mediante Lemna minor (lenteja de agua)	Español	Perú	Ávila, G.; Velit, C.; Ávila, L.; Rosales, S.; Manchego, A. y Mora, J.	2018	OB: Evaluar la fitorremediación del ión cobre mediante la especie hidrófila lenteja de agua ( <i>Lemna minor</i> ) en el tratamiento de aguas residuales mineras.	<i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua)	cobre (Cu)	<p>La metodología consistió en la preparación de un agua residual sintética emulando los altos valores reportados en el río Yauli, Junín, la solución artificial contenía cobre (Cu) a 4,780 ppm. La planta <i>Lemna minor</i> fue recolectada de una laguna en Huancayo. Proceso experimental: En un humedal artificial se drenaron 47 L de solución al 4,780 ppm de cobre (Cu) junto con una mezcla de nutrientes para estimular el crecimiento de la Lenteja de agua. La especie vegetal fue colocada en el humedal con el agua residual sintética por un periodo de adaptación de cinco (05) días antes de iniciar la toma de muestras. La toma de muestras se realizó cada siete (07) días hasta reportar concentraciones de cobre (Cu) iguales (estancamiento en la remoción).</p>	<p>Resultados: La menor concentración de cobre en el agua residual fue de 1,502 ppm Cu reportada en la muestra número cinco es decir al día 28 (cuatro semanas de contacto). Las muestras siguientes obtuvieron el mismo valor por lo que se asume la estancamiento en la absorción del metal. El porcentaje de remoción calculado al día 28 es de 68,57%.</p>	<p>Con una eficiencia de 68,57% en la remoción de cobre (Cu) de una solución acuosa se concluye que <i>Lemna minor</i> es una planta con una capacidad considerable de capturar el ión cobre.</p>
----	---	---------	------	---	------	---	--------------------------------------	------------	--	--	---

20	Evaluación de un sistema de fitorremediación para la remoción de cromo hexavalente (Cr <sup>+6</sup> ) y materia orgánica empleando como modelo de estudio aguas residuales sintéticas	Español	Colombia	Carreño, M.	2014	OG: Evaluar la capacidad que tiene la macrófita <i>Lemna minor</i> para disminuir las cargas de cromo hexavalente y materia orgánica en aguas residuales sintéticas que se asemejan a las aguas residuales procedentes de termoeléctricas. OEs: Estudiar la capacidad de remoción de cromo hexavalente de la especie <i>Lemna minor</i> de un efluente artificial. Examinar la asimilación de materia orgánica de la planta en presencia de cromo hexavalente. Evaluar la influencia de la densidad poblacional de la planta frente a la remoción del metal y la asimilación de materia orgánica. Diseñar un sistema de fitorremediación a escala para tratar el efluente original.	<i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua)	cromo hexavalente (Cr <sup>+6</sup> )	La metodología consistió en la utilización de tres (03) unidades tipo batch para el tratamiento de aguas residuales sintéticas a través de plantas de la especie <i>Lemna minor</i> . Evaluándose el crecimiento de la biomasa (densidad poblacional), la disminución en la concentración del cromo hexavalente y la reducción de materia orgánica (ácido húmico). El experimento consistió de dos fases: Experimentación inicial para determinar la configuración de parámetros óptimos para consolidar el mayor porcentaje de remoción del metal, con toma de muestras a los 0, 3, 6 días y Experimentación final con ajuste de optimización y toma de muestras a las 0, 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 192, 240 horas. La operación del sistema inició luego de 5 días de adaptación del cultivo de <i>Lemna minor</i> estimulado (nutrientes) con medios de cultivo. El cromo fue dosificado al sistema de partir de una solución artificial.	Resultados: se logró determinar experimentalmente que la concentración inicial de cromo hexavalente y del ácido húmico influyen directamente en el porcentaje de remoción metálico. El mayor porcentaje de remoción fue de 52,71% al sexto (06) día de contacto y a parámetros de: 160 mg/L de ácido húmico y una biomasa de 45 plantas. Bajas concentraciones (entre 0,5 - 2,0 mg/L Cr <sup>+6</sup> ) del metal no producen un efecto tóxico severo e inhibitorio en las plantas, presentándose una adaptación rápida y crecimiento normal. <i>Lemna minor</i> remueve de manera más eficiente el cromo hexavalente a altas concentraciones de ácido húmico y baja biomasa plantar, esto debido mediado por los sitios activos para	Se concluye que la especie <i>Lemna minor</i> se puede utilizar como una herramienta efectiva, sencilla y económica para descontaminar agua residual con trazas de cromo hexavalente, claro está salvando los parámetros de control descritos (concentraciones, cantidades y tiempos) para propiciar la máxima remoción dentro de un sistema de tratamiento pasivo (biofiltro o humedal artificial).
----	--	---------	----------	-------------	------	---	---	---------------------------------------	--	---	--



### Anexo N°3: Matriz de Consistencia

**TÍTULO: “Análisis de la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* en el tratamiento de efluentes con metales pesados, 2022.”**

PROBLEMA	HIPOTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
¿Cuál es la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas <i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Phragmites australis</i> y <i>Scirpus californicus</i> en el tratamiento de efluentes con metales pesados, 2022?	Implícita	<p><b>General:</b></p> <p>Analizar la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas: <i>Eichhornia crassipes</i>, <i>Lemna minor</i>, <i>Typha latifolia</i>, <i>Phragmites australis</i> y <i>Scirpus californicus</i> en el tratamiento de efluentes con metales pesados.</p> <hr/> <p><b>Específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar a las especies macrófitas: <i>Eichhornia crassipes</i>, <i>Lemna minor</i>, <i>Typha latifolia</i>, <i>Phragmites australis</i> y <i>Scirpus californicus</i> para el tratamiento de efluentes con metales pesados.</li> <li>• Analizar la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas: <i>Eichhornia crassipes</i>, <i>Lemna minor</i>, <i>Typha latifolia</i>,</li> </ul>	<p><b>Variable 1:</b></p> <p>Especies macrófitas</p> <hr/> <p><b>Variable 2:</b></p> <p>Efluentes con metales pesados</p>	<p><b>Tipo de investigación:</b></p> <p>Descriptiva</p> <p><b>Diseño:</b></p> <p>No experimental – transversal</p> <p><b>Técnica:</b></p> <p>Registro de datos y análisis documental</p> <p><b>Instrumento:</b></p> <p>Ficha de registro</p>	<p><b>Población:</b></p> <p>Universo de casi 50 investigaciones comprendidas entre tesis de pregrado, grado y artículos de investigación científica, recolectadas preliminarmente a través de términos clave como fitorremediación, macrófitas, metales pesados y</p>

*Phragmites australis* y *Scirpus californicus* para el tratamiento de efluentes con metales pesados.

- Determinar el potencial de fitorremediación de las especies macrófitas: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* en el tratamiento de efluentes con metales pesados.

**Método de análisis de datos:**

Se empleará el programa Estadístico Microsoft Excel 2016, para la elaboración de matrices y el tratamiento estadístico de datos.

humedales artificiales.

**Muestra:**

Totalidad de 20 investigaciones seleccionadas que cumplan con utilizar únicamente o en conjunto las cinco especies macrófitas escogidas (*Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus*

---

*californicus*), como  
unidad de análisis.

---

## Anexo N°4: Matriz de Operacionalización de Variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>VARIABLE DEPENDIENTE:</b>  Efluentes con metales pesados	Son cualquier flujo regular o estacional de sustancia líquida descargada a cuerpos receptores; provenientes de labores mineras, industriales, entre otras; donde el denominador común es la presencia de trazas de metales pesados con un alto potencial de impactar el ambiente y la salud. (MINAM, 2010).	Los efluentes cargados con trazas de metales pesados en general, ocasionan impactos ambientales en los componentes receptores y salud; efluentes como el drenaje de minas, lixiviados, escombreras y aguas residuales industriales, varían en la magnitud del impacto dependiendo de la composición y actividad de la cual hayan derivado. (Spena Group, 2019).	- Calidad de agua	Resultados de investigaciones científicas sobre el tratamiento de efluentes con metales pesados, a través de sistemas implantados con plantas macrófitas; valiéndose del proceso de depuración denominado fitorremediación.
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE:</b>  Especies macrófitas	Las macrófitas acuáticas son plantas que se adaptan a los medios húmedos o acuáticos, estos se designan	La fitorremediación es una técnica a través de la cual se utilizan las plantas y los microorganismos con el fin de	-Niveles de remoción o depuración.  -Valores o concentraciones de	Resultados de investigaciones científicas sobre el tratamiento de efluentes con metales

---

<p>en un grupo funcional de vegetales muy heterogéneo desde el punto evolutivo, además, es considerado importante en las cadenas tróficas de los ecosistemas acuáticos. Este grupo abarca grupos tan distintos como plantas vasculares acuáticas, briófitos, carófitos y algas filamentosas (Cirujano et al, 2010).</p>	<p>descontaminar los compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos y así poder recuperar el medio en el que se emplee; en ese sentido, las plantas pueden considerarse como sistemas naturales de extracción y tratamiento de contaminantes (Delgadillo et al, 2011).</p>	<p>parámetros inorgánicos específicamente metales pesados. -Estabilización del potencial de hidrógeno.</p>	<p>pesados, a través de sistemas implantados con plantas macrófitas; valiéndose del proceso de depuración denominado fitorremediación.</p>
---	--	--	--

---