



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Revisión Sistemática: Fitorremediación empleando plantas
hiperacumuladoras acuáticas para la eliminación de
metales pesados en aguas contaminadas**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental

AUTORES:

Huaraca Huaman, Andrea (ORCID: 0000-0002-1983-0704)

Lujan Espinoza, Carlos Raúl (ORCID: 0000-0002-3074-580X)

ASESOR:

Dr. Sernaqué Auccahuasi, Fernando Antonio (ORCID: 0000-0003-1485-5854)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA - PERÚ

2020

Dedicatoria

Dedicado a nuestros padres, por habernos forjado como las personas que somos en la actualidad, por apoyarnos en este proyecto, por la motivación que nos dan y a nuestros profesores por ayudarnos y asesorarnos.

Agradecimiento

Agradecemos a Dios, que con su bendición nos guía por el buen camino, por ser nuestro apoyo y fortaleza. Gracias a nuestros padres por apoyarnos y motivarnos a cumplir nuestros sueños y metas. Agradecer a nuestros docentes de la escuela de Ing. Ambiental, por compartir sus conocimientos, dedicación y el apoyo hacia nosotros.

ÍNDICE

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Dedicatoria | ii |
| Agradecimiento..... | iii |
| Resumen | vi |
| Abstract | vii |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. MARCO TEÓRICO | 11 |
| III. METODOLOGÍA..... | 21 |
| 3.1. Tipo y diseño de investigación | 21 |
| 3.2. Categoría, Subcategorías y matriz de categorización apriorística | 23 |
| 3.3. Escenario de estudio | 24 |
| 3.4. Participantes..... | 25 |
| 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos | 26 |
| 3.6. Procedimientos..... | 27 |
| 3.7. Rigor científico..... | 28 |
| 3.8. Método de análisis de información..... | 29 |
| 3.9. Aspectos éticos..... | 30 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 31 |
| V. CONCLUSIONES..... | 42 |
| VI. RECOMENDACIONES..... | 43 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 45 |
| ANEXOS | |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Tabla 1: Tabla de Antecedentes | pág. 5 |
| Tabla 2: Matriz de categorización apriorística | pág. 18 |
| Tabla 3: Beneficios y Limitaciones de la Fitorremediación | pág. 27 |
| Tabla 4: Especies macrófitas acuáticas y su potencial para descontaminar metales pesados | pág. 31 |

Resumen

Durante años la calidad de agua ha sido perturbada por diferentes contaminantes procedente de las actividades antropogénicas. Si bien es cierto, existen diversos tratamientos desarrollados, pero en la actualidad se debería buscar métodos con un enfoque innovador y sostenible. La fitorremediación resultaría ser un método potencial para proporcionar una alternativa a las tecnologías que ahora se emplean para el tratamiento de aguas, debido a ello se plantea como objetivo lo siguiente, analizar los aspectos más relevantes de la fitorremediación para la eliminación de aguas contaminadas con metales pesados, y para ello se realizó una búsqueda de información de diversos autores donde se lograron observar los beneficios y limitaciones de esta tecnología, como sus bajos costos frente a otras tecnologías, también se logró hallar información acerca de estudios recientes como combinación de tecnologías, modificación genética y el aprovechamiento de la biomasa vegetal de las macrofitas y finalmente acerca de los factores que determinarían la eficiencia de esta técnica. Finalmente se demostró que la fitorremediación es una tecnología muy sustentable para la eliminación de metales pesados de medios acuáticos y que sería una solución, no obstante, aún existen vacíos por investigar y así completar esta falta de información.

Palabras clave: fitorremediación en agua, perspectiva de la fitorremediación, macrófitas acuáticas, contaminación de agua, metales pesados.

Abstract

For years the quality of water has been disturbed by different pollutants from anthropogenic activities. Although it is true, there are various treatments developed, but currently methods with an innovative and sustainable approach should be sought. Phytoremediation would turn out to be a potential method to provide an alternative to the technologies that are now used for water treatment, due to this the following objective is proposed, to analyze the most relevant aspects of phytoremediation for the elimination of water contaminated with metals. heavy, and for this, a search for information from various authors was carried out where the benefits and limitations of this technology were observed, such as its low costs compared to other technologies, it was also found information about recent studies such as combination of technologies, modification genetics and the use of macrophytes plant biomass and finally about the factors that determine the efficiency of this technique. Finally, it was shown that phytoremediation is a very sustainable technology for the removal of heavy metals from aquatic environments and that it would be a solution, however, there are still gaps to be investigated and thus complete this lack of information.

Keywords: water phytoremediation, phytoremediation perspective, aquatic macrophytes, water pollution, heavy metals.

I. INTRODUCCIÓN:

La contaminación de recursos suelo, aire y agua con metales pesados, en su mayoría altamente tóxicos, por las diferentes actividades humanas ha llegado a ser un problema ambiental desafiante a nivel mundial ya que estos pueden permanecer en el medio ambiente durante un tiempo prolongado por lo que pasaría a ser una amenaza no solo para los humanos sino también, afectaría a todos los microorganismos presentes en el planeta (Asgari, Ghorbanpour y Nikabadi,2017, p.378). Además, a lo largo de estos años las actividades industriales han liberado metales pesados de forma desmesurada tales como cromo (Cr), cadmio (Cd), Zinc (Zn), Níquel (Ni), Arsénico (As), Plomo (Pb) y Mercurio (Hg) que a menudo se encuentran en los cuerpos de aguas residuales industriales. En este caso, las actividades industriales como las fundiciones, petroleras, minerías, curtiembres, metalizados, producción de pinturas y plaguicidas son algunas de las que más generan estos metales (Asgari, et al.,2019, p.142).

Cabe mencionar que, el agua es recurso esencial para la vida por lo que verter de manera directa estos contaminantes que contienen iones de metales tóxicos, no tóxicos y otra serie de componentes conduciría a alteraciones y secuelas en la salud de los humanos como cáncer, degradación de neuronas, el cólera, fiebre tifoidea, gastroenteritis, diarreas, problemas de piel, entre otros (Haseena, et al.,2017, p.17). Por otra parte, en las plantas lo que se ve afectado principalmente es su metabolismo, esto conlleva a un déficit en cuanto a su crecimiento, rendimiento de la cosecha y su producción de biomasa. Debido a eso, es que se han buscado fuentes y métodos que permitan obtener una sostenibilidad de tal forma que se pueda reducir los contaminantes presentes en el ecosistema creando así mecanismos de remediación ambiental (Jeevanantham, et al.,2019, p.266).

Asimismo, en pleno siglo XXI, la disponibilidad de los recursos hídricos llega a ser un tema de interés y preocupación no solo por los conocedores en esta materia, ni máximos representantes del país sino de la población en general,

que con el paso del tiempo ha logrado identificar y entender lo importante que es esterecurso para garantizar la vida del planeta (Lozano ,2018, p.5).

En este caso, en el Perú muchos de sus ríos tanto en la costa y la sierra están severamente afectados, que en este caso el motivo sería el desarrollo de las actividades industriales principalmente la minería, esto lamentablemente se viene presentando en todos los cursos de agua que se encontrarían aledaños asus áreas de operaciones o en otras ocasiones después de que cierre o abandonen sus instalaciones, esto ha provocado un deterioro en la calidad de las aguas y perdida de especies hidrobiológicas (Villena, 2018p.305).

De manera que, ANA (2017) menciona que las mayores descargas de aguas residuales respecto al sector minero se realizan en el mar, laguna, quebrada y ríos. Siendo estos dos últimos los más impactados por dicho sector ya que en promedio, los ríos reciben 145.39 hm³ y las quebradas 73.86 hm³ por año. Luego está las lagunas con 28.78 hm³ y el mar 4.30 hm³ por año. Por otra parte, identificaron que anualmente se vierte 110 toneladas de cobre, 22 toneladas dearsénico, 11 toneladas de cadmio, 44 toneladas de plomo y más de 331 toneladas de zinc principalmente sobre ríos y quebradas (p.18).

Por otro lado, existen diferentes métodos de tratamientos de aguas estos puedenser físicos, químicos y biológicos dentro de ellas tenemos lo que es el método de adsorción, intercambio iónico, electrocoagulación, floculación, filtración, extracción de fluido supercrítico, biorreactores de membrana, ósmosis inversa, electrodiálisis, precipitación, proceso de oxidación avanzada (Carolin, et al.,2017, p.9). Pero, muchos de estos tratamientos no implican un enfoque innovador, rentable y amigable con el ambiente para recuperar el área afectada.Por lo que entraría a realizar su función la fitorremediación, el cual emplea plantas y sus microorganismos asociados, con el fin de tratar in situ aguas contaminadas (Sarwar, et al.,2017, p. 714).

Sin embargo, existen variados desafíos para la técnica de fitorremediación en zonas contaminadas, tales como el impacto de la especificación de metales, las influencias de iones coexistentes y orgánicos, la selección ideal de especies de plantas y las condiciones de cultivo, el pH, la interacción de los metales, etc. (Selvakumar, et al.,2018, p.599). Así como también el período de tiempo en el que se realiza el proceso de la fitorremediación, la eliminación de desechos de biomasa, la capacidad de acumulación de plantas, el ataque de plagas y enfermedades en las plantas, la biodisponibilidad de iones metálicos, las especies de plantas invasoras y las prácticas agronómicas (Mahar, et al.,2016, p.114).

Teniendo en cuenta dicha problemática se tuvo como pregunta para esta investigación: ¿Cuáles son los aspectos más relevantes de la fitorremediación empleando plantas hiperacumuladoras acuáticas para la depuración de aguas contaminadas con metales pesados? De igual modo se formularon los siguientes problemas específicos: ¿Cuáles son los beneficios de aplicar la fitorremediación para restaurar el área contaminada?, ¿Cuáles son las limitaciones de aplicar la fitorremediación para restaurar el área contaminada?,¿Cuáles son los estudios recientes de la fitorremediación? y ¿Cuáles son los factores que van a determinar la eficiencia de la fitorremediación?

Por esta razón, el presente estudio se justificó debido a que en el Perú la actividad minera es uno de los principales pilares de la economía que se ha ido intensificando a gran escala como artesanal que, en este caso, es la que más contribuye con el deterioro del ambiente y la razón es que no tiene un mayor control de sus efluentes, y como consecuencia la contaminación de los cuerpos de agua en varias zonas del país (Villena, 2018 ,304 p.). Por lo tanto, se debería buscar y desarrollar una serie de alternativas que permitan aprovechar y aplicar la acción natural que se da en el ambiente para eliminar los contaminantes en los cuerpos de agua, de tal forma, se presente la oportunidad de recuperar los recursos que existen en el mismo para una futura

utilización adquiriendo un valoreconómico de esa forma permitirá lograr una sostenibilidad (Truu, et al.,2015, p.86).

Ya que, la mayoría de las metodologías resultan tener un elevado costo, demandan movilizaciones de terreno y tienden aplicar agentes químicos que a su vez podrían agregar problemas adicionales de contaminación (Khalid, et al.,2017, p.263). Bajo este contexto, se resalta que las plantas y los microbios tienen un gran potencial para realizar esta acción de eliminar estos contaminantes (Kumar, et al.,2017, p.5).

Además, complementando a lo anterior se ha encontrado especies vegetales nativas de zonas que han sido contaminadas y que estas desarrollaron a lo largodel tiempo cierta resistencia y tolerancia a estas sustancias toxicas, por lo que podrían pasar a ser excelentes candidatas para programas de fitorremediación, otorgando un beneficio en lo que es el tiempo, puesto que normalmente toma laadaptación de especies foráneas en el área a trabajar (Al-Thani y Yasseen, 2020,p.3). De la misma forma, resaltan que al elaborar la combinación de una o más técnicas tradicionales en conjunto con algunas otras aplicaciones o modificaciones podrían hacer que sea más eficaz en la aplicación de campo al eliminar las limitaciones de estrategias tradicionales (Kumar, et al.,2018, p.2175).Conforme a lo que se comentó hasta el momento, se establecieron los siguientesobjetivos de la investigación, siendo el objetivo general Analizar los aspectos más relevantes de la fitorremediación para la depuración de aguas contaminadascon metales pesados. De igual forma, se tuvo como objetivos específicos, explicar los beneficios de la fitorremediación para restaurar el área contaminada, explicar las limitaciones de la fitorremediación para restaurar el área contaminada, describir los estudios recientes respecto a la fitorremediación e identificar qué factores son los que determinaran la eficiencia de la técnica de fitorremediación.

II. MARCO TEÓRICO:

A continuación, presentaremos los siguientes antecedentes donde se emplea la técnica de fitorremediación y el uso de plantashiperacumuladoras acuáticas.

TABLA 1: Cuadro de Antecedentes

| N° | AUTOR Y AÑO | NOMBRE DE LA ESPECIE | DESCRIPCION | RESULTADOS |
|----|---------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Zhu, H., et al(2020) | <i>Festuca alta</i> | En este estudio aplicaron 2 fitohormonas relativas a la senescencia, el ácido abscísico y ácido salicílico para el fortalecimiento de la fitorremediación de cadmio por la <i>Festuca alta</i> .y todo esto en un cultivo hidropónico. | Ambas fitohormonas contribuían al transporte de metales pesados y que es una buena estrategia para la acumulación de cobre y zinc en los brotes de <i>Festuca altos</i> . |
| 2 | Michadel, Geoffrey (2019) | <i>Pteris vittata</i> | Se busca demostrar si el helecho <i>Pteris Vittata</i> puede tolerar e hiperacumular niveles de arsénico que son demasiado tóxicos | Esta planta hiperacumuladoras si puede lidiar con la toxicidad del arsénico pues los acumula en grandes proporciones y que la <i>P. viatta</i> tiene un sistema de desintoxicación muy bueno y es muy similar al arseniato bacteriano. |

| | | | | |
|---|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 | Xi n-Yu, Lan, et al(2019) | <i>M. pteropus</i> | Se emplearon equipos de Microscopia electrónica de barrido, microscopia electrónica de transmisión y rayos X de energía dispersiva y espectrómetro de fluorescencia para evaluar si la raíz del <i>M. Pteropus</i> acumula cadmio y puede distribuir este metal hacia las hojas. | Esta planta acumula gran cantidad de cadmio en su raíz y hojas y que tiene un gran potencial en la fitorremediación de aguas contaminadas con metales pesados. |
| 4 | Cavides, D., Delgado R. y Olaya A. (2016) | <i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Pistia stratiotes</i> y <i>Lemna minor</i> | Buscaron determinar si las plantas hiperacumuladoras acuáticas en el trópico americano remueven algunos metales pesados de uso común en industrias, recopilaron datos teniendo en cuenta técnicas como la cuantificación de micronutrientes | se determinó que el uso de macrofitas para la remediación de estas aguas es buena y que hay plantas como <i>Eichhornia Crassipes</i> , <i>Pistia stratiotes</i> y <i>Lemna minor</i> que demuestran que son muy versátiles en cuanto a la remoción de estos contaminantes |

| | | | | |
|---|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | Ekperusi, Abraham, Sikoki, Francis y Nwachukwu Francis (2020) | <i>L. minor</i> | Se busca demostrar si la lenteja de agua cumple con la remediación de sistemas acuáticos contaminados con metales pesados, entre otros contaminantes. | Se demostró a base de investigaciones que este macrofito es muy eficiente cuando se aplicaron en estudios de fitorremediación, además de tener mucho potencial en fitoremediar aguas con contaminantes orgánicos, hidrocarburos de petróleo, toxinas, etc. |
| 6 | Rifat , Ara, et al. (2017) | <i>Azolla pinnata</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Pistia stratiotes</i> <i>Lemna gibba</i> , <i>Myriophyllum heterophyllum</i> y <i>Potamogeton crispus</i> | Discutir el potencial de técnica de fitorremediación para tratar sitios contaminados con metales pesados, así proporcionar información sobre los mecanismos adoptados por las plantas para la absorción y resaltar que plantas acuáticas resultan eficientes para la remediación de diversos metales. | Estas plantas acumularon cantidades considerables de metales y, por lo tanto, demostraron tener un gran potencial para ser utilizadas como especies de fitorremediadores en cuerpos acuáticos contaminados con contaminación por metales pesados. |

| | | | | |
|---|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7 | Shukla, Anurakti y Srivastava, Sudhakar (2019) | <i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Lemna m.</i> , <i>Hydrilla verticillata</i> , <i>Ceratophyllum demersum</i> , <i>Wolffia globosa</i> y <i>Eleocharis Acicularis</i> | Encontrar una opción de remediación basada en plantas para la descontaminación de As de cuerpos de agua, En este caso varias macrófitas acuáticas sumergidas, flotantes y emergentes han sido probadas por su potencial de acumulación. | Estas plantas acumuladoras se pueden usar para minimizar y extraer As del agua. Para superar algunas limitaciones del enfoque tradicional, las nuevas estrategias serían fitoextracción asistida, remediación fitobiana, estrategia combinada, etc |
|---|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| | | | | |
|---|------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8 | Ting, W, et al. (2018) | <i>Eichhornia crassipes</i> | Busca revisar las ventajas técnicas y los inconvenientes de la Fitorremediación en comparación con otras tecnologías de eliminación de nitrógeno y proporcionar información para el desarrollo de la tecnología de Fitorremediación utilizando Jacinto de agua para tratar varias aguas residuales con alto contenido de AN. | Entre los diversos tipos de macrófitos, se recomienda utilizar el jacinto de agua para remediar las aguas residuales con nitrógeno debido a su mayor capacidad de absorción de nitrógeno en comparación con otras especies. |
|---|------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| | | | | |
|-----------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>9</p> | <p>Ting, W, et al. (2018)</p> | <p><i>Eichhornia crassipes</i></p> | <p>Busca revisar las ventajas técnicas y los inconvenientes de la fitorremediación en comparación con otras tecnologías de eliminación de nitrógeno y proporcionar información para el desarrollo de la tecnología de fitorremediación utilizando jacinto de agua para tratar varias aguas residuales con alto contenido de AN.</p> | <p>Entre los diversos tipos de macrófitos, se recomienda utilizar el jacinto de agua para remediar las aguas residuales con nitrógeno debido a su mayor capacidad de absorción de nitrógeno en comparación con otras especies.</p> |
| <p>10</p> | <p>Rezania, Shahabaldin, et al. (2016)</p> | <p><i>Pistia stratiotes</i>, <i>Eichhornia</i> spp., <i>Lemna</i> spp. y <i>Salvinia</i> spp.</p> | <p>Destaca el potencial de acumulación de diferentes especies de macrofitas flotantes empleando la técnica de fitorremediación como tecnología ecológica y viable en cuanto a costo.</p> | <p><i>Pistia stratiotes</i> fue la planta acuática flotante libre más efectiva. Por lo tanto, una amplia gama de plantas acuáticas sumergidas y emergentes también tiene la capacidad de absorber metales pesados de diferentes tipos de recursos de aguas residuales, pero las plantas acuáticas que flotan libremente fueron más efectivas.</p> |

| | | | | |
|----|----------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11 | Ferniza, Francisco et al. (2017) | <i>Typha latifolia</i> L | <p>Se elabora una simulación de un tratamiento combinado de electrocoagulación fitorremediación para la reducción de cobre, cadmio, plomo y zinc, presente en solución acuosa. La electrocoagulación se realizó en un reactor discontinuo utilizando electrodos de aluminio; Las condiciones óptimas fueron densidad de corriente de 8 mA / cm² y tiempo de operación de 180 min. Para la aplicación de fitorremediación se emplearon macrófitos, <i>Typha latifolia</i> L., durante siete días de tratamiento.</p> | <p>Los valores de remoción fueron: Cu (99.2%), Cd (82.7 a 89.3%) y Pb (99.4%)</p> <p><i>Typha latifolia</i> L. es tolerante a las concentraciones residuales de la mezcla de metales presentes en el agua electrocoagulada, como lo demuestra el contenido de pigmentos (clorofila y caroteno) en la planta.</p> |
|----|----------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| | | | | |
|----|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 | Rai, Prabhat (2019) | <i>Pistia stratiotes</i> , <i>Spirodela polyrhiza</i> y <i>Eichhornia crassipes</i> | Se cultivaron tres plantas flotantes en tanques experimentales de 140 L llenos con 100 L de aguadel efluente el cual contenía siete metales pesados Fe, Cu, Cd, Cr y Zn, Ni y As. Para el análisis de los metales se realizaron mediante espectrofotometría de absorción atómica en un intervalo de 4 días (4,8,12,15). | Los valores de remoción llegaron a ser mayores al 79% de diferentes metales en el día 15 de experimento en microcosmos. Pero en este caso, <i>E. crassipes</i> se estableció como el acumulador más eficiente seguido por <i>P. stratiotes</i> y <i>S. polyrhiza</i> . 83% para Fe, 66% para Cr, 63% para Cu, 76% para Cd, 79% para Zn, 67% de Ni y 63 % para As. |
|----|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| | | | | |
|----|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13 | Basile, A, et al. (2014) | <i>Lemna minor</i> , <i>Elodea canadensis</i> y <i>Leptodictyum riparium</i> | Las plantas se recolectaron, después se lavaron con agua destilada. La remoción de metales pesados se determinó mediante muestras de plantas (0,6 g) en 250 ml de 10 ⁻⁶ M solución de metales pesados durante un período de 24 h. Se recogieron alícuotas (0,4 ml) de solución de metal cada hora durante las primeras 8 h y se analizaron directamente para determinar el contenido de metal mediante AAS. | Cd: Logró el máximo rendimiento en 7 h la remoción estaba en 96.6% para <i>E. canadensis</i> , 95.5% para <i>L. riparium</i> y 95% para <i>L. minor</i> . Pb: en 8h logró su máximo rendimiento con valores de 91% para <i>E. canadensis</i> , 96.7% para <i>L. riparium</i> y 93% para <i>L. minor</i> . Cu: Sin embargo para este metal las 3 especies son menos eficientes. |
|----|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| | | | | |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>14</p> | <p>Parnian, Amir, et al. (2016)</p> | <p><i>Lemna gibba</i> y la cola de <i>Ceratophyllum demersum</i> L.</p> | <p>En este proyecto se cultivaron en condiciones de invernadero en macetas que contenían una solución nutritiva enmendada con dosis crecientes de cada uno de los contaminantes probados (0, 1,2, 4 y 6 mg L⁻¹) en un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Las plantas de producción de materia seca, así como metales pesados y concentraciones de tejido nutritivo se midieron al final del experimento que tuvo una duración de 14 días.</p> | <p>Estas especies demostraron una gran eficiencia de eliminación y la alta capacidad de acumulación de Ni y Cd hacen de <i>L. gibba</i> y <i>C. demersum</i> una buena opción para la fitorremediación de estos metales</p> |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| | | | | |
|----|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15 | Shahid, Munazzam, et al. (2019) | <i>Phragmites australis</i> y <i>Brachia mutica</i> | El experimento se realizó por triplicado. Se realizó en condiciones ambientales naturales y se repitió tres veces. Se obtuvieron muestras de agua (~250 ml) con una jeringa de cada tratamiento cada 24 h durante un período de cuatro días y se almacenaron en botellas de vidrio esterilizadas a 4 ° C para su análisis. | El rendimiento de los tratamientos vegetales inoculados con bacterias fue mucho mejor que los tratamientos vegetados no inoculados. Fe, Ni, Mn, Pb y Cr se eliminaron en un 94.34%, 91.36%, 87.06%, 70.28% y 89.81% respectivamente después de 96 h. La mejor oxidación de los metales por <i>P. australis</i> podría ser la razón para la eliminación nefectiva. |
|----|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

El agua es un recurso muy importante que como se sabe en la actualidad está siendo muy contaminada, por ende, la calidad de este recurso es muy afectado ya que no cumplen con las normativas establecidas, uno de los contaminantes más peligrosos de este recurso, son los metales pesados que consigo traen alteraciones como las transformaciones mutagénicas en la flora acuática (Lapan, O, Mikhyeyev, A y Madzhd, S, 2019, p.52).

En nuestro planeta, la superficie terrestre está conformada aproximadamente de un 71% de agua, en estas se encuentran ríos, lagos, arroyos, etc., y debido a las actividades industriales y antropogénicas, estos cuerpos de agua llegan a ser contaminadas generalmente por sus efluentes, dentro de estos se encuentran algunos metales pesados como Cu, Cr, Mn, Zn, etc. y si se hallan en gran cantidad perjudicarían la salud humana así como también el de algunas plantas, pero estos vegetales son bastante eficientes ya que tendrían la capacidad de desintoxicar metales pesados y esto es gracias a la acción de sus fitoquelatinas, reductasas deraíz, micorrizas, etc. (Jeevanvanantham, S., et al, 2019, p. 266). Por su parte Ansari, Abid (2020) en su investigación describe que el sistema acuático está contaminado por la eutrofización de aguas dulces, compuestos químicos, y metales pesados como Cadmio, Plomo, Cobre, Vanadio, Níquel, Zinc, Selenio y que estos son bastante comunes y son los principales metales presentes (p.2).

Los metales pesados son elementos químicos con una densidad alta mayor a 4g/cm^3 , la masa y el peso atómico están por encima de 20 y en concentraciones bajas son tóxicos, generalmente los metales pesados son nocivos, pero algunos de estos resultan importantes para la dieta de las personas y su deficiencia puede llevar a problemas en la salud, por ejemplo, el cuerpo necesita hierro, manganeso, cobalto, etc. Y otros de muy por el contrario alteran la salud (Lodoño, Luis; Lodoño, Paula y Muñoz, Fabian, 2016, p.147).

El daño de los metales pesados depende bastante de la movilidad que tengan en el medio en el que se encuentren y eso es debido a la persistencia y la tendencia a bioacumularse que tienen, hay una gran variedad de plantas

acuáticas que se utilizan para remover metales pesados como el fosforo, nitrógeno, cadmio, cobre, zinc, etc. la cantidad de remoción de estos en humedales depende esencialmente del tipo de metal, las condiciones en las que se encuentre, la especie de planta, la temporada y la tolerancia (Caviedes,Diego, Delgado, Ricardo y Olaya, Alfredo, 2016, p.129).

Existen diversas técnicas para remediar aguas contaminadas, una de ella es la filtración por membranas es una técnica eficiente, que necesita poco espacio, estas membranas se pueden clasificar según su peso molecular, el material de la membrana, permeabilidad y solubilidad del soluto, etc. El método de coagulación-floculación se emplea para desestabilizar los coloides y luego aglomerarlos, en este procedimiento se debe tener en cuenta la cantidad de dosis que se requiera y el tiempo de la mezcla (Caviedes,Diego, et al, 2015p.75); la adsorción por su parte usa los materiales físicos, químicos y biológicos como adsorbentes para la eliminación de contaminantes, es efectivo para emplearlos, algunos materiales que suelen utilizar como adsorbentes son suelos orgánicos, biochar, arcilla, carbón activado, etc. Algunos tratamientos electroquímicos que también se aplican son la precipitación electroquímica, en este proceso se forma la precipitación por el suministro de corriente continua así se eliminan los contaminantes; por su parte en la electrodiálisis se emplean membranas en celdas donde 1 es intercambiador de aniones y el otro intercambiador de cationes y así lograr descontaminar el agua (Jeevanantham, et al,2019, p.269).

Así como los anteriores tratamientos, existe la técnica de la fitorremediación que es una tecnología sustentable y de bajo costo, esta técnica puede ser empleada in situ o ex situ para la reducción de contaminantes naturales y antropogénicos, esta aplicación es ampliamente utilizada por la eficacia de las plantas y sus procesos bioquímicos. En esta técnica se usan plantas para poder remover, transformar, degradar, volatilizar, etc. los contaminantes (Velásquez, Johana.2017, p.157). Por su parte Jeevanantham, S., et al, (2019) menciona que esta técnica puede llevarse a cabo tanto en suelo como en agua. Además, no solo descontaminan metales pesados sino también contaminantes orgánicos

inorgánicos y que en este caso para aumentar la eficacia de las plantas se le asisten con microbios que intervienen en el crecimiento de estas, logrando que las plantas tengan un periodo de vida más largo. (p. 270). La fitorremediación es una tecnología eficiente, rentable, amigable con el ambiente y es bastante aceptada por las personas (Cavides, Diego, et al, 2015, p.83).

Hay diversas técnicas de fitorremediación entre ellas está la fitoextracción que tiene como función principal extraer de manera factible el elemento contaminante, para ello se realizan diversos procesos los cuales son: la absorción, transporte, translocación y acumulación (Ramírez, Ramiro; Giraldo, Daniela y Barrera, Dairo. 2018, p.421). Por otro lado, tenemos la fitoestabilización la cual emplea plantas para inmovilizar y poder reducir la cantidad de contaminantes en el suelo o agua, esto es gracias a la adsorción de las raíces o la precipitación. Esta técnica tiene una ventaja y es que impide el ingreso de metales pesados en la cadena alimentaria en nuestro ecosistema (Kumar, Deepak; Pradhan, Chinmayh y Kumar, Hemanta, 2020, p.56).

La fitodegradación, por su parte, es una técnica donde la planta y los microorganismos que esta contienen degradan a los contaminantes metabolizándolos en los tejidos de la planta que se use y así poder producir enzimas para que catalicen la degradación (Delgadillo, Angelica, et al, 2011, p. 601). La fitovolatilización se produce con el crecimiento de las plantas, conforme van creciendo absorben los contaminantes, en algunas ocasiones estos pueden llegar hasta las hojas para luego volatilizarse en la atmosfera (Velásquez, Johana, 2017, p. 158). Por último, en la rizofiltración se emplean las raíces de los vegetales para poder absorber la mayor concentración de contaminantes en el agua, en esta técnica se utilizan plantas acuáticas y estas ayudan a que los contaminantes no ingresen a la cadena alimentaria (Tarek, Galal et al, 2018, p.440).

Hay diversos tipos de especies de plantas que se utilizan para aplicar esta técnica, una de ellas son las hiperacumuladoras acuáticas o macrófitas acuáticas, esta especie se caracteriza por crecer donde hay concentraciones de

metales tóxicos, ya que permiten la acumulación de metales en la biomasa. En la actualidad, este tipo de plantas son utilizadas ya que absorben los metales a niveles de 50 a 500 veces más que una planta normal. Hay 2 maneras de determinar la eficiencia de estas especies: saber el factor de bioconcentración (BCF) y el factor de bioacumulación (BAF) (Kumar, Deepak; Pradhan, Chinmayh y Kumar, Hemanta, 2020, p.66).

Las macrofitas acuáticas son plantas que crecen en zonas acuáticas e inundables, estas se clasifican en 4 divisiones taxonómicas que son: *Charophyta*, *Bryophyta*, *Pteridophyta* y *Spermatophyta*. Estas plantas se pueden clasificar también en 4 grupos: sumergidas, enraizadas, emergentes y flotantes libres (Ramos, Carolina; Cárdenas, Nancy y Herrera Yimy, 2013, p.74).

Estas plantas acuáticas cumplen con ciertas características como crecer y cosecharse rápido, estas plantas crecen en un medio donde halla cierta cantidad de metales pesados para favorecer el crecimiento y su desarrollo, esto también se debe a que estas cuentan con la presencia de la antocianina, tioles y antioxidantes por ello toleran este contaminante, pero si se exponen a niveles que sobrepasan los límites causarían daños en las plantas afectando sus funciones metabólicas, fotosíntesis, respiración e incluso llegan a morir. No obstante, existen plantas como las lentejas acuáticas que resisten a altas concentraciones de metales pesados y las asimilan rápido de tal manera que se recuperan pronto a estas exposiciones. En la actualidad se conocen 400 especies de plantas hiperacumuladoras de metales como: *Azolla*, *Crysopogon*, *Pistia*, *Hydrilla*, *Eichornia*, etc. (Ansari, Abid et al, 2020, p.2). Estas plantas resultarían ser muy eficientes y es por ello que su aplicación sigue aumentando en más sectores como en los efluentes de destilería, lagos eutróficos, entre otros (Ekperusi, Abraham, Sikoki, Francis y Nwachukwu, Eunice, 2019, p. 287).

El crecimiento de estas plantas en los sistemas acuáticos reduce en gran cantidad el paso de la luz solar y la transferencia de gases entre el agua y la atmosfera, la eficiencia de estas plantas se incrementa cuando operan en condiciones aerobias es decir que el sistema cuente con aireación y circulación. Además de ello la que estación en la que nos encontremos es un factor

importante para su desarrollo y desempeño, pero una desventaja que tienen es que tienen el límite que tienen para acumular la biomasa y esta es una fuente de contaminante por lo que su manejo se debe hacer con sumo cuidado (Martelo, Jorge y Lara Jaime, 2012, p-p. 226 y 227).

La aplicación de estas plantas en aguas contaminadas es muy amplia, además que no solo se usan para metales pesados, sino también para la remediación de contaminantes orgánicos, agroquímicos, remediación fluvial, efluentes domésticos, escorrentías agrícolas, aguas residuales, etc. Y para ayudar en la eficiencia de estos macrófitos se emplearon combinándolas con algas, microbios para una mejor eficiencia (Ekperusi, Abraham, Sikoki, Francis y Nwachukwu, Eunice, 2019, p. 287).

Para el empleo de estas plantas en la fitorremediación se elaboran sistemas acuáticos las que pueden ser de 4 modelos: Humedales construidos que son empleados con vegetación emergente y subemergente y agua que simulan los humedales naturales ; el sistema de tratamiento con plantas acuáticas flotantes, estos pueden ser estanques naturales o semielaborados donde se mantienen plantas acuáticas flotantes para el tratamiento de aguas residuales; el sistema de tratamiento integral es la mezcla de los sistemas descritos anteriormente y por último el sistema de rizofiltración donde se pueden remover metales pesados, y residuos industriales como textil, agrícola, municipales, etc. (Nuñez, Roberto, et al, 2004, p.72).

Los sistemas con especies flotantes consisten en estanque con una profundidad variable (0.4 a 1.5 m), aquí las macrofitas se podrán desarrollar de manera natural, este sistema es muy parecido a la laguna de estabilización, pero en este caso se emplean macrofitas y no algas, aquí las plantas flotantes las hojas y tallos se desenvuelven sobre la superficie acuática, las raíces de estas plantas no se encuentran fijas pues están suspendidas en las columnas de agua así. Este sistema de humedales con macrofitas flotantes presentan ventajas como bajo costo, una elevada capacidad de depuración y es muy fácil

cosechar toda la biomasa que se halla formado (Martelo Jorge y Lara, Jaime, 2012 p-p.230-236).

Para una mayor eficacia de la fitorremediación se han empleado variaciones para hacerlas más eficaces cuando las apliquen, una de ellas es la elaboración de biochar ya que con esta técnica favorecería al crecimiento de las plantas, así como la productividad de biomasa hasta un 10% aproximadamente atribuyéndoles niveles altos para retener nutrientes y agua, suficiencia de intercambio iónico y un alto pH, que es favorable para la regeneración de nutrientes de las plantas (Nadeem, Sarwar, et al, 2017, p.716). La aplicación de fitohormonas es otra técnica que se emplea para mejorar la fitoextracción, haciendo que las plantas crezcan de manera más rápida, así como se eleva la tolerancia y acumulación de metales pesados (Zhu, H., et al. 2020, p.6).

Otras variaciones que incluye a la fitorremediación es cuando se emplean plantas genéticamente modificadas, en esta técnica se eligen genes de diversos organismos que son capaces de degradar contaminantes como genes de bacterias, animales, hongos incluso genes de plantas para luego implantarlas en las plantas que fueron previamente seleccionadas, con esta implementación se mejora la captación de metales pesados debido a la manipulación genética, ubicación y actividad de los transportadores de iones de los contaminantes (Conceição, Maria, et al, 2016, p.141).

III. METODOLOGIA

3.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación fue aplicada ya que, tuvo como finalidad el emplear todos los datos disponibles para la innovación de tecnologías y metodologías, consiguiendo así un cambio en la sociedad que nos rodea. Además, se indica que la investigación aplicada tiene resultados más evidentes y perceptibles que en muchos casos llegan a ser reconocidos por la población. Sin embargo, es

importante mencionar que esta investigación no pudo llevarse a cabo sin conocimientos de una investigación básica, de igual manera, la investigación aplicada si no se realiza lo único que se conseguiría sería un estancamiento por eso se dice que todo esto es una cadena (Rivera, 2019, p.1).

De igual manera, este tipo de investigación es el resultado de la aplicación del conocimiento científico para dar solución a problemas prácticos como, por ejemplo, obtención de una vacuna o resolución de problemas de ingeniería (Andrés, 2016, p.6). Asimismo, Concytec (2018) señala que, la investigación aplicada se establece a través del conocimiento científico, los medios (metodologías, protocolos y tecnologías) por los cuales se puede satisfacer una necesidad reconocida y específica debido a eso es que las áreas prácticas del conocimiento son esenciales para el avance tecnológico de un país. (p.2)

Por lo tanto, el presente trabajo de investigación que se desarrolló es aplicada ya que, se intentó engrandecer el conocimiento básico a través de la práctica. En este caso, el problema se presentó debido a que los cuerpos de agua están siendo continuamente afectadas debido a varios tipos de actividades antropogénicas específicamente la actividad minera, que está generando un deterioro de la calidad del ambiente. Por ese motivo es que se tendría que aplicar una serie de tecnologías o métodos con el fin de que se pueda depurar aguas contaminadas con metales pesados de esa forma causarían beneficios en la sociedad. Además, que se brinde información para realizar futuras investigaciones de esa forma se logrará una innovación tecnológica.

El diseño de investigación de este proyecto fue de enfoque cualitativo con diseño narrativo de tópicos, una investigación cualitativa emplea la observación, se elabora una descripción de la realidad más cercana de lo que se investiga y se intenta responder interrogantes como ¿por qué? Y ¿para qué? (Balcázar, Patricia; et al., 2013, p.11).

La investigación narrativa se distingue por estudiar la experiencia como un

relato, este enfoque se caracteriza por ser multidisciplinaria, la investigación narrativa requiere evidencias, plausibilidad interpretativa y un pensamiento disciplinado (Blanco, Mercedes, 2011, p.141). El diseño narrativo recopila la información de datos para analizarlas y describirlas, este sistema es un esquema de investigación y se usa con el objetivo de evaluar una sucesión de acontecimientos y con el estudio narrativo es de tópico se enfoca en sucesos, temáticas o fenómenos (Salgado, Cecilia, 2007, p.72).

Se optó por emplear este diseño en nuestro proyecto pues básicamente recolectamos información de la técnica de fitorremediación, datos de diversas investigaciones de artículos tanto de revisiones como de experimentales para luego seleccionar las necesarias, los sucesos más relevantes en la aplicación de esta técnica, las mejoras que le han ido implementando a través de los años y los resultados que obtuvieron.

3.2. Categoría, Subcategorías y matriz de categorización apriorística

Tabla 2: Matriz de categorización apriorística

| Objetivos Específicos | Problemas específicos | Categoría | Subcategoría | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Explicar los beneficios de aplicar la fitorremediación para restaurar el área contaminada | ¿Cuáles son los beneficios de aplicar la fitorremediación para restaurar el área contaminada? | Beneficios | -Ambiental -Económico Khalid, et al.(2017) | De acuerdo al costo. Truu, et al. (2015) | De acuerdo al tiempo de remoción. Mahar, et al. (2016) | De acuerdo al grado de contaminación Al-Thani y Yasseen (2020) |

| | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Explicar las limitaciones de aplicar la fitorremediación para restaurar el área contaminada | ¿Cuáles son las limitaciones de aplicar la fitorremediación para restaurar el área contaminada? | Limitaciones | -Especie de planta hiperacumuladora -Climatológica Khalid, et al. (2017) | De acuerdo a la condición de cultivo. Selvakumar, et al. (2018) | De acuerdo al tiempo de adaptación. Al-Thani y Yasseen (2020) | De acuerdo a la variación climática. Selvakumar, et al. (2018) |
| Describir los estudios recientes en cuanto a la fitorremediación | ¿Cuáles son los estudios recientes de la fitorremediación? | Estudios recientes | -Nuevas aplicaciones - Nuevos aspectos de selección de especies Kumar, et al. (2018) | De acuerdo al año de publicación. Kumar, et al. (2017) | De acuerdo a la complejidad. Conceição, Maria, et al (2016) | De acuerdo al aumento de eficiencia. Nadeem, Sarwar, et al (2017) |
| Identificar qué factores son los que determinaran la eficiencia de la fitorremediación. | ¿Cuáles son los factores que van a determinar la eficiencia de la fitorremediación? | Factores | -Porcentaje de remoción - Especie de macrófita - Porcentaje de acumulación biomasa Mahar, et al. (2016); Selvakumar, et al. (2018) | De acuerdo al tiempo de remoción del metal. Al-Thani y Yasseen, (2020) | De acuerdo a la acumulación del contaminante. (Kumar, Pradhan, y Kumar (2020) | De acuerdo a la producción de biomasa. Nadeem, Sarwar, et al (2017) |

3.3. Escenario de estudio

En el presente trabajo de investigación los escenarios de estudio fueron en diferentes países en donde se llevaron a cabo esta aplicación de remediación, por otro lado, Martino, Yan y Lafreniere (2019) mencionan que el proceso de fitorremediación puede realizarse de forma in situ y ex situ debido a que es aplicable en un proceso de remediación para cuerpos de agua contaminado con metales (p.2).

En este caso para lo que es in situ según Al-Thani y Yasseen (2020) mencionan que existen especies nativas en las zonas que han sido contaminadas y que estas con el paso del tiempo obtuvieron cierta resistencia y tolerancia a estas sustancias tóxicas de esa forma no era necesario realizar una movilización de terreno y a su vez se reduciría la multiplicación de los contaminantes en el agua y los desechos transportados por el aire, lo que finalmente minimiza el riesgo para el medio ambiente adyacente (p.3).

Por otro lado, el tratamiento ex situ consistió en recolectar y seleccionar diferentes macrófitas flotantes considerando su longitud de sus raíces para después ser llevados a laboratorios donde se lavaron cuidadosamente. Luego se seleccionaron muestras tanto de las plantas como del agua contaminada con metales pesados previamente analizada. Después las plantas se llevaban a reactores o tanques experimentales con el fin de que se aclimatara a esas nuevas condiciones de cultivo, para después agregar esos contaminantes y posterior a eso poder evaluar los porcentajes de acumulación y remoción.

3.4. Participantes

En este caso, Según Hernández, Fernández y Baptista (2014) mencionan que la muestra en una investigación cualitativa, grupo de personas, eventos, sucesos, documentos, etc. del que se recopilara información, no necesariamente tiene que ser representativo de una población o universo que se estudia. Sino más bien, que se van seleccionando tentativamente según los objetivos de la investigación y estas mismas se van definiendo al estudiar minuciosamente las características de los participantes. Por otro lado, cabe recalcar que en este tipo de estudio la muestra planteada al inicio puede ser distinto a la muestra final ya que, se puede agregar casos que no se haya observado o excluir considerando que el investigador requiera ampliar la búsqueda con otros participantes (p.384).

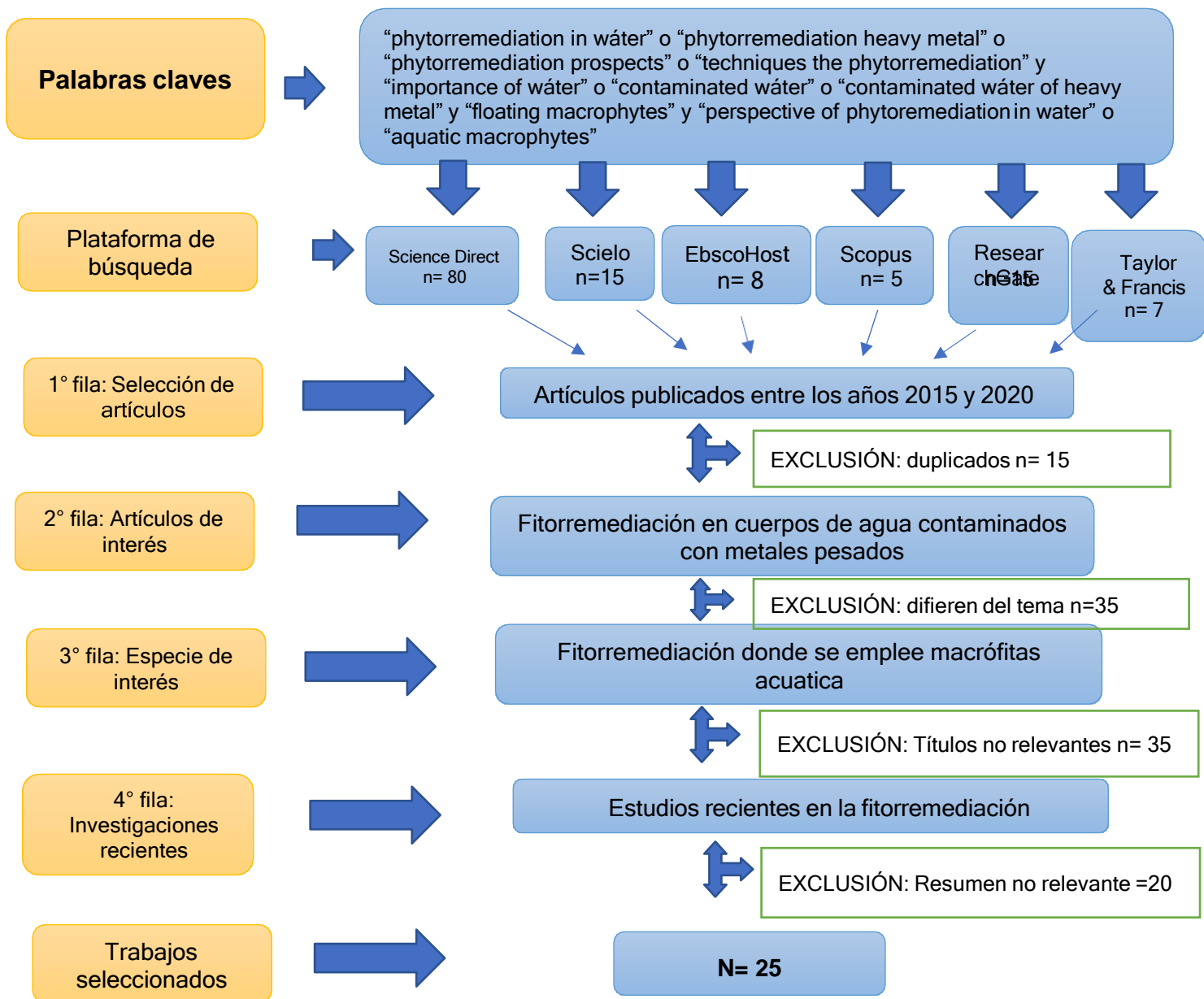
Por ende, para el proyecto de investigación se recolectó información de las siguientes bases digitales: Science Direct, Scopus, Scielo, Taylor and Francis online, EbscoHost, Proquest, ResearchGate, Springer.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Respecto a esto, Hernández, Fernández y Baptista (2014) mencionan que técnicas es un conjunto de herramientas y sistemas para recolectar, conservar y analizar la investigación necesaria que permite lograr obtener datos (p.418). Por otro lado, para el trabajo de investigación se aplicó la técnica de análisis documental dado que en las otras técnicas se obtendrían los datos de fuente primaria, sin embargo, el análisis documental se recolectarían datos de fuentes secundarias sobre las variables de interés tales como libros, boletines, revistas, artículos científicos, entre otros. Además, el instrumento que se suele emplear en este tipo de investigaciones es la ficha de registro de datos. (Tamayo y Silva, 2016, p.6).

Por lo tanto, para la investigación se emplearon fichas de registros de datos que se encuentra en el anexo 1, las cuales fueron elaboradas considerando la matriz apriorística y los criterios de inclusión debido a que se debe dar prioridad a los estudios que sirvan para comprender completamente el problema y responder así las interrogantes de la investigación, de esa forma permitir la reproducibilidad del trabajo.

3.6. Procedimientos



El procedimiento para la búsqueda y recopilación de información se realizó de la siguiente manera: se recurrieron a palabras claves como phytoremediation o contaminación wáter of heavy metal o floating macrofitas, etc. Luego, se aplicaron criterios de inclusión (selección de artículos entre los años 2015 y 2020, artículos de interés que se trate acerca de la fitorremediación en cuerpos de aguas contaminadas con metales pesados, las especies de interés que en este caso serán las macrófitas flotantes y las investigaciones como las nuevas tecnologías de la técnica de fitorremediación) y criterios de exclusión (artículos duplicados, artículos que difieren del tema, los títulos no relevantes y resúmenes

no relevantes). Finalmente, se obtuvieron artículos con información más precisa y relevante para analizar y poder aprovechar en el desarrollo del proyecto de investigación.

3.7. Rigor científico

La dependencia o dependencia lógica es la recopilación de información similar de diversos investigadores para luego realizar los mismos análisis y así nos den resultados semejantes, existen dos grados de dependencia: la dependencia interna, que se caracteriza por realizar investigaciones similares por más de dos investigadores; por su parte, el grado externo consiste en investigaciones de temas semejantes en ambientes y periodos similares, además de ello, los diversos investigadores recopilan sus propios datos.(Salgado, Ana, 2007,p.74). La dependencia lógica no está asegurada pues es imposible que existan dos investigaciones idénticas y es debido a la extensa información realizada por los investigadores, a pesar de ello los investigadores deben de encaminar una estabilidad en la información que recopila y analiza sin irse muy lejos del tema central (Noreña, Ana, et al. 2012, p.267). Se aplicó este criterio pues recopilamos información de diferentes autores con ambientes similares, ya que esta técnica fue empleada en aguas contaminadas con metales pesados y así poder nosotros obtener nuestras propias conclusiones. Por su parte la credibilidad significa que los descubrimientos son reales o verdaderos por parte de todos los integrantes del estudio y por las personas que han sido testigos de los estudios (Arias, María y Giraldo Clara,2011, p.503). La credibilidad es un requisito importante y cuenta que los resultados deben tener relación con el fenómeno observado y así poder evitar las suposiciones acerca del contexto que se está estudiando (Noreña, Ana, et al. 2012, p.267). En este caso nosotros obtuvimos información de distintas bases de datos confiables y toda la información es debidamente citada y referenciada.

La transferibilidad es el criterio que se tuvo en cuenta para poder juzgar el rigor metodológico, este criterio básicamente se refiere a la posibilidad de poder

transferir los resultados obtenidos de una investigación a otros contextos (Castillo, Edelmira y Vásquez Martha, 2007, p.166), por ello es necesario detallar afinadamente el lugar de estudio y así tener medios para poder ampliar el estudio a otras poblaciones registrando que tanto se ajustan los resultados a otros contextos (Osorio, Belkys, 2019, p.68) la información recopilada cumplió con el criterio de transferibilidad pues cuando se trata de la aplicación de macrófitas flotantes para descontaminar aguas con metales pesados estas plantas no solo son empleadas en ríos sino también en lagos, humedales o incluso a nivel de laboratorios de distintos países. Por otro lado, la confirmabilidad consiste en la habilidad que tienen los diversos investigadores para seguir los rastros que dejan los autores originales para todo ello es imprescindible que el autor original tenga registros, documentaciones completas, ideas, etc. para que así los nuevos investigadores puedan llegar a conclusiones similares si no es que iguales (Salgado, Ana, 2007, p.75) y se interesa por el concepto de objetividad de los datos (Vivar, Cristina, et al. 2013, p.225) la información que se recopiló son las descripciones y características que los autores proporcionaron en sus investigaciones.

3.8. Método de análisis de información

Para iniciar, en el trabajo de investigación se empleó información recolectada por artículos científicos, revistas, libros, paginas institucionales, etc. Por lo cual, el análisis de información se llevó a cabo después de realizar una recopilación de información para así proceder a identificar y comenzar a reducir, clasificar, sintetizar y finalmente agrupar los artículos teniendo en cuenta nuestra matriz apriorística, en el cual se emplearon categorías y subcategorías en relación a ciertos criterios, de esa forma nos permitirá responder a nuestros objetivos.

Después, se explicaron las categorías que son beneficios y limitaciones de aplicar la técnica de fitorremediación desde una perspectiva ambiental, económica y climatológica que representa las subcategorías considerando los criterios de costos, tiempo, grado de contaminación y grado de variación climática.

Luego, se determinaron los hallazgos recientes que es la categoría teniendo en cuenta la tecnología o metodología aplicada, así como también los aspectos de selección de especies, en este caso estas dos últimas son las subcategorías, teniendo en cuenta los criterios como el año de publicación, complejidad y lo eficiente que puede ser.

Finalmente se identificó qué factores permitirán demostrar una mayor eficiencia el cuál es la categoría, y como subcategorías tenemos lo que es porcentaje de remoción, pH, especie de macrófita, porcentaje de acumulación, porcentaje de biomasa en función de los criterios tales como tiempo de crecimiento y adaptación de la planta, absorción de contaminante y una mayor producción de biomasa, de tal forma que, una vez que hayas sido codificada y debidamente estructurada toda esta información, permita realizar el análisis correspondiente el cual será producto de la necesidad de buscar las certezas, así poder obtener conclusiones verdaderamente objetivas.

3.9. Aspectos éticos

Este proyecto de investigación cumplió con los criterios éticos que están mencionados en el Código de Ética de la Universidad César Vallejo con resolución del Consejo Universitario N° 0126-2017/UCV como la responsabilidad, la autonomía de cada participante, además de ello se cumplió con la honestidad pues se respetó la autoría de los investigadores al momento de obtener, manejar, analizar y procesar los datos, también se emplearon correctamente la norma internacional ISO 690 para citar las fuentes consultadas, además se cumplieron con la búsqueda del bienestar puesto que, la información del proyecto podría ser empleada para complementar futuros trabajos de investigaciones donde empleen la técnica de fitorremediación para preservar el ambiente y por último el aspecto de justicia, pues cada integrante tiene un trato igualitario sin ninguna exclusión.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al inicio se encontraron 130 artículos relacionados con el tema de Fitorremediación para la eliminación de metales pesados incluyendo todas las palabras claves, para luego pasarlas por un filtro teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión, a partir de dicha verificación, 25 artículos fueron descartados debido a que se hallaron los mismos artículos en diversas base de datos, 30 artículos fueron descartados por diferir del tema dado que hablaban de otro tipo de contaminantes respecto al que se está investigando, 35 artículos fueron eliminados pues los títulos no eran relevantes para el desarrollo del proyecto y 15 artículos mostraban en sus resúmenes que no contaban con la información que requeríamos.

En total se seleccionaron 25 artículos que tenían la información necesaria y cumplían con nuestros criterios de inclusión, 4 artículos fueron clasificados de acuerdo a los beneficios y limitaciones al aplicar la fitorremediación para restaurar el área contaminada (tabla n°3); 3 investigaciones presentaron información respecto a estudios recientes y 18 artículos describen acerca de los factores que indican la eficiencia de la Fitorremediación (tabla n°4)

Respecto a lo que se presenta en la tabla n° 3, la fitorremediación mostró ventajas, tales como su eficacia para restaurar grandes áreas contaminadas a diferencia de otros métodos de remediación, además de tener bajo costo para su implementación y ser estéticamente agradable (Conceição, Maria, et al, 2016). De manera similar Priyanka Saha, Omkar Shinde y Supriya Sarkar nos indicó que el emplear la fitorremediación, resultaría ser una solución ecológica frente a otras metodologías que son más caras (2016), de igual manera Akeem O. Bello et al, señaló que la aplicación de esta técnica de remediación implica costos bajos en comparación con otros métodos físicos y químicos (2018). Por otro lado, Khalid, et al. nos indicó que la mayoría de las metodologías convencionales resultan tener un costo elevado frente a la fitorremediación, dado que demandan movilización de terreno y tienden a aplicar agentes químicos que a su vez podrían agregar problemas adicionales

de contaminación en el entorno (2017).

Sin embargo, en cuanto a las desventajas se refiere al tiempo que implica en remover el mayor porcentaje de contaminante, en este caso el metal pesado, dado que la especie macrofitra necesitan diferentes condiciones para crecer y adaptarse tal como el *Pistia stratiotes* que necesita de mayor temperatura, es decir, se desarrolla mejor en climas tropicales y subtropicales. (Ting, W, et al., 2018), similarmente, se mencionó también que una de las limitaciones sería las condiciones climáticas en las que se encuentra la planta (Singh, Varinder, et al., 2020; Jeevanantham, S, et al. 2019; Conceição, Maria, et al, 2016 y Akeem O. Bello et al, 2018), tal es el caso del jacinto de agua que sobrevive solo en el verano a diferencia de la *Lemna minor* que crece en todas las estaciones debido a su tolerancia al frío y al calor y eso también ayuda en cuanto a su producción de biomasa. (Ansari, Abid, 2020).

Otra de las limitaciones que se resaltó de esta técnica es la fitotoxicidad de los contaminantes en áreas fuertemente contaminadas (Hauwa, Mustafa y Gasim, Hayder, 2020; Dornelas Rodríguez, Ana et al, 2020) y eso dependerá de la naturaleza de la planta y el nivel del contaminante (Singh, Varinder, et al., 2020), así mismo, se logró observar en el estudio de Xin, et al. dado que al aumentar la concentración del metal resultó ser perjudicial ya que interfirió las actividades metabólicas de la planta como la fotosíntesis, tal es el caso de la *P. cordata* que comenzó a disminuir su nivel de clorofila y como consecuencia su posterior muerte (2020).

Tabla n°3: Beneficios y Limitaciones de la Fitorremediación

| Beneficios | Limitaciones | Referencia |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Eficaz para el tratamiento de grandes áreas• Restauración del ecosistema• Menos perturbaciones a los | <ul style="list-style-type: none">• Demora más tiempo que otras técnicas de remediación• Condiciones | Conceição, Maria, et al, 2016 |

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <p>ecosistemas</p> <ul style="list-style-type: none"> • | <p>ambientales específicas</p> | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Solución ecológica frente a las otras tecnologías que son caras y tóxicas para la salud. • Eficacia económica y medios sostenibles ya que son baratos de fabricar. • Ahorra alto contenido químico. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere más tiempo para remover mayores cantidades de metal. | <p>Priyanka Saha, Omkar Shinde y Supriya Sarkar, 2016</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Es un sistema de remediación natural e in situ impulsado por plantas solares y verdes • Es más rápido que la atenuación natural • No induce la contaminación secundaria • Los costos son muy bajos en comparación con otros métodos físicos o químicos actuales. | <ul style="list-style-type: none"> • Según las condiciones ambientales. • La naturaleza y eficiencia de la especie. | <p>Akeem O.Bello et al, 2018</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Fácil de mantener | <ul style="list-style-type: none"> • Depende del área por que ciertas variables climáticas afectarían su efectividad | <p>Jeevanantham, S, et al. 2019</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Biosistema potente para la fitotecnología de una amplia gama de metales pesados en | <ul style="list-style-type: none"> • Se debe tener mayor control al trabajar en un humedal artificial, dado que puede que los | <p>Prabhat Kumar, 2019</p> |

| | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| ambientes acuáticos | contaminantes entren a la cadenaalimentaria. | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Sostenibilidad en la aplicación, la mejora de la relación costo-beneficios, facilidad de uso y aplicación en grandes áreas. | <ul style="list-style-type: none"> • Implica mucho más tiempo | Tamara Daianede Souza et al, 2019 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de capital bajo, baja energía • Utiliza fuente natural y renovable • Menos generación de residuossecundarios • Menos huella de carbono • Recuperación de Aguas residuales | <ul style="list-style-type: none"> • Fitotoxicidad de contaminantes • Posibilidad de que los contaminantes entren a la cadenaalimentaria. • En las plantas albergan insectos peligrosos como los mosquitos | Hauwa, Mustafa y Gasim, Hayder, 2020 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Amigable con el ambiente • Producción de bioenergía • Bajo costo • Aplicación in situ y ex situ • Remoción de múltiples contaminantes | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere mucho tiempo • La naturaleza de la planta • El nivel de contaminante • Las condiciones climáticas | Singh, Varinder, et al., 2020 |

Respecto a los estudios recientes, se observó que la eficiencia de la fitorremediación aumenta cuando se emplean tecnologías recombinantes para modificar genéticamente las plantas y microorganismos, dado que mejoraría la capacidad de la especie macrofita permitiendo optimizar los resultados que

se obtuvieron a primera instancia como el caso de la Brassica juncea transgénica a la que se le implementó el gen GSH de Escherichia coli para mejorar la producción de fitoquelatina y glutatión y así mejorar la absorción de Cadmio y la producción de biomasa, a pesar de ello la ingeniería genética aún tiene limitaciones como la restricción anatómica de las plantas (Jeevanantham, S, et al. 2019). Del mismo modo, la aplicación de plantas transgénicas en la fitorremediación resultó ser un enfoque novedoso, los genes específicos de las plantas transgénicas tienden a aumentar el metabolismo, la acumulación y la absorción de contaminantes definidos, en este caso la planta ideal para diseñar la fitorremediación debe poseer ciertas características como el alto rendimiento de biomasa, estas especies también mejoran el proceso de desintoxicación de contaminantes orgánicos y adición de compuestos tóxicos en la cadena alimentaria (Shafaqat Ali , et al 2020).

Por otra parte, Rezania,S., et al. mencionó que el tiempo de eliminación prolongado es una desventaja de la fitorremediación que puede resolverse mediante una combinación de más de una técnica de remediación de aguas (2016), y así lo demostró Ferniza- Garcia et al, pues en su estudio se combinó un tratamiento convencional y no convencional resultó ser óptimo para la remoción de metales pesados, en este caso el proceso de electrocoagulación-fitorremediación tuvo una alta eficiencia de remoción de Cu (99.2%), Cd (82.7 a 89,3%) y Pb (99,4%) a diferencia de usar las técnicas por separado ya que eran menos eficientes, en este contexto el agregar la fitorremediación como parte de este proceso demostró ser viable tanto ambiental como económico (2017). Esto refuta en cierto modo a lo anterior ya que se debe tener en cuenta que los tratamientos convencionales implican un alto requerimiento de energía, mayor emisión de carbono y un alto costo de mantenimiento, por lo que los ecosistemas acuáticos requieren técnicas de remediación ecológicas e innovadoras (Hauwa, Mustafa y Gasim, Hayder, 2020).

Otro estudio es acerca del aprovechamiento de la biomasa que se pudo utilizar de forma rentable para la captación y recuperación de metales, además el uso sucesivo de biomasa seca y muerta de las plantas se emplean como sustancia biosorbente simple para eliminar los metales del agua, tal es el caso de las

raíces secas de la *Eichornia crassipes* pues mostraron un alto potencial para eliminar cadmio y plomo de manera eficaz de las aguas residuales. Por otro lado, la biomasa de diferentes especies de plantas acuáticas como *Eichhornia crassipes*, *Potamogeton lucens* y *Salvinia herzegoi* se utilizaron con éxito como material biosorbente para la eliminación eficaz de cromo, níquel, cadmio, zinc, cobre y plomo en diferentes estudios (Shafaqat Ali, et al 2020), en paralelo, se menciona que la *Eichornia crassipes* tiene una biomasa rica en nitrógeno y otros nutrientes esenciales. A partir de ello es que se puede obtener biogás (Priyanka Saha, Omkar Shinde y Supriya Sarkar, 2016), De igual forma, Prabhat, Kumar, indicó que la biomasa de *Eichornia Cr.* se podría utilizar para la generación de bio-energía / biocombustible, además de alimento para ganado (2019).

Tabla n° 4: Especies macrófitas acuáticas y su potencial para descontaminar metales pesados

| Estudio | País | Especie Macrófita | Met al | Area de estudio | Tiempo | Resultados | Referencia |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Potencial de biorremediación del cromo (VI) por la planta carnívora acuática <i>Utricularia gibba</i> L. (Lentibulariaceae). | Polonia | <i>Utricularia gibba</i> | Cr (VI) | Cultivo hidropónico | 7 días | Acumulación: 787,4 (mg Kg ⁻¹) | Augustynowicz Joanna et al, 2015 |
| Fitorremediación de Cd, Ni, Pb y Zn por mínima <i>Salvinia</i> | Brasil | <i>Salvinia spp</i> | Cd, Ni, Pb, Zn | Ensayo de Laboratorio | 60 días | Tasa de eliminación: Zn = 0,4046 mg / m ⁻²) Ni = 0,0595 mg / m ⁻²) Cd = 0,0045 mg / m ⁻²) Pb = 0,1423 mg / m ⁻²) | Sinheil, Danilo y Bianchini Irineu (2015) |
| Utilización de dos macrófitas acuáticas para la eliminación de metales pesados del medio sintético | Irán | <i>C. demersun</i> | Cd, Ni | Estanques experimentales | Cd= 13 días, Ni= 13 días | Remoción: Cd= 91 %, Ni= 50% | Parnian, Amir et al, 2016 |
| | | <i>Lemna gibba</i> | | | Cd= 10 días, Ni=13 días | Remoción: Cd= 82%, Ni= 52,5 % | |
| Potencial de fitorremediación de <i>Lemna minor</i> L. para metales pesados | Pakistán | <i>Lemna spp</i> | Pb, Cu, Cd, Zn | Ensayo de Laboratorio | 31 días | La eficiencia de remoción Cd, Cu, Pb fue superior al 80% para todos los metales. Mayor remoción de Ni = (99%) | Huma, Syeda, et al.2016 |
| Fitorremediación de aguas residuales de minas industriales utilizando jacinto de agua | India | <i>Pistia stratiotes</i> | Cr (VI) | Estanques experimentales | 15 días | Remoción: 99.5% | Priyanka Saha, Omkar Shinde y Supriya Sarkar, 2016 |
| Estudio comparativo de la absorción de metales por <i>Eichhornia crassipes</i> que crece en estanques de áreas mineras y no mineras: un estudio de campo. | India | <i>Eichhornia crassipes</i> | Cu, Mn, Pb, Cd | Aguas residuales mineras | 7 días | Acumulación en hojas: Pb = 3,40-5,06 (mgkg ⁻¹) Cd = 0.037-0.13 (mgkg ⁻¹) Mn = 62,9-67,9 (mgkg ⁻¹) Cu = 6,41-13,5 (mg kg ⁻¹) | Bably Prasad y Deblina Maiti, 2016 |
| Eliminación de Pb, Cu, Cd y Zn presentes en solución acuosa mediante tratamiento acoplado de electrocoagulación-fitorremediación. | México | <i>Typha latifolia</i> L. | Pb, Cu, Cd, Zn | Estanques experimentales | 7 días | Cu = 20% (119mg L), Pb: 43% (16mg L), Cd:11 % (75mgL) | Ferniza-Garcia et al, 2017 |

| | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Fitorremediación de aguas contaminadas con cadmio, plomo y nioquel utilizando <i>Phragmites australis</i> en sistemas hidropónicos. | Arabia Saudita | <i>Phragmites australis</i> | Cd, Pb, Ni | Ensayo de Laboratorio | 15 días | Remoción: Cd= 78%, Pb= 80 % y Ni = 45% | Akeem O. Bello et al, 2018 |
| Fitorremediación de metales pesados (Ni, Cd, Pb) mediante <i>Azolla filiculoides</i> de solución acuosa; un conjunto de datos. | Irán | <i>Azolla filiculoides</i> | Cd, Pb, Ni | Ensayo de Laboratorio | 15 días | Remoción: Cd= 92.84% - Dosis (5mgL ⁻¹), Pb = 97,12 % - Dosis (10mgL ⁻¹), Ni= 76.82% - Dosis (25mg L ⁻¹) | Naghipour, Dariush, et al. ,2018 |
| Remediación de metales pesados / metaloides de aguas residuales utilizando macrófitas flotantes libres de un humedal natural | India | <i>Pistia stratiotes</i> | Fe, Cd, Ni, Cr, Zn, Cu y As | Estanques experimentales | 15 días | Remoción: Fe=63%, Cd= 52%, Cr=60%, Zn=64%, *Cu=52%, Ni= 58%, As=49% | Prabhat Kumar, 2019 |
| | | <i>Eichhornia crassipes</i> | | | 15 días | Remoción: Fe= 80%, Cd= 70%, Cr=66%, Zn=79%, *Cu=63%, Ni=67%, As=62% | |
| | | <i>Spirodela polyrhiza</i> | | | 15 días | Remoción: Fe=42%, Cd= 48%, Cr=50%, Zn=60%, *Cu=48%, Ni=44%, As=37% | |
| Distribución subcelular de cadmio en un nuevo potencial hiperacumulador acuático <i>Microsorium pteropus</i> . | China | <i>Microsorium pteropus</i> | Cd | Cultivo hidropónico | 7 días | Aproximadamente 400 mg / kg de Cd en los tejidos por debajo de 500 metro Exposición de M Cd sin síntomas tóxicos. | Xin-yu Lan et al, 2019 |
| Fitorremediación de agua contaminada con arsénico por <i>Lemna Valdiviana</i> : un estudio de optimización | Brasil | <i>Lemna valdiviana</i> | As | Estanques experimentales | 7 días | Reducción del contaminante en un 82% de la concentración inicial y <i>L. valdiviana</i> fue capaz de acumular 1190 (mg kg ⁻¹) | Tamara Daiane de Souza et al, 2019 |
| Bioacumulación de cadmio y talio en aguas residuales de relaves de Pb-Zn por <i>Lemna minor</i> y <i>Lemna gibba</i> | Turquía | <i>Lemna minor</i> | Cd, Tl | Reactores experimentales | 8 días | Acumuló: (31,08 mg L ⁻¹ para Cd y 13,43 mg L ⁻¹ para Tl) | Merve Sasmaz, Erdal Öbek y Ahmet Sasmaz, 2019 |
| | | <i>Lemna gibba</i> | | | | Acumuló: (38,9 mg L ⁻¹ para Cd y 17,18 mg L ⁻¹ para Tl) | |
| Fitorremediación de cobre (II) de metales pesados del medio acuoso mediante el uso de macrófitas acuáticas <i>Hydrilla verticillata</i> y <i>Pistia stratiotes</i> | India | <i>Hydrilla verticillata</i> <i>Pistia stratiotes</i> | Cu (II) | Ensayo de Laboratorio | 28 días | La adsorción de metales pesados por <i>Hydrilla</i> y <i>Pistia</i> en el intervalo de exposición de 7 días fue 33,5% y 46,5%, 59,0%, 69,0% en 14, 21,28 días respectivamente | V Venkateswarlu, CH Venkatrayulu y TCH Jhansi Lakshmi Bai, 2019 |

| | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Pontederia cordata, una macrófita acuática ornamental con gran potencial en la fitorremediación de humedales contaminados con metales pesados | China | <i>Pontederia cordata</i> | Cd | Estanques experimentales | 15 días | 49,95% - 76,90% de Cd añadido se acumuló en los tejidos subterráneos | Jianpan Xin et al, 2020 |
| Estudios recientes sobre aplicaciones de plantas de malezas acuáticas en la fitorremediación de aguas residuales: un artículo de revisión. | Malasia | <i>Salvinia natans</i> | Mn, Cu, Zn, Fe, Pb, Cr, Cd | Aguas residuales | 7 días | Cd (6000 metro g/g) Pb (9800 metro g/g) y Ni (42363 metro g/g) | HAUWA, Mustafa y GASIM, Hayder, 2020) |
| Aplicación de la lenteja de agua común (<i>Lemna minor</i>) en la fitorremediación de productos químicos en el medio ambiente: estado y perspectiva de futuro | Nigeria | <i>Lemna minnor</i> | Mn, Cu, Zn, Fe, Pb, Cr, Cd | Laboratorio | 7 días | Remoción: Mn = 94 %, Cu= 86 &, Zn = 62 %, Fe = 74 %, Pb= 84 %, Cr = 73 %, Cd = 78 % | Ekperusi, Abraham, Sikoki, Francis y Nwachukwu Francis, 2020 |
| Potencial de la lechuga de agua (<i>Pistia stratiotes</i> L.) para la fitorremediación: respuestas fisiológicas y cinética de la absorción de zinc | Brasil | <i>Pistia stratiotes</i> L | Zn | Estanques experimentales | 7 días | Remoción: Zn= 72 % - Dosis (0.7 y 1.8 mg L ⁻¹) | Dornelas Rodríguez, Ana et al, 2020 |

En general, las macrófitas flotantes demostraron tener la capacidad de descontaminar cuerpos de agua con presencia de metales pesados (tabla n° 4), un claro ejemplo es el de la *Pistia stratiotes* que llegó a remover el 99.5% de Cr (VI) en un periodo de 15 días (Priyanka Saha, Omkar Shinde y Supriya Sarkar, 2016). Además, en un estudio de 4 especies de macrófitas evaluadas (*Pistia S*, *Eicchornia spp.*, *Salvinia spp* y *Lemna spp*) *Pistia s.* demostró tener potencial de fitoacumulación más alta (Rezania,S., et al. 2016), así mismo se observó que esta especie, es muy empleada en este proceso de descontaminación de aguas dado que remueve diversas especies de metales pesados tales como: Fe (63%), Cd (52%), Ni (58%), Cr (60%), Zn (64%), As (49%), Cu (52%) y todos ellos en un tiempo de tratamiento de 15 días (Prabhat Kumar, 2019). De igual manera, se ha revelado que el jacinto de agua resultó ser adecuado para el tratamiento de aguas residuales industriales, se

demonstró que tiene posibilidades decentes y viables para la absorción de nutrientes y la mejora de la calidad de agua (Rezania, S., et al. 2016).

Respecto a lo anterior, se observó que en el estudio de la fitorremediación el emplear macrófitas acuáticas presentan ventajas sobre otras plantas en cuanto a remediación de metales pesados, dado que demostró una amplia disponibilidad, rentabilidad y tolerancia a los contaminantes tóxicos haciendo que sean las más adecuadas para realizar estas acciones, este sistema de depuración que utilizan las plantas acuáticas tales como *Lemna spp*, *Eichornia crasipes*, *Pontederia cordata*, *Azolla filiculoides*, *C. demersum*, *Typha latifolia*, *Utricularia gibba*, entre otras, últimamente se están empleando debido a la capacidad para acumular y eliminar contaminantes persistentes en los cuerpos de agua tal y como se observan en la tabla n° 4.

Así como Priyanka Saha, Omkar Shinde y Supriya Sarkar que en su estudio determinó que la especie *E. crassipes* tuvo una excelente remoción de Cr (VI) debido a sus características tales como: fibroso, sistema radicular denso, hojas anchas y crecimiento rápido, además de ello se evaluó el factor de bioconcentración de esta y se obtuvo como resultado que es muy eficiente en cuanto a la absorción pues mientras aumentaba la concentración del metal en el agua también aumenta la acumulación del metal en la planta (2016), en contraste, Rezania, S., et al. mencionó también que las macrófitas deben de tener una tasa de crecimiento rápida, un sistema de raíces extenso, alto rendimiento de biomasa, adaptación de diversos hábitats, alta tolerancia y la capacidad de acumular los contaminantes en las partes aéreas. Algunos factores ambientales como la temperatura, el pH y la salinidad del agua pueden influir en el crecimiento de la planta y su desempeño en la fitorremediación. La importancia de estos parámetros está relacionada con el tamaño, el peso y la tasa de crecimiento de las plantas acuáticas. La disponibilidad de nutrientes también afecta el crecimiento y el rendimiento de las plantas acuáticas (2016).

Por otra parte, uno de los factores que complementó a mejorar el proceso de fitorremediación es la captación de mayor biomasa, por su parte Prabhat,

Kumar (2019) indicó que la biomasa de *Pistia* s. *Eichornia* cr. y *Spirodela polyrhiza* se podría utilizar para la generación de bio-energía / biocombustible y proteínas recombinantes además de alimento para ganado y aves de corral.

Por otro lado, el aumento de concentración de un metal no esencial para una planta resulta ser perjudicial ya que interfiere en las actividades metabólicas de esta, como la fotosíntesis, tal es el caso de la *Pontederia* c. que se empleó para descontaminar la muestra de un humedal contraminado con cadmio, ya que al aumentar la dosis del contaminante hubo una disminución significativa de la clorofila de un 67.95% a un 23.23% y a consecuencia de ello ocasionó una disminución de captación de biomasa (Xin, Jianpan et al , 2020).

Así mismo Parnian, Amir et al, en su estudio evaluó la capacidad fitorremediadora de 2 especies macrófitas acuáticas (*Ceratophyllum demersum* y *Lemna gibba*) para la remoción de cadmio y níquel a diferentes concentraciones, se obtuvo que la mayor concentración de biomasa fue de *Lemna gibba* que en cuanto a níquel osciló entre 270,19 y 638,95 gFWd y respecto al cadmio osciló entre 942,79 y 5093,27 gFWd, ambos alcanzaron el valor más alto con 6 mg /L de cada metal por separado, poniendo así en evidencia su eficiencia para el tratamiento de estos metales (2016).

Igualmente, en un estudio donde intervino la *Azolla filiculoides* se demostró que mientras mayor sea la cantidad de biomasa esta absorbía mejor los contaminantes tales como Cd, Pb y Ni, pero cabe destacar que mientras menor sea la concentración de contaminantes en el agua y más tiempo estén en contacto los resultados respecto a remoción son mejores (Naghypour, Dariush, et al. 2018).

También se presentaron casos como el de la *Pistia stratiotes* (lechuga de agua) que luego de 93 horas de cultivo a diferentes concentraciones de Zn afectaron negativamente su crecimiento, reduciendo también su biomasa en

un 15% para una concentración de 1.8 mg / L y un 10 % a 18 mg / L, además de ello, como hubo contacto directo entre las raíces y las soluciones contaminadas con Zn, se observó que el efecto de toxicidad fue más evidente en ese punto (Dornelas Rodríguez , Ana et al , 2020), respecto a lo anterior, es que en los últimos años se están tratando de emplear enfoques biotecnológicos para aumentar la acumulación de biomasa y la tasa de crecimiento de las plantas hiperacumuladoras utilizando herramientas de ingeniería genética, ya que esta potenciará la capacidad de acumulación y tolerancia de las plantas, lo que demostrará su aplicación excepcional para mejorar la eficacia de la fitorremediación. En las plantas, a nivel molecular, se evaluaron diferentes pasos que favorecen los métodos transgénicos. Las plantas modificadas genéticamente muestran una alta tolerancia y capacidad de absorción de metales, ya que se ha venido investigando con éxito en las plantas terrestres, pero respecto en las plantas acuáticas se encuentran aún en sus fases preliminares (Shafaqat Ali, et al 2020).

V. CONCLUSIONES

En conclusión la fitorremediación es una tecnología que permitirá eliminar metales pesados de un medio acuático empleando plantas, en este caso, macrófitas acuáticas partiendo desde ese punto los aspectos relevantes que muestra esta técnica es que el problema de contaminación que se observa en la actualidad requiere de tratamientos menos costosos y más efectivos, pero sobre todo amigables con el ambiente en otras palabras presentar un enfoque sustentable y sostenible, Por otro lado, están los estudios que se han venido realizando estos últimos años que demostraron mejorar la capacidad de esta técnica, tal es el caso de la aplicación de la ingeniería genética, la fitorremediación asociada a una técnica convencional y el uso de la biomasa vegetal del cual se ha mencionado que se puede emplear como una fuente de energía renovable, en este sentido sostenemos que la fitorremediación como tal, nos permitirá en un futuro un desarrollo ecológico, saludable y sostenible.

La fitorremediación presenta muchas ventajas como el bajo costo de

aplicación, su empleo en grandes áreas, además de ello es que los residuos que dejan son menores a comparación de otras técnicas causando menos perturbaciones al ecosistema, puede ser aplicada in-situ y ex -situ, entre otras, a pesar de sus múltiples beneficios, se encontraron ciertas limitaciones como el tiempo que demora en descontaminar el agua, la característica de la planta y la condición del medio que necesita para subsistir y su capacidad de tolerancia para los metales pesados.

En la actualidad se lograron evidenciar estudios recientes que tienen como finalidad optimizar la técnica de fitorremediación, tal es el caso de las plantas trabajadas con ingeniería genética que son diseñadas para obtener una mayor eficiencia de acumulación de metales, también se encuentran estudios como la asociación de la fitorremediación con la técnica convencional de electrocoagulación la cual ayuda a optimizar el proceso de remoción de contaminantes, del mismo modo la aplicación de plantas acuáticas tanto en bioacumulación (con biomasa vegetal viva) como en bioabsorción (con biomasa vegetal muerta) se puede realizar con éxito para la erradicación de metales pesados.

Finalmente, se identificaron que hay factores que determinan la eficiencia de este proceso, como el porcentaje de remoción ya que va a depender de la naturaleza de planta y la tolerancia que tienen para asimilar de manera rápida en su organismo el contaminante, a ello también se le agrega el factor de bioconcentración que se verá afectado dependiendo de la concentración y toxicidad del metal pesado en el medio acuático

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar más investigaciones que ayuden a determinar la toxicidad de los contaminantes, además de ello sería importante indagar y conocer más acerca de los procesos de las plantas hiperacumuladoras acuáticas tales como: su absorción, translocación, degradación y volatilización.

Se recomienda aplicar este método de remediación a grandes escalas, de esa forma se podría permitir demostrar la eficiencia de esta técnica dado que, la mayoría de los trabajos que se revisaron se han realizado a escala de laboratorio, con plantas cultivadas en condiciones específicas.

Otra recomendación es, investigar la importancia de nuestra flora existente en el país ya que se logra observar que la solución a estos problemas de contaminación de los recursos hídricos lo tenemos en nuestro medio, pero primero se necesitan más investigaciones para así popularizar la fitorremediación como un método de remediación sostenible, y que las prioridades de la misma en el futuro deberían centrarse en establecer una fitorremediación comercial mediante la búsqueda de variedades de cultivos de especies más valiosas, tolerantes y adaptables a la contaminación o especies nuevas para la producción de energía de una manera ecológica, el diseño de mezclas adecuadas de plantas con la finalidad de incrementar la diversidad funcional de la nueva comunidad por lo que claramente son puntos a explorar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. AL-THANI, R y YASSEEN, B. Phytoremediation of polluted soils and waters by native Qatari plants: Future perspectives. *Revista Environmental Pollution* [en línea]. Vol. 259, abril 2020. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2020].
Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012809270500011X?via%3DiHub>
2. AKEEM, O, et al. Phytoemmediation of wáter contaminated with cadmiun, lead and nockel using Phragmites australis in hydroponic systems. *Ecological Engineering* [en línea]. Vol. 120, setiembre 2018. [Fecha de consulta: 01 de setiembre de 2020].
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.035>
3. ANDRÉS, Dulce. Ciencias Aplicadas a la Actividad Profesional.4^a ed. Madrid: Editex S.A.2016,287 pp.
ISBN: 978-84-9078-809-7
4. ANSARI, Abid, et al. Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *Egyptian Journal of Aquatic Research* [en línea]. 2020. [Fecha de consulta: 28 April 2020].
Disponible en: <http://sci-hub.tw/10.1016/j.ejar.2020.03.002>
5. AQUINO, Pavel. CALIDAD DEL AGUA EN EL PERÚ - Retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales. Lima:DAR.2017,136pp.
Disponible en: <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2806>
ISBN: 978-612-4210-50-1
6. ARIAS, Maria y GIRALDO, Clara. El rigor científico en la investigacion cualitativa. *Revista de investigacion y educación en enfermería* [en línea]. Vol. 29, N° 3, diciembre 2011. [Fecha de consulta: 16 junio de 2020].

Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1052/105222406020.pdf>
ISSN: 0120-5307

7. ASGARI, Behnam, et al. Micronutrient and heavy metal concentrations in basil plant cultivated on irradiated and non-irradiated sewage sludge-treated soil and evaluation of human health risk. *Revista Regulatory Toxicology and Pharmacology* [en línea]. Vol. 104, junio 2019. [Fecha de consulta: 26 de abril de 2020].

Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273230019300819>

8. ASGARI, Behnam, GHORBANPOUR, Mansour y NIKABADI, Shahab. Heavy metals in contaminated environment: Destiny of secondary metabolite biosynthesis, oxidative status and phytoextraction in medicinal plants. *Revista Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea]. Vol. 145, noviembre 2017. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2020].

Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651317304475>

9. AUGUSTYNOWICZ, Joanna, et al. Potential for chromium (VI) bioremediation by the aquatic carnivorous plant *Utricularia gibba* L. (Lentibulariaceae). *Environmental Science and Pollution Research* [en línea]. 31 de enero de 2015. [fecha de consulta: 29 de setiembre de 2020].

Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/271523110_Potential_for_chromium_VI_bioremediation_by_the_aquatic_carnivorous_plant_Utricularia_gibba_L_Lentibulariaceae

10. BABLY Prasad y DEBLINA Maiti. Comparative study of metal uptake by *Eichhornia crassipes* growing in ponds from mining and nonmining areas—a field study. *Bioremediation Journal* [en línea]. Vol 20, 22 de marzo de 2016. [Fecha de consulta: 29 de setiembre de 2020].

Disponible en:

<https://doi.org/10.1080/10889868.2015.1113924>

11. BASILE, A, et al. Toxicity, Accumulation, and Removal of Heavy Metals by Three Aquatic Macrophytes. *International Journal of Phytoremediation* [en línea]. Vol 14(4), mayo 2014. [Fecha de consulta: 16 de mayo de 2020].

Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2011.620653>

12. BLANCO, Mercedes. Investigación narrativa: Una forma de generación de conocimientos. *Nueva época* [en línea]. N° 67. Setiembre del 2011. [Fecha de consulta: 29 de mayo del 2020].

Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/argu/v24n67/v24n67a7.pdf>

13. CAROLIN, C, et al. Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Revista Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea]. Vol 5, n° 3, junio 2017. [Fecha de consulta: 26 de abril de 2020].

Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343717302208?via%3Dihub>

14. CASTILLO, Edelmira; VASQUEZ, Martha. El rigor metodológico en la investigación cualitativa. *Colombia medica* [en línea]. N° 3. Vol. 34, 2003 [Fecha de consulta: 16 de junio de 2020].

Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/283/28334309.pdf>

ISSN: 0120-8322

15. CAVIEDES, Diego, DELGADO, Daniel y OLAYA, Alfredo. Remoción de metales pesados generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Producción + limpia* [en línea]. Vol.11, No. 2, 2016. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020].

Disponible en:

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200012&lng=en&tlng=en#?

ISSN: 1909-0455

16. CAVIDES, Diego, et al. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista de Ingeniería y Región* [en línea]. N° 13. 30 de mayo 2015. [Fecha de consulta: 14 de mayo de 2020].
ISSN 1657-6985
17. CONCEIÇÃO, Maria, et al. Metal phytoremediation: General strategies, genetically modified plants and applications in metal nanoparticle contamination. *Ecotoxicology and Environmental safety* [en línea]. Vol. 134. 28 agosto 2016. [Fecha de consulta: 15 de mayo de 2020].
Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.08.024>
18. DAIANE DE SOUZA, Tamara, et al. Phytoremediation of arsenic-contaminated water by *Lemna Valdiviana*: An optimization study. *Chemosphere* [en línea]. Vol. 234, noviembre 2019. [Fecha de consulta: 29 de setiembre de 2020].
Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519312251>
19. DELGADILLO, Angelica, et al. Phytoremediation: an alternative to eliminate pollution. *Agroecosistemas tropicales y subtropicales* [en línea]. Vol. 14, 2011. [Consultado el 28 de mayo de 2020].
Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
20. DORNELAS, Ana et al. Potential of water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) for phytoremediation: physiological responses and kinetics of zinc uptake. *International Journal of Phytoremediation* [en línea]. Vol 22, 2020. [Fecha de consulta: 28 de setiembre de 2020].
Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1725868>
21. EKPERUSI, Araham, SIKOKI, Francis y NWACHUKWU, Eunice. Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. *Chemosphere* [online]. Vol. 223, 2019. [Fecha de consulta: 8 mayo 2020].
Disponible en: <http://sci-hub.tw/10.1016/j.chemosphere.2019.02.025>

22. ESPINOZA FREIRE, Eudaldo. Las variables y su Operacionalización en la investigación educativa. Segunda parte. *Conrado* [en línea]. 2019, vol.15, n.69, pp.171-180. [Fecha de consulta: 23 de junio del 2020].
- ISSN: 2519-7320.
- Disponible en:
- <http://scielo.sld.cu/pdf/rc/v15n69/1990-8644-rc-15-69-171.pdf>
23. FERNIZA, Francisco, et al. Removal of Pb, Cu, Cd, and Zn Present in Aqueous Solution Using Coupled Electrocoagulation-Phytoremediation Treatment. *International Journal of Electrochemistry* [en línea]. 2 de julio 2017. [Fecha de consulta: 16 de mayo de 2020].
- Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2017/7681451>
24. HASEENA, Mehtab, et al. Water pollution and human health. *Revista Environmental Risk Assessment and Remediation* [en línea]. n° 3, Julio 2017. [Fecha de consulta: 26 de abril de 2020].
- Disponible en: <http://www.alliedacademies.org/environmental-risk-assessment-and-remediation/>
- ISSN: 2529-8046
25. HAUWA, Mustafa, et al. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Rev. Ain Shams Engineering Journal* [en línea]. 20 de junio de 2020. [fecha de consulta: 10 de septiembre de 2020].
- Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920301131?via%3Dihub>
26. HERNANDEZ, Roberto, FERNANDEZ, Carlos y BAPTISTA, Maria. Metodología de la Investigación [en línea]. 6.ª ed. México: Interamericana Editores S.A. ,2014. [fecha de consulta: 23 de junio de 2020].
- Disponible en:
- https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf

ISBN: 978-1-4562-2396-0

27. HUMA, Syeda, et al. Phytoremediation potential of *Lemna minor* L. for heavy metals. *Rev Internacional de Fitorremediacion* [en línea]. Vol 18, 2016. [fecha de consulta: 27 setiembre de 2020].
Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1058331>
28. INVESTIGACIÓN Cualitativa por Balcázar Patricia [et al.]. México: Universidad Autónoma del Estado de México, 2015. 11 pp.
ISBN: 968-835-947-5
29. INVESTIGACIÓN básica e investigación aplicada. [Publicación de blog].
Newstex: Rivera C., (9 de setiembre de 2019). [Fecha de consulta: 30 de junio de 2020].
Disponible en: <https://search.proquest.com/docview/2293905884?accountid=37408>
30. JEEVANANTHAM, S, et al. Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: A survey on application and future prospects. *Revista Environmental Technology & Innovation* [en línea]. Vol. 13, febrero 2019. [Fecha de consulta: 26 de abril de 2020].
Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186418304498>
31. KHALID, S, et al. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Revista Journal of Geochemical Exploration* [en línea]. Vol. 182, noviembre 2017. [Fecha de consulta: 08 de mayo de 2020].
Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674216303818>
32. KURMAR, Brajesh, KUMARI, Smita y CUMBAL, Luis. Plant mediated detoxification of mercury and lead. *Revista Arabian Journal of Chemistry* [en línea]. Vol 10, Mayo 2017. [Fecha de consulta: 08 de mayo de 2020].
Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535213002712>

33. KUMAR, Krishna, et al. Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Revista Ecological Engineering* [en línea]. Vol. 120, Setiembre 2018. [Fecha de consulta: 08 de mayo de 2020].
 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714417306669>
34. KUMMAR, Deepak, CHINMAY, Pradhan y KUMAR, Hemanta. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Tecnología ambiental e innovación* [en línea]. Vol.126, 2020. [Consultado el 28 de abril de 2020].
 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651315302116?via%3Dihub>
35. LAPAN, O, MIKHYEYEV, A and MADZHD, S. Development of a New Method of Rhizofiltration Purification of Water Objects of Zn (II) and Cd (II). *Journal of Water Chemistry and Technology* [en línea]. Vol. 41, 2019. [Fecha de consulta: 28 de Abril de 2020]. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eih&AN=136067689&lang=es&site=eds-live>
 ISSN: 1063-455X
36. LODOÑO, Luis; LODOÑO, Paula y MUÑOS, Fabian. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* [en línea]. Vol.14. N° 2. Mayo del 2016. [Fecha de consulta: 18 de junio del 2020].
 Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>
37. MARTELO, Jorge; LARA, Jaime. Macrofitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia, ing. Cienc.* [en línea]. Vol. 8. n°15. 2012. [Fecha de consulta: 15 de mayo 2020].
 ISSN: 1794-9165
38. MAHAR, Amanullah, et al. Challenges and opportunities in the

phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Revista Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea]. Vol. 126, abril 2016. [Fecha de consulta: 26 de abril de 2020].

Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651315302116?via%3Dihub>

39. MICHAEL, Geoffrey. Arsenic Toxicity: An Arsenic-Hyper Accumulating Fern Uses a Bacterial-like Tolerance Mechanism. *Revista Current Biology* [en línea]. Vol. 29. 2019. [Fecha de consulta: 10 de mayo 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.05.003>

40. MUHAMMAD, Rizwan, et al. Cadmium phytoremediation potential of Brassica crop species: A review. *Revista Science of the Total Environment* [en línea]. Vol. 631-632, agosto 2018. [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2020].

Disponible

en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971830860X>

41. NADEEM, Sarwar et al., Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Rev Chemosphere* [en línea]. Vol. 171. Marzo 2017. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2020]

Disponible

en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653516318574>

42. NAGHIPOUR, Dariush, et al. Fitorremediación de metales pesados (Ni, Cd, Pb) mediante Azolla filiculoides de solución acuosa; un conjunto de datos. *Data in Brief* [en línea]. Vol. 21 diciembre 2018. [Fecha de consulta: 27 de Setiembre de 2020].

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.111>

43. NOREÑA, Ana, et al. Aplicabilidad de los criterios de rigor y éticos en la investigación cualitativa. *Aquichan* [en línea]. Vol. 12, n° 3, diciembre 2012. [Fecha de consulta: 27 de junio de 2020].

Disponible

en:

[http://jbposgrado.org/icuali/Criterios%20de%20rigor%20en%20la%20I
nv%20cualitativa.pdf](http://jbposgrado.org/icuali/Criterios%20de%20rigor%20en%20la%20I
nv%20cualitativa.pdf)

ISSN: 1657 - 5997

44. NUÑEZ, Roberto, et al. Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Biotecnología y biología molecular* [en línea]. Julio 2014. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2020].

Disponible en:

https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf

45. OSORIO, Belkys y ROJAS, Xiomara. Criterios de Calidad y Rigor en la Metodología Cualitativa. *Universidad Pedagógica experimental Libertador* [en línea]. 21 de noviembre del 2019. [Fecha de consulta: 17 de junio de 2020].

Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/337428163>

ISSN: 0435 - 026X

46. PARNIAN, Amir, et al. Use of two aquatic macrophytes for the removal of heavy metals from synthetic medium. *Ecohydrology & Hydrobiology* [en línea]. Vol 16(3), agosto 2016. [Fecha de consulta: 16 de mayo de 2020].

Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1642359316300210>

47. POMA LLANTOY, Víctor Raúl y VALDERRAMA NEGRON, Ana C. Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (ii) y mercurio (ii) con la especie Eichhornia Crassipes (Jacinto de agua). *Rev. Soc. Quím. Perú* [en línea]. vol.80, n.3, 2014. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020]

Disponible en:

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2014000300003

ISSN 1810-634X.

48. PRIYANKA, Saha, OMKAR, Shinde y SUPRIYA, Sarkar. Phytoremediation of industrial mines wastewater using water hyacinth. *International Journal of Phytoremediation* [en línea]. Vol. 19 ,2017. [

Fecha de consulta: 28 de setiembre de 2020].

Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1216078>

49. RAI, Prabhat. Heavy metals/metalloids remediation from wastewater using free floating macrophytes of a natural wetland. *Environmental Technology & Innovation* [en línea]. Vol.15, agosto 2019. [Fecha de consulta: 16 de mayo de 2020].

Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186418306151>

50. RAMIREZ, Ramiro, GIRALDO, Daniela y BARRERA, Dairo. Fitoextracción de cadmio con hierba mora (*Solanum nigrum* L.) en suelos cultivados con cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta agronómica* [en línea]. vol.67, n.3 2018. [Fecha de consulta: 27 abril de 2020].

Disponible en:

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-28122018000300420&lng=en&nrm=iso
ISSN: 0120-2812

51. RAMOS, Carolina; CARDENAS, Nancy y HERRERA, Yimy. Caracterización de la comunidad de Macrófitas acuáticas en lagunas del Páramo de La Rusia (Boyacá-Colombia). *Revista Ciencia en Desarrollo* [en línea]. Vol. 4 n° 2. diciembre 2013. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2020].

Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v4n2/v4n2a09.pdf>

52. Res. N° 215-2018-CONCYTEC-P. Reglamento de calificación, clasificación y registro de los investigadores del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación tecnológica - reglamento renacyt. Diario oficial El Peruano, Lima, Perú, 25 de noviembre del 2018

53. REZANIA, Shahabaldin, et al. Comprehensive review on phytotechnology: Heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Revista Journal of Hazardous Materials* [en línea]. Vol 318, noviembre 2016. [Fecha de consulta: 8 de mayo de 2020].

- Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389416306860>
54. RIFAT, Ara Wani, et al. Heavy Metal Uptake Potential of Aquatic Plants through Phytoremediation Technique - A Review. *Revista Journal of Bioremediation & Biodegradation* [en línea]. Vol. 8, Setiembre 2017. [Fecha de consulta: 8 de mayo de 2020].
- Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/319216292_Heavy_Metal_Uptake_Potential_of_Aquatic_Plants_through_Phytoremediation_Technique_-_A_Review
55. SALGADO, Ana. Investigación cualitativa: diseños, evaluación del rigor metodológico y retos. *Liberabit* [en línea]. Vol. 13. n° 13. 201. [Fecha de consulta: 01 de junio del 2020].
- Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=s1729-48272007000100009&script=sci_arttext
56. SARWAR, Nadeem, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Revista Chemosphere* [en línea]. Vol. 171, marzo 2017. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2020].
- Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653516318574>
57. SASMAZ, Merve, ÖBEK, Erdal y Sasmaz, Ahmet. Bioaccumulation of cadmium and thallium in Pb-Zn tailing waste water by *Lemna minor* and *Lemna gibba*. *Applied Geochemistry* [en línea]. Vol 100, 2019. [Fecha de consulta: 28 de setiembre de 2020].
- Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0883292718303603>

58. SINHELI, Danilo y BIANCHINI, Irineu. Phytoremediation of Cd, Ni, Pb and Zn by minimal Salvini. *Rev Internacional Journal of phytoremediation* [en línea]. Junio del 2015. [Fecha de consulta: 27 de setiembre de 2020].
Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2014.1003793>
59. SING, Varinder, et al. Fitorremediación de metales tóxicos presentes en el suelo y el medio acuático: una revisión crítica. *Environ Sci Pollut Res*. 27 de septiembre de 2020. . [Fecha de consulta: 01 de septiembre de 2020].
Disponible: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10713-3>
60. SCHWEITZER, Linda Y NOBLET, James. Water Contamination and Pollution. *Revista Green Chemistry* [en línea].2018. [Fecha de consulta: 26de abril de 2020].
Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012809270500011X?via%3Dihub>
61. SHAHID, Munazzam, et al. Potentialities of floating wetlands for the treatment of polluted water of river Ravi, Pakistan. *Ecological Engineering* [en línea]. Vol. 133, agosto 2019. [Fecha de consulta: 15 de Mayo de 2020].
Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857419301399>
62. SHAFQAT, Ali, et al. Application of Floating Aquatic Plants in Phytoremediation of Heavy Metals Polluted Water: A Review. *Sustainability* [en línea]. Vol 12, 3 de marzo de 2020. [Fecha de consulta: 27 de setiembre de 2020].
Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/339457929_Application_of_Floating_Aquatic_Plants_in_Phytoremediation_of_Heavy_Metals_Polluted_Water_A_Review
63. SELVAKUMAR, Rajendran, et al. Challenges and complexities in

remediation of uranium contaminated soils: A review. *Revista Journal of Environmental Radioactivity* [en línea]. Vol. 192, diciembre 2018. [Fecha de consulta: 26de abril de 2020].

Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X18300079?via%3Dihub>

64. SHUKLA, A. y SRIVASTAVA, S. A Review of Phytoremediation Prospects for Arsenic Contaminated Water and Soil. *Revista Phytomanagement of Polluted Sites* [en línea]. 2019 [Fecha de consulta: 09 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128139127000089>
65. SURRIYA, Orooj, et al. Phytoremediation of Soils: Prospects and Challenges. *Revista Soil Remediation and Plants* [en línea]. 2015. [Fecha de consulta: 26de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780127999371000012?via%3Dihub>
66. TAMAYO, C. L., y SILVA, S, I. Técnicas e instrumentos de recolección de datos [en línea]. Chimbote: Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote, 2016 [fecha de consulta: 23 de junio de 2020]. Disponible en: <https://www.academia.edu/26384181>
67. TAREK, Galal, et al. Bioaccumulation and rhizofiltration potential of *Pistia stratiotes* L. for mitigating water pollution in the Egyptian wetlands. *International Journal of Phytoremediation* [en línea]. Vol.20, n°5, abril del 2018 [Consultado el 28 de abril de 2020]. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cmedm&AN=29053352&lang=es&site=ehost-live>
68. TING, W, et al. Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review. *Revista Journal of Water Process Engineering* [en línea]. Vol 22, abril 2018. [Fecha de

consulta: 09 de mayo de 2020].

Disponible

en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221471441730>

66 69

69. TRUU, Jaak, et al. Phytoremediation and Plant-Assisted Bioremediation in Soil and Treatment Wetlands: A Review. *Revista The Open Biotechnology Journal* [en línea]. n° 9, 2019. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2020].

Disponible

en:[https://www.researchgate.net/publication/277851573_Phytoremediation_](https://www.researchgate.net/publication/277851573_Phytoremediation_And_Plant-Assisted_Bioremediation_In_Soil_And_Treatment_Wetlands_A_Review)

[And_Plant-](https://www.researchgate.net/publication/277851573_Phytoremediation_And_Plant-Assisted_Bioremediation_In_Soil_And_Treatment_Wetlands_A_Review)

[Assisted_Bioremediation_In_Soil_And_Treatment_Wetlands_A_Review](https://www.researchgate.net/publication/277851573_Phytoremediation_And_Plant-Assisted_Bioremediation_In_Soil_And_Treatment_Wetlands_A_Review)

70. VELASQUEZ, Johana. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* [en línea]. Vol8, n° 1, 2017. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2020].

Disponible

en:

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eih&AN=126111519&lang=es&site=ehost-live>

ISSN: 2145-6097

71. VENKATESWARLU, V, VENKATRAYULU, C y JHANSI LAKSHMI BA, TCH. Phytoremediation of heavy metal Copper (II) from aqueous environment by using aquatic macrophytes *Hydrilla verticillata* and *Pistia stratiotes*. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies* [en línea]. Vol 7, n°4, 2019. [Fecha de consulta: 29 de setiembre de 2020].

Disponible

en:

<http://www.fisheriesjournal.com/archives/2019/vol7issue4/PartF/7-4-56-680.pdf>

72. VIVAR, Cristina, et al. Primeros pasos en la investigación Cualitativa: Desarrollo de una propuesta de investigación*. *Index de Enfermería* [en línea]. Vol. 22, N° 4, diciembre de 2013. [Fecha de consulta: 20 de junio de 2020].

Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/271272090>

ISSN: 1132 - 1296

73. VILLENNA CHAVEZ, Jorge Alberto. Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Rev. Perú. med. exp. salud publica* [en línea]. vol.35, n.2, 2018. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020].

74. XIN-YU, Lan, et al. Subcellular distribution of cadmium in a novel potential aquatic hyperaccumulator e *Microsorium pteropus*. *Environmental pollution* [en línea]. No. 248. 2019 [Consultado el 27 de abril de 2020].

Disponible en:
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eoah&AN=49174428&lang=es&site=ehost-live>

75. XIN, Jianpan, et al. *Pontederita cordata*, an ornamental aquatic macrophyte with great potential in phytoremediation of heavy-metal-contaminated wetlands. *Rev. Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea]. Vol. 203, 15 de octubre del 2020. [Consultado el 10 de septiembre de 2020].

Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651320308630?via%3Dihub>

76. ZHU, Huihui, et al., Phytohormones-induced senescence efficiently promotes the transport of cadmium from roots into shoots of plants: a novel strategy for strengthening of phytoremediation. *Revista de materiales peligrosos* [en línea]. Vol.388, abril del 2020. [Consultado el 27 de abril de 2020].

Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S03043894203006>

ANEXOS

Anexo 1: Ficha de recolección de datos

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|  UCV UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO | FICHA DE ANALISIS DE CONTENIDO |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|

TITULO:

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| AÑO DE PUBLICACION | LUGAR DE PUBLICACION |
| | |

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| TIPO DE INVESTIGACION: | AUTOR (ES): |
| | |

| | |
|-----------------------------------|--|
| PALABRAS CLAVES | |
| PROBLEMA | |
| OBJETIVO | |
| ESPECIES MACRÓFITAS | |
| ZONA DE ESTUDIO | |
| PARAMETROS DE MEDICION | |
| TECNICAS ESTADISTICAS | |
| RESULTADOS | |
| CONCLUSIONES: | |



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

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

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, HUARACA HUAMAN ANDREA, LUJAN ESPINOZA CARLOS RAUL estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "REVISIÓN SISTEMÁTICA: FITORREMEDIACIÓN EMPLEANDO PLANTAS HIPERACUMULADORAS ACUÁTICAS PARA LA ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS CONTAMINADAS", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

| Nombres y Apellidos | Firma |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| LUJAN ESPINOZA CARLOS RAUL DNI: 75361665 ORCID 0000-0002-3074-580X | Firmado digitalmente por: CLUJANES25 el 23-12-2020 22:04:16 |
| HUARACA HUAMAN ANDREA DNI: 70776407 ORCID 0000-0002-1983-0704 | Firmado digitalmente por: HUARACAHU el 23-12-2020 22:11:55 |

Código documento Trilce: INV - 0157044

