



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“Revisión sistemática sobre los métodos de biorremediación de  
suelos contaminados por metales pesados como Níquel, Zinc y  
Mercurio”**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniera Ambiental

**AUTORES:**

Huanuco Evangelista, Lizett Kelly (ORCID: 0000-0002-7978-9854)

Temoche Cortez, Kiara Lizbeth (ORCID:0000-0003-1669-1910)

**ASESOR:**

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

**LINEA DE INVESTIGACION:**

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2020

**Dedicatoria:**

Dedicamos este trabajo a nuestras familias que han sido nuestro primer pilar para poder cumplir nuestros objetivos de llegar a ser profesionales de éxito y que nos han impulsado a la realización de esta tesis de investigación.

## **Agradecimiento**

A la Universidad César Vallejo Lima este en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental por hacer de nosotras unas profesionales.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula .....	i
Dedicatoria .....	ii
Agradecimiento .....	iii
Índice de contenidos.....	iv
<b>RESUMEN</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
I. Introducción.....	7
II. Marco Teórico.....	13
III. Metodología.....	16
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	16
3.2. Categorías, sub-categorías y matriz de categorización apriorística....	17
3.3. Escenario de estudio.....	18
3.4. Participantes.....	18
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	19
3.6. Procedimiento.....	20
Diagrama de bloques.....	21
3.7. Rigor científico.....	22
3.8. Método de análisis de información.....	24
3.9. Aspectos éticos.....	25
IV. Resultados y discusión.....	26
V. Conclusiones.....	38
VI. Recomendaciones.....	39
Referencias.....	41
Anexos	

## Resumen

El principal objetivo de este trabajo es presentar los métodos de biorremediación más eficaces en funciones de remoción de contaminantes como son específicamente los metales pesados Zinc, Níquel y Mercurio, mediante únicamente técnicas que involucren el uso de métodos biológicos como son la fitorremediación, micorremediación y remediación bacteriana, los cuales usan respectivamente plantas, hongos y bacterias; o en procesos más complejos el uso sincronizado de dos métodos, siendo una de las mejores opciones la fitoextracción como un método específico de fitorremediación que nos permite acumular el metal pesado en una biomasa extraíble, sin embargo los avances en biotecnología están brindando investigaciones de usos de bacterias modificadas genéticamente con fines de recuperación de suelos contaminados con grandes concentraciones de múltiples metales pesados por actividades relacionadas a minería, se explicara a su vez las especies biológicas involucradas en la recopilación de los artículos.

**Palabras clave:** Biorremediación, Fitorremediación, Micorremediación, Fitoextracción, Metales Pesados.

## **ABSTRACT**

The main objective of this work is to present the most effective bioremediation methods in terms of eliminating contaminants such as the heavy metals zinc, nickel and mercury, using only techniques that involve the use of biological methods such as phytoremediation, micoremediation. and bacterial remediation, which use plants, fungi and bacteria respectively; or in more complex processes the synchronized use of two methods, one of the best options being phytoextraction as a specific method of phytoremediation that allows us to accumulate heavy metal in an extractable biomass, however advances in biotechnology are providing research on the uses of genetically modified bacteria for the purpose of recovering soils contaminated with high concentrations of multiple heavy metals by activities related to mining, the biological species involved in the compilation of the articles will be explained.

**Keywords:** Bioremediation, Phytoremediation, Mycorrediation, Phytoextraction, Heavy Metals.

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se ha identificado un gran crecimiento de la contaminación por metales pesados, que compromete severamente la salud, seguridad alimentaria y medio ambiente afectando al aire, agua y suelo (Reyes, et al, 2016, p. 74). La contaminación ambiental es considerada actualmente como un origen de problemas de salud de las poblaciones, y una amenaza. Por esa razón se deben establecer concentraciones máximas admisibles de los contaminantes como por ejemplos los metales pesados en los suelos, para poder asegurar la protección de la salud pública y el cuidado del medio ambiente (Martínez et al, 2000, p. 3). Las concentraciones máximas admisibles de Zinc, según Kabata–Pendias (2004), nos dice que varían entre 10 y 100 mg/Kg, además que estos conforman los elementos esenciales para las plantas (Mahecha, J., et al, 2015, p. 121). Mientras que la concentraciones máximas admisibles de Níquel en suelos está entre 0,1 a 5 mg/Kg, no obstante, cuando se halla en niveles desde 10 a 100 mg/Kg, ello puede generar problemas de toxicidad (EPA, 1996) citado por (Mahecha, J., et al, 2015, p. 121). Las concentraciones máximas admisibles de Hg en Europa se considera por desde 0.1 hasta un máximo 1 mg/kg de Hg presente en suelo agrícola (García et al, 2015, p. 175).

La realidad problemática del trabajo de investigación está enfocada, en que hoy en día la contaminación por metales pesados se ha convertido en una problemática ambiental en el mundo. Ya que se conoce que las industrias y la minería son las principales fuentes de origen de contaminación, ya que estos metales son tóxicos para el ambiente, alteran el ciclo natural del suelo y son la causa de muchos problemas para la salud humana. (Petelka, et al, 2019, p.1). Es así que la contaminación del suelo por metales pesados afecta de forma negativa a los macro y micro organismos vivos, produciendo un cambio en su naturaleza. (Arzoo, Bihari. 2019, p. 14). Además las actividades naturales como la erupción de volcanes y erosión de cuerpos rocosos junto a las actividades antropogénicas como la industrialización y urbanización contribuyen de forma significativa a la acumulación de los metales pesados en el suelo. (Shah, Daverey, 2020, p. 84). No obstante, la industrialización, los relaves mineros y los desechos municipales contenidos con metales pesados son la principal causa de la contaminación del suelo con metales pesados y estos persisten en los suelos

por un largo periodo de tiempo ya que no son biodegradables en la naturaleza, lo que conlleva a una afectación en la actividad microbiana que es responsable de la fertilidad del suelo. (Shah, Achlesh. 2020, p.2).

El uso de productos químicos para la cosecha han contribuido de forma negativa y significativa en el aumento de los metales pesados en el suelo, los efectos negativos de estos han provocado efectos nocivos de contaminación que se reflejan en la actividad agrícola, incluido la fitotoxicidad por niveles muy altos encontrados en la composición de suelo. (Preston, et al. 2016).

Por lo tanto, formulamos el problema general de la investigación

¿Cuáles son los métodos de biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como Níquel, Zinc y Mercurio?

Es por las investigaciones anteriormente mencionadas que se planteó las siguientes preguntas específicas, ¿Cuáles son las especies biológicas usadas en los métodos de biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como níquel, zinc y mercurio? ¿Cuál es el método de biorremediación más utilizado para el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados como níquel, zinc y mercurio?

Justificamos teóricamente la investigación, mediante la importancia del estudio profundizado de los métodos de biorremediación, ya que para comenzar a identificar métodos, se debe empezar por estudiar los agentes contaminantes y su proceso de alteración sobre el suelo. Estos procesos van a estar relacionados a las especies biológicas que se usaran para la biorremediación y los metales pesados, así como también a los compuestos químicos tóxicos derivados que inciden en la introducción de más metales pesados sobre el suelo. Ya que el suelo es usado para actividades agrícolas, que brindan grandes recursos a las poblaciones del mundo. Por tal razón, tenemos que realizar un estudio específico sobre los métodos y su eficacia en la remoción de los metales pesados suscritos en el título de la investigación.

Nuestra justificación social se da porque el uso de estos métodos o técnicas han demostrado resultados muy satisfactorios por reducir los niveles de metales pesados en suelos, por lo tanto la efectividad de estas técnicas lo que busca es



beneficiar económicamente al sector agrícola de diferentes países, quienes en el contexto de buscar soluciones al problema de la contaminación, pueden contar con una guía instructiva y detallada sobre la aplicación de métodos de biorremediación para poder obtener un suelo libre de metales pesados, con lo cual ellos podrán tener mejores resultados en sus cosechas y una mejor calidad de productos que también a su vez aportarán a preservar la calidad del suelo.

La siguiente investigación se enfocó en el objetivo general que es describir los métodos de biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como Níquel, Zinc y Mercurio, además de ello se realizó los objetivos específicos como: identificar las especies biológicas usadas en los métodos de biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como Níquel, Zinc y Mercurio e identificar el método de biorremediación más utilizado para el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados como Níquel, Zinc y Mercurio.

Sin embargo las siguientes investigaciones de Hashemi y Tabibian (2018) nos mencionó que el objetivo en su estudio es absorber el Mercurio utilizando la especie *Mulberry nigra* y esto va a depender de los niveles de contaminación y las condiciones climáticas, para el estudio se añadió soluciones de nitrato de mercurio (II) con 30, 50 y 70mg/l en un suelo no contaminado y luego de 8 meses se observó que la concentración en la hoja, tallo y raíz arrojó 55.67, 50 y 65mg/kg indicando como resultado que al utilizar la especie si es un método para la remediación de los suelos contaminados por Mercurio.

Soto y Jiménez (2019) describió que para evaluar los niveles de contaminación se tuvo que aplicar un diseño factorial tres especies y 5 tratamientos con los metales y cada uno con dos repeticiones. Como resultado arrojó que la mayor absorción de zinc, plomo y cadmio fue en la especie *Amranthus hybridu* en el tallo, raíz y hojas; en la especie *Brassica rapa* se observó una alta concentración en las raíces y disminución en las hojas y grosor del tallo; en la especie *Amranthus spinosus* los resultados fueron los más altos de acumulación de Zinc 24.28 ppm en las raíces, en hojas Zinc 11.63ppm y plomo 1.74 ppm y cadmio 0.55 ppm; concluyen que las 3 especies si es una buena opción para la fitorremediación.

He, Chiquan y et al (2020) indicó en su objetivo del estudio se basa en que tanto es la capacidad de absorción y la tolerancia que tienen las plántulas de ricino para la los metales Cd y Zn; los resultados arrojaron que las plántulas tienen buena eficacia a la contaminación con 0-5mg/kg de Cd y 380mg/kg de Zn. Mientras que su concentración máxima de acumulación de Cd y Zn, 175.3mg Cd/kg y 386.8 mg/kg Zn; lo que nos indica que la raíz ha influenciado en la acumulación para los metales Zn y Cd.

Vijayan y Sushama (2018) mencionó en su investigación que su objetivo fue comparar diferentes tipos de plantas y las partes en el fitoacumulación en suelos contaminados. Inicialmente el suelo contiene Pb 11 mg/kg-1, Co 57mg/kg-1, Ni 105mg/kg-1, Cr y Hg 0.5 mg/kg-1, en el estudio de cultivos de marihuana se utilizó vetiver caléndula y girasol. Los resultados arrojaron que el vetiver era un translocador de Cr, Ni, Pb Co, y Hg. La caléndula translocó todo menos el Co, por otro lado el girasol fue un fitoestabilizador de Pb y translocó Co, Ni y Cr, concluyendo que el vetiver fue más eficiente en la eliminación de los metales Cr. Ni. Co y Pb.

Morar, Iantovics y Glicor (2018) indicó en su investigación que el objetivo va ser determinar que las plantas de cultivo reduzcan la concentración de metales en los suelos contaminados por las industrias. Realizó tres cultivos trigo de primavera, colza de primavera y soja, los resultados arrojaron que el potencial para la fitorremediación de metales, excepto níquel es semejante para las tres plantas. Los autores concluyen que la elección de las plantas se debe hacer bajo otras recomendaciones además del potencial de fitorremediación, inversión financiera, etc.

Abdullahi, Audu y Bala (2017) explicó en su investigación que el objetivo se basa en ver que la especie *Jatropha curcas* es la más adecuada para la fitorremediación el resultado arrojó que la concentración de metales tienen una secuencia Zn>Cu>Cd en el cual la mayor acumulación se dio en las raíces. Los autores concluyen la especie si tiene potencial para fitoestabilización y fitoextracción según los metales.

Elhag, M., et al (2018) explicó en su investigación que el objetivo del estudio se basa en medir la cantidad de metales tóxicos en los suelos de Arabia Saudita. En

el cual durante un año se tomaron 4 muestras trimestrales el cual arrojó que el As tiene la mayor acumulación pero esto fue rechazado en 9 meses, en cambio la acumulación de Hg no tuvo resultados de absorción por la planta de Aloe vera, concluyendo que solo el aloe vera absorbe mayor concentración de metales en el As.

Khan, et al (2019) tuvo como objetivo probar en su estudio dos diferentes cultivos de ricino para la remediación de suelos con metales como Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn, en donde se demostró tener una máxima capacidad de acumulación para la absorción como para Cu 40mg/kg-1, Cr 8mg/kg-1, Fe 80mg/kg-1, Mn 80mg/kg-1, Ni 40mg/kg-1, Pb 16mg/kg-1, Zn 80mg/kg-1. Lo que indica que se pueden aplicar a la remediación de áreas extensas.

De La Fourniere, et al (2019) tuvo como objetivo probar que el mercurio es uno de los metales más contaminantes por lo que la fitorremediación por la especie *Spirodela Intermedia* es ampliamente aplicable ya que su bioacumulación máxima llegó a las 96h con una concentración inicial de 10mg/L en laboratorio, en cuanto según a los resultados obtenidos es recomendable ser aplicado en una escala mayor.

Bian, et al (2019) tuvo como objetivo probar que las plantas de bambú son grandes acumuladores de metales pesados pero sus estudios no son comunes, por lo que, en su estudio, se sabe que la acumulación se da principalmente la raíz en donde los metales pesados se destruyen en la pared celular, vacuola y citoplasma. Sin embargo de deben usar medidas activas adicionales para optimizar la capacidad de retención.

Steliga y Kluk (2020) tuvo como objetivo usar la especie *Festuca arundinacea* en suelos contaminados con Pb, Cd y Ni en donde se obtuvo una eficacia en un plazo de 6 meses satisfactoria en su fitorremediación, acumulándolos desde sus raíces hasta sus brotes entrando en un rango del 17.4-23.1%.

Alvarez, Ales, Garcia (2019) tuvo como objetivo aplicar la especie *Jatropha curcas L* para la remoción de metales pesados en donde se utilizó mezclas de suelos mineros aplicando la especie *Jatropha curcas L* durante 60 días en invernadero se encontró que tiene una rápida adaptación a climas frescos y

remueve hasta >10mg/kg-1 de Hg, para los metales tales como Cr, Ni, Cu, Zn y Pb su rango obtuvo 10-1000mg/kg-1 por lo que se redujeron entre 30 y 70% y 15% de Fe únicamente, mientras que el Sn y Cd fueron completamente eliminados.

Hejna, et al (2020) tuvo como objetivo la aplicación de las especies *T. latifolia* y *T. palustris* que para indicar la eficiencia de fitorremediación en donde mediante la contaminación de metales pesados se usaron las especies *T. latifolia* y *T. palustris* que presentaron una alta acumulación de metales en su aplicación como Zn y Cu sin presentar signos de toxicidad ni efecto visual.

Lu, et al (2019) mencionó en sus objetivos que para las zonas contaminadas por la minería en este estudio se usaron 3 especies como *Setaria viridis*, *Echinochloa crus-galli* y *Phragmites australis* en donde se muestran una alta absorción de metales pesados en sus raíces por lo que podría mejorar significativamente la tasa de reducción de metales y mejora en calidad del suelo.

Midhat, et al (2019) indicó en sus objetivos que se usaron suelos de 3 sitios mineros muestra que de 46 especies aplicadas para la remoción de metales pesados, en donde se mostró que 8 de ella fueron las más acertadas y eficientes para la acumulación en sus raíces y brotes sin verse afectadas considerablemente, siendo estas *Hirschfeldia incana* (L.) Lagr.-Foss, *Citrullus vulgaris* (L.) Schradi, *Portulaca oleracea* L., *Stipa capensis* Thunb., *Lactuca viminea* (L.) J.Presl & C.Presl, *Forsskaolea tenacissima* L., *Lycium intricatum* Boiss., y *Hammada scoparia* (Pomel) Iljin.

Eltaher, et al (2019) en su objetivo se refiere la demostración de la facilidad de fitorremediación de contaminantes como metales pesados en la que se demuestra el aprovechamiento que la especie *Pluchea dioscoridis* tiene de acumulación de metales pesados como Cu, Pb, Cd y Cr y sugiere ser muy efectiva para la fitorremediación en suelos contaminados. Durante los 7 meses se demostró que en el último mes se llegó a su acumulación y fitoestabilización máxima, siendo estas más altas en las raíces más que en los brotes.

Cicero, et al (2017) tuvo como objetivo indicar que la especie *P. australis* durante los dos ciclos anuales consecutivos no pudo eliminar el Hg presente en el suelo

mientras que si tuvo éxito sustancial con metales como Ni, Mo y Cr. En el tejido superficial, en el primer ciclo tiene la facilidad de fitorremediación con metales como Co, Ni, Mo, Cd, Pb, Ba, Cr, Cu, Fe, Zn y Mn mientras que en tejido subterráneo en el segundo ciclo pueden inmovilizar metales como Ni, As, Pb, Se, Ba, Cr, Cu, Fe, Mn y Zn.

Baldantoni, et al (2014) en su objetivo indica que en la experimentación en maceta con suelo recolectado de un espacio urbano-industrial se encontró que los clones de álamo como *P. alba AL22* y *P. nigra N12* muestra su alta capacidad para tolerar, absorber y acumular metales como Cu y Zn, por lo que ambos clones son adecuados para la fitoestabilización de Cu, Fe y Pb y para la fitoextracción de Cd y Zn.

## **II. MARCO TEÓRICO**

En teoría se considera que el suelo es un cuerpo dinámico, abierto, natural, completo y polifuncional siendo así uno de los recursos naturales más importantes ya que en ella se realiza diversidad de actividades funcionales para la vida terrestre en general. Tiene carácter anisótropo que tiene un inicio en un material que cambia tanto física como químicamente durante el paso del tiempo dependiendo de sus condiciones como climáticas, geomorfológicas y/o bióticas en donde con el paso del tiempo se van formando los horizontes con características físicas, químicas o biológicas diferentes en donde se constituye el perfil del suelo. (Ballesta, 2017, p.3). Así mismo es un espacio en donde se repercute las actividades antropogénicas siendo dañadas o degradadas con el tiempo por lo que se procura preservarla y regularla. (Burbano, 2016, p.119).

Para Rodriguez, McLaughlin y Pennock, (2019) nos menciona que la contaminación de suelo se refiere a la presencia de un químico o sustancia externa que pueda afectarlo en altas concentraciones, estas en su mayoría son de origen antropogénico pero también pueden ser de origen natural como la filtración de minerales que suelen ser tóxicos en concentraciones elevadas (p.1).

La biorremediación es una técnica para recuperar suelos contaminados de una forma verde y práctica ya que se usan organismos para su remediación, la forma adecuada para su funcionamiento es ayudar a estos con factores físicos y

químicos para su eficiencia como agua, temperatura, pH, oxígeno, nutrientes mayores y menores. (UNAM, 2010, p.13). Una de las ventajas de la biorremediación es que a comparación de otras técnicas de remediación esta suele ser más barata y menos invasiva por lo que su daño ecológico no es significativo. Por otro lado, sus desventajas es que los compuestos contaminantes clorados y algunos metales pesados no logran degradarse. (Garzón, Rodríguez & Hernández, 2017, p.312).

Para Cota (2019) nos explica que la biorremediación in situ tiene 4 métodos en los que se conocen como atenuación natural que depende de diversos factores físicos, químicos y biológicos que logran reducir la toxicidad y concentración de contaminantes. La bioventilación consiste en suministrar aire y nutrientes en la zona contaminada. En la bioestimulación se aumenta la actividad de las bacterias en la zona contaminada y en la bioaumentación se añaden microorganismos listos para acelerar la biorremediación (p.39).

El suelo representa ser receptor de varios contaminantes, gracias a esto se debe recuperar sitios contaminados para asegurar la salud de la población actual y futuramente la preservación ambiental. (Cristaldi, et al, 2020, p.2).

La fitorremediación se considera un método alternativo gracias a su bajo costo, su sostenibilidad, ser conveniente para la estabilidad ambiental y ser aplicable para la calidad de suelos y aguas subterráneas contaminadas con metales pesados (Willscher, et al, 2016, p.2).

La fitorremediación es un método que se encuentra dentro de las técnicas de la biorremediación, en la cual consiste en el uso de plantas, siendo estas una forma de remediar suelos gracias a su facilidad de absorber, tolerar y acumular concentraciones grandes de contaminantes, es una técnica que tiene como característica no ser compleja ni costosa y además es una técnica limpia ya que no afecta a la estructura del suelo dejándola realizar sus funciones de forma óptima. (Cordero, 2015, p.24).

Para Li, et al, 2020 "La fitorremediación comparado con otros métodos de remediación de suelos es un método verde y sostenible, tiene como característica ser un hiperacumulador con una alta tolerancia a cargas pesadas

dependiendo del tamaño de la biomasa” (p.2). Puede ser una tecnología para poder eliminar y/o degradar productos contaminantes inorgánicos y orgánicos en los suelos, también se puede aplicar en áreas extensas, no requiere mayor control o supervisión y tiene un costo bajo globalmente a comparación con otras tecnologías. (Cameselle, Gouveia y Urrejola, 2019, p.482).

Los procesos para la fitorremediación es: La fitoestabilización inmoviliza la migración de los contaminantes del suelo mediante la absorción y la acumulación en sus raíces. Sirve para suelos superficiales con textura fina y con contenido de materia orgánica, tiene como característica ser de bajo costo, de una aplicación no difícil y ser estéticamente agradable. En la rizofiltración las plantas suelen cultivarse de forma hidropónica para usarla en su forma ya madura para que sus raíces puedan absorber y acumular los metales en donde se terminan de cosechar hasta su saturación y terminan por su disposición final. (Delgadillo, et al, p.601).

En la fitoextracción o fitoacumulación los metales se absorben mediante las raíces de las plantas y se acumulan en sus tallos y hojas, para su aplicación es necesario escoger la planta más adecuada dependiendo del desarrollo. La fitoacumulación es una técnica que puede ser aplicada en repetidas ocasiones hasta que se requiera o hasta que las concentraciones de los metales lleguen a los límites aceptables. La fitovolatilización se da a medida del desarrollo de la planta en donde por medio del agua junto con los contaminantes orgánicos e inorgánicos en donde llegan a sus raíces y suelen volatilizarse al ambiente. (Delgadillo, et al, p.601).

La biodegradación tiene como característica el uso de las plantas y los microorganismos que se asocian a estas degradan los contaminantes orgánicos. En estos procesos los contaminantes son metabolizados en sus tejidos en donde las plantas producen enzimas como la dehalogenasa y la oxigenasa que beneficia en su catalización. La fitoinmovilización ayuda a la reducción de la biodisponibilidad de contaminantes mediante su producción de compuestos químicos en el suelo y raíz en donde se inactiva la toxicidad. (Delgadillo, et al, p.601).

Para Reyes, et al 2016 nos dice que la contaminación a consecuencia de los metales pesados y metaloides en el agua, suelo y aire es una gran problemática ya que esto compromete tanto la salud y la seguridad alimentaria a un nivel global. El mercurio es un metal que a temperatura ambiente es líquido y puede hallarse con derivados orgánicos e inorgánicos. Su toxicidad depende de en qué fase química se encuentre. (p.1).

### **III. METODOLOGIA**

#### **3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

La investigación es de tipo aplicado, con un enfoque cualitativo por la presentación de características de las categorías de la investigación. El enfoque de investigación del tipo cualitativo utiliza la recolección y el análisis de datos, para refinar las preguntas de la investigación y constatar, argumentar o revelar nuevas preguntas sobre el proceso que se está investigando (Hernández, Fernández & Baptista (2014), p. 7). Por ello decimos que nuestro tipo de investigación será aplicado, ya que únicamente haremos síntesis de la evidencia recolectada y no se harán pruebas pre experimentales ni experimentales.

La investigación usó un diseño narrativo de tópicos como diseño de investigación el cual, según Hernández, Fernández, & Baptista (2006) citado por Gonzales (2018), es un procedimiento consiste en la recopilación de información narrativa de las experiencias de los participantes en función del planteamiento del problema; para hacer un desarrollo general que abarque las narrativas individuales, es decir, los investigadores sitúan narraciones y acontecimientos de los participantes, (p. 69). Por tal razón al usar información de los participantes de forma narrativa como son los estudios de artículos científicos indexados, y solo canalizar la información objetiva de los métodos sobre biorremediación de metales pesados, se define que nuestra investigación usó este diseño.

#### **3.2. CATEGORÍAS, SUB-CATEGORÍAS Y MATRIZ DE CATEGORIZACIÓN APRIORÍSTICA**



## MATRIZ DE CATEGORIZACIÓN APRIORÍSTICA

**TÍTULO:** Revisión sistemática sobre los métodos de biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como Níquel, Zinc y Mercurio.

**OBJETIVO GENERAL:** Describir los métodos de biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como níquel, zinc y mercurio.

OBJETIVO ESPECÍFICO	PROBLEMA ESPECÍFICO	CATEGORÍAS	SUB CATEGORÍAS	CRITERIO		
Identificar las especies biológicas usadas en los métodos de biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como níquel, zinc y mercurio	¿Cuáles son las especies biológicas usadas en los métodos de biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como níquel, zinc y mercurio?	Especies biológicas usadas en los métodos de biorremediación (Singh et al, 2020)	<i>Brassica</i> (Zhang, H. et al, 2020)	Por los metales pesados sobre los que actúan		
			<i>Thiampi</i> (Verma, S. & Kuila, A, 2019, p. 28)			
			<i>Eichhornia</i> (Verma, S. & Kuila, A, 2019, p. 8)			
			<i>Pleurotus</i> (Morales et al, 2010, p. 112)			
			<i>Bacillus</i> (Singh, 2020, p. 7)			
			<i>Pseudomonas</i> (Nwaehiri, U. et al, 2020, p. 4)			
Identificar el método de biorremediación más utilizado para el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados como Níquel, Zinc y Mercurio	¿Cuál es el método de biorremediación más utilizado para el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados como níquel, zinc y mercurio?	Métodos de biorremediación (Kapahi, M. & Sachdeva, S., 2019)	Fitoextracción (Emenike, C. et al, 2018)	Por el tiempo del proceso	Por el grado de viabilidad del proceso	Por la eficiencia del proceso
			Fitovolatización (Zhang, H. et al, 2020)			
			Fitoestimulación (Verma, S. & Kuila, A, 2019)			
			Microrremediación (Kapahi, M. & Sachdeva, S., 2019)			
			Remediación Bacteriana (Agarry, S. et al, 2019)			

### **3.3. ESCENARIO**

Según Ortiz et al (2016), el escenario de investigación es aquel que permite al investigador relacionarse e interactuar con el fenómeno de estudiado (p. 34). Por ello como escenario de la investigación, del diseño narrativo de tópicos se consideran los espacios donde se realizaron investigaciones sobre artículos científicos altamente relevantes, sobre biorremediación de suelos contaminados con níquel, zinc y mercurio. Para ello se deben respetar los criterios establecidos en las categorías y subcategorías, para permitir ubicar y describir correctamente el ambiente de la investigación. Por la naturaleza de los estudios, los escenarios están conformados por centros de investigación que aplican técnicas biorremediadoras sobre suelos impactados con los elementos anteriormente mencionados. Estos espacios están conformados por muestras de suelo, con parámetros fisicoquímicos distintos para evaluar la eficacia de los tratamientos.

### **3.4. PARTICIPANTES**

Wiltheing & Bernan (2017), en su investigación cualitativa describió que los participantes se conforman por los individuos que sean capaces de reproducir un determinado suceso de estudio (p. 17). En la presente investigación narrativa de tópicos se mencionó que los participantes son aquellas las fuentes de información, como artículos de revistas indexadas de ScienceDirect, Scopus, Web of science, Dialnet, ResearchGate & Scielo; ya que estos buscadores y bases de datos, contienen miles de artículos que han pasado estándares de calidad de revisiones, por esa misma razón también se consideró libros electrónicos revisados por entidades que mejoren su grado de validez de contenido para el citado de la metodología de la

investigación, se incluyó así mismo las investigaciones de departamentos de estadística públicos, etc.

### **3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Es importante especificar que la técnica usada para el análisis de la información adquirida de los artículos, es decir un análisis documental, a fin de sintetizar dicha información para responder a los objetivos específicos y al objetivo general. Luna (2015), nos dice que el análisis documental nos permite conocer el sistema de la organización del conocimiento en los documentos encontrados en el internet, empezando por el análisis del conocimiento dentro de estos sistemas informáticos (p. 77) [...] y que al hacer el análisis documental, se puede hacer más simple y representativo el trabajo de múltiples autores sobre un tema en particular (p. 86). Por ello mismo para recolectar la información consistente se debe priorizar obtenerla de los resultados, las conclusiones o recomendaciones del artículo científico.

En el diseño de una narrativa de tópicos se usó el instrumento de recolección de datos. Bernal et al (2018), mencionó que un instrumento de recolección de datos muy útil, es aquel que según la naturaleza del contenido, nos simplifique el desarrollo de los participantes en el escenario de la investigación (p. 3). El instrumento de esta investigación es una ficha de análisis de contenido sobre los artículos revisados selectos que presenten información sobre las posibles soluciones a los problemas del estudio, el esclarecimiento de los objetivos, el análisis de las categorías y subcategorías del estudio, ello evaluando las distintas recomendaciones, conclusiones y resultados obtenidos. En los que se debe tomar mayor relevancia en aquellos artículos con antigüedad no menor a 2 años, ya que

poseen información más actualizada. Revise la ficha de recolección de datos adjuntada en el **ANEXO 1**.

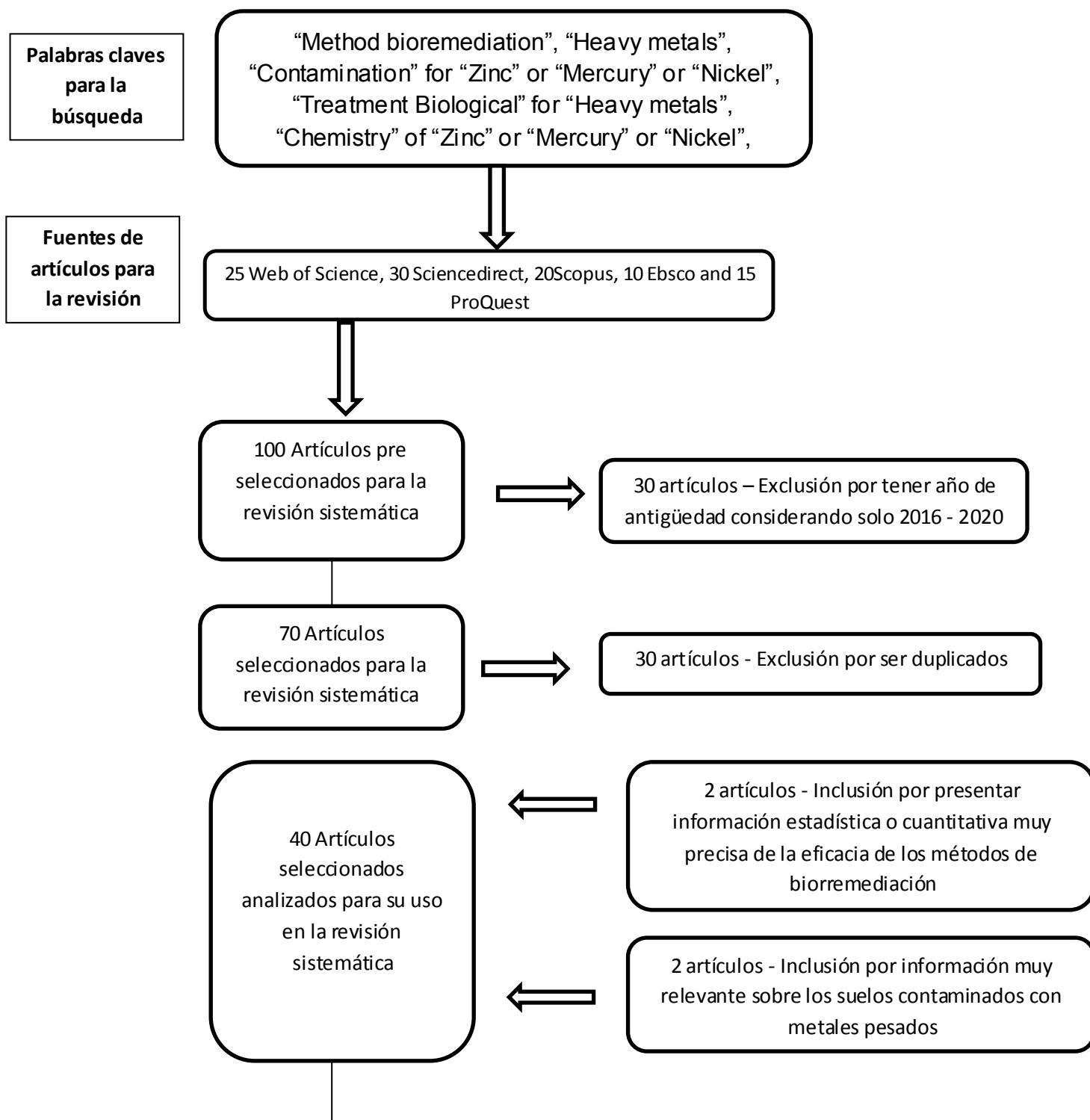
### **3.6. PROCEDIMIENTO**

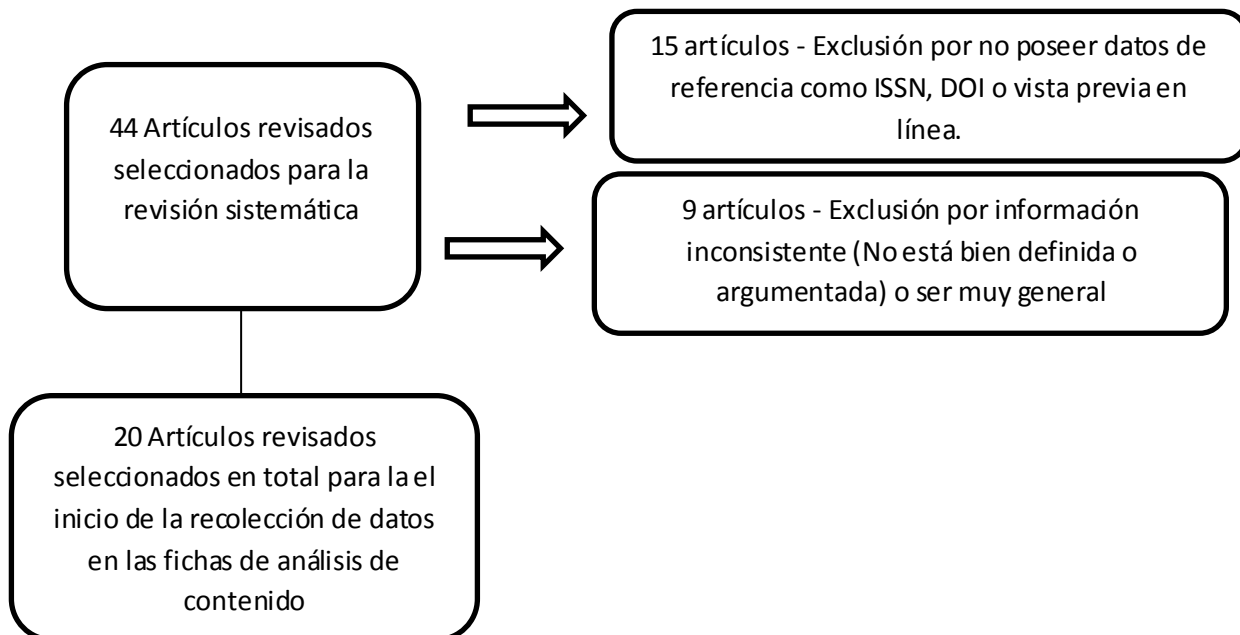
Con el objetivo de iniciar el proceso de investigación, se usó las palabras claves para la identificación de artículos. Estas palabras claves son: “Method bioremediation”, “Heavy metals”, “Contamination” for “Zinc” or “Mercury” or “Nickel”, “Treatment Biological” for “Heavy metals”, “Chemistry” of “Zinc” or “Mercury” or “Nickel”, “phytoremediation”, “micoremediation” and “nanoremediation”. Para la investigación de nuestra revisión sistemática se estableció en el procedimiento, múltiples criterios que permitieron estructurar la información y organizarla para un mejor procesamiento. El primer criterio es sobre la fuente de información, el segundo criterio es sobre la búsqueda de información, el tercer criterio la elección de artículos relevantes, además existen criterios inclusión y exclusión de artículos para mantener actualizada la investigación.

- Selección de buscadores y bases de datos de alta confiabilidad.
- Búsqueda de información sobre la temática relacionada a biorremediación de suelos contaminados.
- Búsqueda de precisión sobre suelos contaminados con metales pesados
- Búsqueda de precisión sobre contaminación con metales pesados como níquel, zinc y mercurio.
- Exclusión de artículos que no cumplan las exigencias de la investigación.
- Inclusión de artículos que brinden información para la orientación de la metodología
- Inclusión de artículos pre evaluados, que han pasado estándares mínimos de calidad de información.

- Exclusión de artículos por criterios de exclusión establecidos como año de antigüedad e irrelevancia de datos.
- Síntesis de información recolectada

### DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN DE LA REVISIÓN SISTEMÁTICA





### 3.7. RIGOR CIENTÍFICO

Dentro del rigor científico de la investigación se encontró 4 puntos para mejorar la calidad de la revisión sistemática. El primero es la dependencia la cual consiste en el grado en que los investigadores que recolecten datos afines en el campo y realicen los mismos análisis, brinden resultados similares. La dependencia permite la descripción explícita del proceso para establecer pistas sobre la revisión (Díaz, 2018, p. 795). Existen dos clases de dependencia, la interna y la externa, que buscan evidenciar el grado de similitud de investigación realizada. En ambos casos, ese grado no se expresa por medio de un coeficiente, sólo se verifica la sistematización en la recolección y el análisis cualitativo (Hernández, Fernández & Baptista, 2014, p. 45). Por tal razón, se dice que esta investigación cumple con el criterio del rigor científico de dependencia, al llevar semejanza a otros estudios sobre biorremediación por agentes biológicos. La credibilidad se da a través de observaciones y estudios a largo plazo de los artículos del estudio, recolectando información que hace descubrimientos o síntesis que son consistentes sobre la

naturaleza de la investigación (Meléndez, 2018, p. 5). La credibilidad es como un criterio de validez interna que permite aumentar la veracidad y fiabilidad de la investigación (Valencia & Mora, 2011, p. 503). Por consiguiente, este estudio de investigación cumple con el criterio del rigor científico de credibilidad, al presentar información consistente y muy bien argumentada, además esto aumenta más al momento de precisar las citas parafraseadas con mayor exactitud a la idea original del autor. Por su parte, la transferibilidad es la posibilidad de extender los resultados del estudio a otras aplicaciones. La transferibilidad es el criterio que se refiere a la posibilidad de sobreponer los resultados del estudio a otras investigaciones (Domínguez & Rodríguez, 2013, p. 120). El principio de transferibilidad consiste en considerar múltiples aspectos, por mantener similitud, en función a las características del escenario, los participantes de la investigación y la temática (Ventura & Barboza, 2017, p. 325). Por ese motivo el grado de transferibilidad es una función directa de la similitud entre los artículos científicos. Este estudio cumplió con el criterio de transferibilidad al permitir a otras investigaciones generalizar los resultados que se obtendrán. El último elemento del rigor científico es la auditabilidad, es la habilidad de otro investigador de seguir la pista o la ruta de lo que el investigador original ha hecho, es decir profundizar más para obtener información adicional y alta importancia a fin de mejorar la calidad de la anterior investigación realizada. La auditabilidad permite medir el nivel de habilidad del investigador para conservar el enfoque de su investigación (Becerra et al, 2014, p. 8). La auditabilidad es indicación de un análisis de datos de forma sistemática (Romero & García, 2019, p. 42). Esta investigación cumplió con dicho criterio al presentar el estilo de diseño de una narrativa de tópicos, que yace en algunas investigaciones sobre proyectos de biorremediación,

por tal razón se mantiene el objetivo común que es la descripción y el análisis de la eficacia de los procesos.

### **3.8. MÉTODO DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN**

Se escogió la categoría especies biológicas y con ellas las subcategorías con sus nombres científicos detallados, comenzando con una selección de los géneros como son: *Brassica*, *Thlaspi*, *Eichhornia*, *Pleurotus*, *Bacillus* y *Pseudomonas*, de los cuales se investigaron especies altamente potenciales como la *Brassica Juncea*, *Pleurotus Ostreatus*, *Pleurotus Sajorcaju*, *Bacillus Cereus*, etc. Los cuales tienen altas capacidades biorremediadoras sobre los suelos contaminados por Zn, Hg y Ni mediante la absorción, adsorción, volatilización y translocación de estos metales pesados, estas se agruparon por los metales en los que actúan, tomando como prioridad los metales pesados de la investigación, se agruparon por género y se hizo referencia del autor que señala dicha capacidad del método. El segundo objetivo tomo como categoría los métodos de biorremediación, siendo más específico y determinando un grado de eficacia y el tiempo que demora el método en biorremediar el suelo, también se agruparon por su consideración de nivel de costo (para estudiar la viabilidad de los métodos biorremediadores), ya que muchas investigaciones no presentan cantidades económicas exactas del costo de los procesos.

Para analizar la información de la información se debió proceder a la selección de información de las fichas de recolección de datos que fueron obtenidas de los artículos científicos. La mayor parte de estos artículos provinieron de Scopus y ScienceDirect. Por lo tanto, el criterio de elegibilidad de los artículos excluyo a todo artículo científico, que no tuviera información precisa, y solo hablara de manera colateral de los



métodos de biorremediación, ya que se busca información para poder explicar la pregunta general y los objetivos en base a las categorías propuestas. Por ello se estableció un diagrama de bloques sobre el método de análisis de información.

### **3.9. ASPECTOS ÉTICOS**

Los aspectos éticos que se tomó en cuenta para la revisión sistemática: Se cumplió con citar a los autores de las fuentes de información de los artículos científicos y se citó correctamente la paginación de la información extraída para lograr la validez del contenido, se parafraseó adecuadamente y se respetó las ideas de los investigadores originales, se brindó conocimiento científico solo bajo sustento y compromiso de realizar una investigación de calidad, por ello se realizó con las referencias bibliográficas en estilos ISO 690 – 2. Por consiguiente, se cumplió con el código de ética de la Universidad César Vallejo – 2020.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**TABLA 1**

GÉNERO	ESPECIE BIOLÓGICA	PAÍS	MÉTODO DE BIORREMEDIACIÓN	METALES PESADOS SOBRE LOS QUE ACTÚAN	AUTOR(ES)
<i>Brassica</i>	<i>Brassica Juncea</i>	India	Fitorremediación	<b>Hg</b> , As, Cd y Pb	Raj, D. (2018)
		Singapur	Fitorremediación	<b>Hg, Zn</b> , As y Se	Zhang, H. et al. (2020)
		Malasia	Fitorremediación	<b>Zn</b> y Cd	Emenike, C. et al. (2018)
<i>Thlaspi</i>	<i>Thlaspi caerulescens</i>	India	Fitorremediación	<b>Zn</b> , Cd, Pb y Cu	Verma, S. & Kuila, A. (2019)
		China	Fitorremediación	<b>Zn</b> y Cd	Li, C. et al (2019)
<i>Eichhornia</i>	<i>Eichhornia Crassipes</i>	India	Fitorremediación	<b>Zn</b> , Fe, Cd, Cu, B y Cr	Verma, S. & Kuila, A. (2019)
		Malasia	Fitorremediación	<b>Zn</b> , Cd, Pb y Cu	Emenike, C. et al. (2018)
<i>Pleurotus</i>	<i>Pleurotus Sajorcaju</i>	India	Micorremediación	<b>Hg</b> y Pb	Chandra, P. & Enespa (2019)
		India	Micorremediación	<b>Zn</b>	Purojit, J. et al. (2018)
	<i>Pleurotus Ostreatus</i>	India	Micorremediación	<b>Zn</b> , Cd y Cu	Verma, S. & Kuila, A. (2019)
		India	Micorremediación	<b>Zn</b> , Fe, Cr y Cu	Kapahi, M. & Sachdeva, S. (2019)

	<i>Pleurotus Eryngii</i>	India	Micorremediación	<b>Zn, Ni, Cu, Co y Cd</b>	Chandra, P. & Enespa (2019)
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus Cereus</i>	China	Remediación bacteriana	<b>Ni</b>	Chen, X. et al. (2019)
	<i>Bacillus Subtillus</i>	Colombia	Remediación bacteriana	<b>Hg, Cd y Cr</b>	Beltrán, M. & Gómez, A. (2016)
		China	Remediación bacteriana	<b>Ni</b>	Chen, X. et al. (2019)
		Nigeria	Remediación bacteriana	<b>Zn, Ni, Hg, Pb y Cr</b>	Agarry, S. et al. (2019)
<i>Pseudomonas</i>	<i>Pseudomonas Putida</i>	China	Remediación bacteriana	<b>Ni</b>	Chen, X. et al. (2019)
		Colombia	Remediación bacteriana	<b>Hg</b>	Beltrán, M. & Gómez, A. (2016)
	<i>Pseudomonas Balearica</i>	Colombia	Remediación bacteriana	<b>Hg</b>	Beltrán, M. & Gómez, A. (2016)
	<i>Pseudomonas Pyogenes</i>	Nigeria	Remediación bacteriana	<b>Zn, Ni, As, Pb y Cr</b>	Nwaehiri, U. et al. (2020)
	<i>Pseudomonas Aeruginosa</i>	Nigeria	Remediación bacteriana	<b>Ni, Zn y Cd</b>	Agarry, S. et al. (2019)

Se utilizaron 12 artículos de los 20 en total para la recopilación de la información de la tabla 1, relacionada a las especies biológicas usadas en los métodos de biorremediación y los metales pesados sobre los que actúan. Para esta tabla se identificaron géneros y posteriormente su nombre científicos de especies y se usó los artículos que especifican su tratamiento en determinados metales pesados considerando los 3 tipos de métodos biorremediadores como la fitorremediación micorremediación y remediación bacteriana. En la mayoría de los artículos mencionan que las especies para remover metales pesados son ***Pseudomonas Pyogenes [Ni, Zn]*** (Nwaehiri, U. et al., 2020), ***Pseudomonas Aeruginosa [Ni, Zn]*** (Agarry, S. et al., 2019), ***Bacillus Subtillus***

**[Ni, Zn y Hg]** (Agarry, S. et al., 2019), ***Pleurotus Eryngii* [Ni, Zn]** (Chandra, P. & Enespa, 2019) y ***Brassica Juncea* [Zn y Hg]** (Zhang, H. et al., 2020). Considerando que la mayoría de las especies encontradas en los artículos de investigación logran remover los metales pesados existentes en el suelo.

El método de Agarry, S. et al., y Chen, X. et al por remediación bacteriana usando *Bacillus Subtilis* remueve todos los metales pesados de la presente investigación (Zn, Ni y Hg), refutando a Beltrán, M. & Gómez, A., con su método de remediación bacteriana por pseudomonas que solo remueve Hg. Nwaehiri, U. et al., Beltrán, M. & Gómez, A. y Agarry, S. et al., usan un método de biorremediación por remediación bacteriana con *Pseudomonas* para remover contaminantes como (Zn, Ni y Hg), refutando el método de Chen, X. et al., que solo pueden remover un contaminante específico con pseudomonas.

El método de fitorremediación de Verma, S. & Kuila, A., y Emenike, C. et al., usando *Eichhornia Crassipes* permite tratar suelos contaminados con Zn, Fe, Cd, Cu, B y Cr, refutando así la utilidad del método de fitorremediación de Li, C. et al, con *Thlaspi caerulescens* que solo puede tratar Zn y Cd. Los métodos de fitorremediación con *Eichhornia Crassipes* de Verma, S. & Kuila, A. y Emenike, C. et al., tratan Zn, Fe, Cd, Cu, B, Cr, y Pb refutando a Li, C. et al, y su método de la fitorremediación con *Thlaspi caerulescens* que solo actúa sobre la remoción de Zn y Cd. El método de micorremediación de Purojit, J. et al. (2018) usando *Pleurotus Sajorcaju* solo permite tratar zinc, mientras que el método de Chandra, P. & Enespa (2019) que usa *Pleurotus Sajorcaju* se enfoca en remover Hg y Pb.

**TABLA 2**

METAL PESADO	PAÍS	MÉTODO DE BIORREMEDIACIÓN	POR EL TIEMPO DEL PROCESO	GRADO DE VIABILIDAD DEL PROCESO	POR LA EFICACIA DEL PROCESO	AUTOR(ES)
Zn	China	Fitorremediación	El procedimiento de biorremediación con plantas nativas o no nativas, suele ser entre un promedio de 60 a 90 días, para que comience a haber efectos notorios de remoción del metal pesado en el suelo.	El proceso de fitorremediación es un tratamiento que se trabaja a bajo costo a diferencia de procesos de remediación química o física.	La eficacia de este proceso suele ser de alto rendimiento por el uso de plantas hiperacumuladoras como la <i>Brassica Juncea</i> , para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados, logra remociones de hasta el 85% de Zn (4000mg/kg) u otros metales pesados como Cadmio, en cuyo caso es de 1000mg/kg.	Li, C. et al (2019)
	Estados Unidos	Fitorremediación	El tiempo de procesos de fitoextracción para la <i>T. Caerulescens</i> esperado es de 10 años máximo para ser considerado aceptable, este proceso solo se consigue con hiperacumuladoras que sobrepasen la escala de concentración de metales de 500mg/kg.	El proceso tiene un grado alto de viabilidad, ya que es fácil de implementar, tiene un bajo costo y es recomendando para áreas grandes pero de mínima contaminación.	Los macrofitos como la <i>T. Caerulescens</i> son capaces de extraer y concentrar hasta 10g/kg de zinc del suelo, lo cual es capaz de remediar suelos con una eficacia de más del 90% en suelos con cargas menores a 10000mg/Kg de zinc.	Liu, L. et al. (2018)

	Pakistán	Fitorremediación (Fitoextracción)	El periodo de fitoextracción debe ser menor a 20 años para considerarse sostenible, ya que una minoría de metales pesados se degradan en este tiempo, por lo cual este proceso se ha adaptado a tratamientos de 1 a 2 años.	Este tipo de tratamiento tiene un nivel de costo bajo, que es en comparación con técnicas fisicoquímicas un 60% a 80% más económicas.	Se han obtenido reportes máximos de concentración de zinc, desde 19,400mg/kg hasta 19,600mg/kg, con una eficacia de 69% en suelos que poseen un mínimo de 5% de humedad.	Ashraf, S. et al. (2019)
	Nigeria	Remediación microbiana (Bacteriana-fúngica)	El tiempo del proceso de remediación promedio fue de 5,9 días para la extracción de 0,118mg de Zn por día, mediante la utilización de un consorcio bacterio-fungico de <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus Subtilis</i> y <i>Micrococcus letus</i> .	La recuperación de este método de costo moderado. A diferencia de la fitorremediación, ya que se tienen que preparar las condiciones de subsistencia de los microorganismos por el tiempo que requiera, además es un proceso a largo plazo.	Para que el proceso se considere eficacia se debe la remoción mínima debe ser del 65% de metales pesados sobre los microorganismos a usar, en el caso de este estudio el uso de los <i>Bacillus</i> como el <i>Bacillus Subtilis</i> alcanzo valores de 78,5% de remoción de Zn.	Agarry, S. et al. (2019)
	Italia	Fitorremediación (Fitoextracción)	En este estudio usaron <i>Spinacea Oleracea</i> para capturar Zn de suelo contaminado con 1600mg de Zn por Kg de suelo, por un periodo de 35 días, el cual produjo una reducción en la biomasa del 24% en el cultivo herbáceo utilizado.	Los costos de procesos utilizando cultivos como <i>Phaseolus vulgaris</i> , <i>Brassica Juncea</i> , <i>Spinacea Oleracea</i> y <i>Sorgum vulgarem</i> , son de bajo costo porque no son plantas comerciales y son respetuosas con el medioambiente al encapsular el	Dentro de los procesos de fitorremediación la <i>Spinacea Oleracea</i> fue la más eficiente en la concentración de Zn, con hasta 1133,1 mg de Zn por Kg de suelo como capacidad de extracción. Lo cual es aproximadamente 70,82% de remoción de Zn.	Grassi et al. (2019)

				contaminante en biomasa.		
Singapur	Fitorremediación (Fitovolatilización)	El uso de <i>Brassica Juncea</i> para biorremediación de Zn, ha sido medido de forma diaria a 120ug al día, sin embargo este método representa una vía de exposición de riesgos a la salud humana. Con un tiempo de 90 a 180 días para remover el metal pesado del suelo.	El costo de este método utilizando la planta de mostaza conocida como <i>Brassica Juncea</i> tiene un costo bajo, y permite reutilizar las plantas al separar la biomasa que extrajo el metal pesado.	Las tasas de remoción de Zinc por el uso de <i>Brassica Juncea</i> fueron del 61% a 69%, al igual que el Cadmio.	Zhang, H. et al. (2020)	
Brasil	Remediación microbiana (Cianorremediación)	El uso de cianobacterias es mayormente utilizado en suelos que son contaminados con procesos de minería o tienen un grado de saturación de metales muy alta, el proceso suele demorar entre 6 meses a 9 meses, para determinar que está viendo efectividad sobre la remoción.	El costo del uso de cianobacterias para remediar suelos se encuentra entre los costos moderados de los procesos de biorremediación puesto que se debe monitorear y gestionar la supervivencia de las bacterias al proceso, ya que es un proceso de remediación a un alto nivel de tolerancia.	La biorremediación con cianobacterias suele ser mayor al 82% en remoción de zinc, mientras que en metales pesados como el mercurio se alcanzan valores de 43% ya que el mercurio no es un metal necesitado para el metabolismo de las cianobacterias.	Vieira, J. & Stefenon, V. (2017)	
Malasia	Fitorremediación (fitoextracción)	La fitoextracción requiere de 3 hasta 20 años para la remediación de la concentración inmediata, ya que los metales	La fitoextracción aprovecha la energía solar y los procesos de fotosíntesis para mantenerse sostenibles,	La tasa de fitoextracción por <i>Sansevieria Cylindrica</i> para la remoción de zinc es de 42% en suelos de minería de estaño en	Emenike, C. et al. (2018)	

			pesados no sufren alteración de toxicidad por degradación biológica o química con el tiempo.	considerándose un método de costos bajos por hacer uso de la bioacumulación, la cual almacena el metal pesado en una biomasa selectiva de la planta.	Malasia.	
		Remediación microbiana In-situ	Los métodos con múltiples bacterias para la remoción de metales pesados con solo un tipo específico de microorganismo acelera el proceso de recuperación de 3 años a 12 meses, como es el uso de <i>Bacillus</i> y <i>Alcaligenes Eutrophus</i> .	Este método implica el uso de un agar o nutrientes específicos para sostener el proceso de durabilidad de los microorganismos, además que se deben estudiar los niveles de tolerancia, por tal razón se considera de costo medio.	<i>Alcaligenes Eutrophus</i> pudo reducir la concentración de zinc de 1070mg/kg a 172mg/kg, lo que equivale a una remoción del 84% de zinc.	
	Singapur	Fitorremediación (fitoextracción)	La fitoextracción por especies hiperacumuladoras mediante la concentración en una biomasa toma un tiempo promedio de 12 meses, mientras que en procesos de fitovolatilización el tiempo es de 180 a 240 días.	Los distintos métodos de remediación biológica tienen un alto grado de viabilidad por el bajo costo, y los beneficios que brindan como fertilidad de suelos, costos de mantenimiento bajos y % de eficacia de remoción altos.	Se remueven 51600mg/kg de zinc usando <i>T. Caerulescens</i> , 18.28mg/kg de Hg usando <i>Achillea millefolium</i> y 47500mg/kg de Ni con <i>Psychotria douarrei</i> . Con una eficacia de más del 65% sobre la remoción de los metales pesados.	Yan, A. et al. (2020)



	India	Fitorremediación (fitoextracción)	El procedimiento de biorremediación con el uso de <i>Thlaspi Caerulescens</i> , suele tener un periodo de efectividad de mínimo 120 días, para considerarse realizados procesos de remoción del zinc.	La fitoextracción permite la biorecuperación de los metales pesados del suelo, el cual en relación a los métodos fisicoquímicos tienen un costo muy bajo y sin afectar la pérdida de la fertilidad del suelo.	La especie <i>Thlaspi caerulescens</i> se usa para remediar de forma significativa el zinc del suelo, mitigando el contaminante de 440 mg de Zn a 330 mg por kg de suelo, lo cual representa una eficacia de 25%.	Chandni, U. et al. (2019)
	India	Remediación microbiana	El tiempo de contacto requerido para obtener niveles de eficacia de 85% es de 2 horas por los menos.	El grado de viabilidad de la remediación usando microorganismos son de nivel bajo, y son procedimientos rentables porque se auto gestionan, y reproducen in situ de forma natural.	Se halló que la eficacia de eliminación de Zn, por el contacto con los consorcios bacterianos fue de 75% a 85%,	Dhaliwal, S. et al. (2019)
Ni	China	Remediación microbiana	El tiempo de remoción de Níquel más óptimo utilizado es por el <i>Bacillus Cereus NS4</i> , el cual puede durar entre 90 a 240 días y se puede acelerar con el uso de precipitado de carbonato inducido por estos microorganismos.	Los métodos utilizados dentro de la remediación bacteriana como bioestimulación, bioaumentación y biofiltrado, son de costo moderado o medio por decir al de la fitorremediación.	Este proceso de remediación tiene una eficacia de eliminación de Ni de 95,78% con el uso del <i>Bacillus Cereus</i> y una eficiencia de eliminación de 55,84% de Ni utilizando <i>Bacillus Subtilus cepa SJ-101</i> .	Chen, X. et al. (2019)

	India	Remediación microbiana intrínseca	La biorremediación in situ intrínseca con microorganismos es aquella que usa los microorganismos autóctonos del suelo, y remedia de forma natural el suelo, sin embargo su proceso de recuperación toma 5 años en mostrar efectos de remoción de metales pesados.	Este tipo de tratamiento natural, no tiene costo alguno, y existe un costo muy bajo si se opta por impulsar la familia de bacterias con nutrientes, además múltiples cepas diferentes pueden brindar un mejor resultado del método de biorremediación.	La eficacia de este método es del 58% en metales pesados como el Níquel, en un periodo a largo plazo menor a 5 años, y en un periodo mayor a los 10 años se han visto niveles de eficacia de más del 70%.	Nandini. M. et al. (2015)
	India	Micorremediación Ex-situ	El tiempo requerido por el proceso de micorremediación por el <i>Mucor sp</i> , es aproximadamente de entre 35 a 50 días, para la recuperación considerable de Ni, en cuanto a Zn no especifica un tiempo establecido.	El método de micorremediación se realiza debido al ser uno de los métodos con costos más bajos y sostenibles, al minimizar sus efectos sobre el medio ambiente. El tratamiento de metales pesados con el uso de agentes fúngicos para recuperar suelos contaminados es una necesidad para tener un medio ambiente seguro y sostenible.	Los hongos o micelios fúngicos son descomponedores y pueden absorber metales con una eficacia del 33% al 77% mientras que su capacidad de sorción está en 20 a 50%.	Purojit, J. et al. (2018)

	China	Fitorremediación (Fitoextracción)	El tiempo de remediación con el uso de fitoextracción para la extracción natural de Zinc permita recuperar los suelos, esta suele demorar aproximadamente 10 años, el cual se mide por tonelada removida de metal pesado por hectárea por año.	Dentro de los métodos de fitorremediación más viables, la fitoextracción es el segundo método con el nivel de costo más bajo, por encima de los métodos de remediación bacteriana, el único proceso que se requiere es la extracción de la biomasa que acumula el metal.	El valor máximo de remoción de <i>Sebertia Acuminata</i> es de 250000mg/kg de Níquel, siendo esta la mejor hiperacumuladora de Níquel, con una eficacia mayor al 90%.	Mahar, A. et al. (2016)
	India	Remediación microbiana con cepas genéticamente modificadas	Tenemos que las <i>pseudomonas</i> , <i>Achromobacter</i> , <i>E. Coli</i> , etc., son los microorganismos genéticamente modificados para la eliminación del mercurio de suelos y aguas residuales, los cuales tienen un proceso metabólico más acelerado y permiten la remediación en un tiempo menor a 30 días.	El costo de este método innovador si es de alto costo porque existen gastos de investigación, así como protocolos y costos de monitoreo del grado de eficacia.	El nivel de remoción de mercurio del suelo fue de 48,5% en un periodo de 30 días, y de 63% de remoción del ion mercurio en aguas residuales, los resultados son más efectivos en un tiempo mucho mayor del tratamiento.	Verma, S. & Kuila, A. (2019)

Hg	India	Micorremediación In-situ	El tiempo de micorremediación in situ, suele monitorearse de forma quincenal, y puede tener una duración de 6 meses hasta 4 años, que dependen del grado de saturación.	El nivel del costo de este proceso es de grado medio, puesto que para la remoción de Hg, se requiere el uso de reactivos químicos para mitigar la carga saturada de mercurio, así como estabilizar el nivel de pH del suelo en lo mayor posible.	Tiene nivel de remoción de mercurio de hasta 97% usando <i>P. Sajorcaju</i> , que elimina a través de desorción siempre y cuando los niveles de saturación no sean mayores a 2500mg/kg, puesto que la especie fúngica no tiene tolerancia a valores mucho mayores.	Chandra, P. & Enespa (2019)
	India	Fitorremediación (Fitoextracción)	El periodo del uso de <i>Brassica Juncea</i> tiene un periodo de efectividad de 180 días a 220 días para poder absorber el metal pesado mediante fitoextracción, sin disminuir su riesgo al medioambiente una vez almacenado.	El nivel del costo del proceso se clasifica como bajo costo pero que puede ser acelerado extendiendo el área de tratamiento y aumentando la densidad de los cultivos por metro cuadrado. Siendo así su nivel de costo ya sería moderado.	La concentración de Hg bajo de 2117mg/kg a 1056mg/kg, por lo tanto el porcentaje de remoción es de 49,88% de eficacia de eliminación del ion de mercurio.	Raj, D. (2018)

Se utilizaron 18 de los 20 artículos en total para la recopilación de la información de la tabla 2, para determinar el método de biorremediación más utilizado para la remoción de Zinc, Mercurio y Níquel. Comparando y extrayendo información de los artículos en base a criterio como el tiempo que demoran los procesos de biorremediación, su grado de viabilidad de los mismos y el porcentaje de su eficiencia de remoción sobre los metales pesados. La información analizada proviene en su mayoría de investigaciones asiáticas de países como India y China. La mayor información para el análisis disponible fue de *Thlaspi Caerulescens* y la especie *Brassica Juncea*. Por lo cual se obtuvo que la mayoría de los artículos investigados mencionan que los métodos de biorremediación más aplicados en la actualidad para remover metales pesados son **Fitorremediación [Fitoextracción]** (Li, C. et al., 2019), **Remediación microbiana [ex-situ]** (Verma, S. & Kuila, A., 2019), **Fitorremediación [Fitovolatización]** (Zhang, H. et al., 2020), **Remediación microbiana [In-situ]** (Nandini, M. et al., 2015) y **Micorremediación [ex-situ]** (Purojit, J. et al., 2018). Considerando que los autores en la investigación indican que la mayoría de estos métodos son beneficioso para recuperar suelos contaminados por metales pesados.

Chen, X. et al., Dhaliwal, S. et al., y Emenike, C. et al. usan un método de remediación bacteriana más eficaz que el método de remediación fúngica ya que el *Bacillus Cereus* logra tasas de eliminación de metales pesados de más del 95% refutando a Purojit, J. et al., el cual logra una remoción máxima de 77%. Chandra. P. & Enespa., muestran un método que tiene una eficacia de remoción de mercurio de 97% del suelo siendo refutado así los métodos aplicados por Verma, S. & Kuila, A. y Raj, D. que respectivamente fueron de solo 48,50% y 49,88%.

Li, C. et al., Zhang, H. et al., tienen un método de fitorremediación con una eficacia de remoción de respectivamente de 85% y 69% de zinc, ambos utilizando la especie *Brassica Juncea*, con lo cual refutan el método de Chandni, U. et al. que usando *Thlaspi Caerulescens* solo tiene un 25% de remoción de zinc. El método de fitorremediación de Emenike, C. et al., por

*Sansevieria Cylindrica* tuvo una remoción de Zinc de 42% en suelos, siendo este valor refutado por los métodos de fitorremediación de Li, C. et al., Liu, L. et al., y Grassi et al., con un 85%, 90% y 70,82% de remoción de Zinc respectivamente.

Li, C. et al., Ashraf, S. et al., Emenike, C. et al. y Mahar, A. et al consideran que el monitoreo sobre la efectividad y el tiempo que conlleva el proceso en recuperación por biorremediación debe ser medido en años o décadas, contradiciendo a Agarry, S. et al., el cual establece que los tiempos de efectividad debe evaluarse por su remoción diaria. Chen, X. et al., Dhaliwal, S. et al., y Agarry, S. et al. usan métodos de remediación microbiana no intrínseca para la remoción de níquel y zinc con *Bacillus* teniendo una eficacia de 95,78%, 85% y 78,5% contradiciendo a Nandini, M. et al., porque su método de remediación microbiana intrínseca solo pudo llegar hasta un 70% de eficacia de remoción. Emenike, C. et al, afirma que el método de fitorremediación puede tardar hasta 20 años en completarse, siendo refutado por Mahar, A. et al., Ashraf, S. et al., y Liu, L. et al., los cuales menciona que los métodos de fitorremediación solo demoran 10 años.

Vieira, J. & Stefenon, V., demuestran que su método de remediación bacteriana para metales pesados por cianobacterias tiene mayor eficacia de remoción (82%) que el método de Verma, S. & Kuila, A., el cual incluye la utilización de cepas bacterianas genéticamente modificadas, las cuales solo llegaron a un 49,88% de remoción de metales pesados. El uso del método de fitoextracción aplicado por Ashraf, S. et al. (2019) obtuvo reportes máximos de concentración de zinc, desde 19,400mg/kg hasta 19,600mg/kg, refutando al método de fitoextracción de Grassi et al. (2019) que solo pudo extraer hasta 1133,1 mg de Zn por Kg de suelo.

## **V. CONCLUSIONES**

Como respuesta al objetivo general de nuestra investigación, los métodos de biorremediación para la remoción de metales pesados como zinc, níquel y

mercurio de los suelos son: la fitorremediación mediante la fitovolatilización, fitoextracción, fitoestabilización, fitoestimulación y fitodegradación, micorremediación(in-situ y ex-situ), la remediación bacteriana mediante microorganismos autóctonos y modificados genéticamente, y por último la remediación bacteriana-fúngica que hace uso de múltiples cepas y hongos.

Se concluye que se han identificado 12 especies biológicas en procesos de biorremediación sobre la remoción de níquel, zinc y mercurio del suelo. Siendo estas: *Brassica Juncea*, *Thlaspi caerulescens*, *Eichhornia Crassipes*, *Pleurotus Sajorcaju*, *Pleurotus Ostreatus*, *Pleurotus Eryngii*, *Bacillus Cereus*, *Bacillus Subtillus*, *Pseudomonas Putida*, *Pseudomonas Pyogenes* y *Pseudomonas Aeruginosa*.

Se concluye que el método de biorremediación más utilizado es la fitorremediación a través de la fitoextracción, ya que la mayoría de especies permiten la remoción de más del 65% de los metales pesados en los suelos, eliminando los contaminantes del suelo y enriqueciéndolo con minerales, lo cual permite biorremediar el impacto de los metales pesados y poder recuperar los suelos.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Se recomienda establecer comparaciones de rendimiento entre las especies *Brassica*, *Thlaspi* y *Pleurotus* de un mismo género para que se pueda identificar que especie biológica usar in situ o ex situ a fin de hacer una biorremediación más eficaz.

Se recomienda que esta investigación profundice en análisis comparativo de las fases de los procesos de biorremediación en periodos temporales, a fin de brindar una nueva información sobre este estudio, como patrones de comportamiento de fitoextracción, fitovolatilización, fitoestabilización, etc.

Se recomienda investigar información sobre las especies biológicas genéticamente modificadas como las *pseudonomas*, *Achromobacter*, *E.coli* para la biorremediación con el propósito de conocer su impacto de su uso como biorremediadoras y ampliar el conocimiento de esta investigación.



## REFERENCIAS

- PETELKA, J., *et al.* (2019). Soil Heavy Metal (loid) Pollution and Phytoremediation Potential of Native Plants on a Former Gold Mine in Ghana. *Water, Air & Soil Pollution*, vol. 230, no 11, p. 267. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2020]. Disponible en: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11270-019-4317-4.pdf>  
Doi: 10.1007/s11270-019-4317-4
- CRISTALDI, A., *et al.* (2020). Phytoremediation potential of *Arundo donax* (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals. *Environmental Research*, p. 109427. [Fecha de consulta: 21 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935120303200>  
Doi: 10.1016/j.envres.2020.109427
- WILLSCHER, S., *et al.* (2017). Phytoremediation experiments with *Helianthus tuberosus* under different pH and heavy metal soil concentrations. *Hydrometallurgy*, vol. 168, p. 153-158. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X16307253>  
Doi: 10.1016/j.hydromet.2016.10.016
- SHAH, V. & DAVEREY, A. (2020). Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, p. 100774. [Fecha de consulta: 03 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186419308107>  
Doi: 10.1016/j.eti.2020.100774
- CAMESELLE, C., GOUVEIA, S. & URRÉJOLA, S. (2019). Benefits of phytoremediation amended with DC electric field. Application to soils

contaminated with heavy metals. *Chemosphere*, vol. 229, p. 481-488.

[Fecha de consulta: 17 de junio de 2020]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519308847>

Doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.222

- HE, C., *et al.* (2020). Phytoremediation of soil heavy metals (Cd and Zn) by castor seedlings: Tolerance, accumulation and subcellular distribution. *Chemosphere*, p. 126471. [Fecha de consulta: 23 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520306640>  
Doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126471
- HASHEMI, S. & TABIBIAN, S. (2018). Application of Mulberry nigra to absorb heavy metal, mercury, from the environment of green space city. *Toxicology reports*, vol. 5, p. 644-646. [Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214750018302646>  
Doi: 10.1016/j.toxrep.2018.05.006
- VIJAYAN, V. & SUSHAMA, P. (2018). Phytoremediation as an effective technology for the removal of heavy metals from dump yard soils. *Nat. Environ. Pollut. Technol*, vol. 17, p. 1353-8. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2020]. Disponible en: [http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-66-40-\(38\)B-3534.pdf](http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-66-40-(38)B-3534.pdf)
- MORAR, F., IANTOVICS, L. & GLIGOR, A. (2018). Analysis of Phytoremediation Potential of Crop Plants in Industrial Heavy Metal Contaminated Soil in the Upper Mures River Basin. *Journal of Environmental Informatics*, vol. 31, no 1. [Fecha de consulta: 08 de octubre de 2020]. Disponible en: [http://www.jeionline.org/index.php?journal=mys&page=article&op=download&path%5B%5D=201700383&path%5B%5D=pdf\\_201700383](http://www.jeionline.org/index.php?journal=mys&page=article&op=download&path%5B%5D=201700383&path%5B%5D=pdf_201700383)

Doi: 10.3808/jei.201700383

- ABDULLAHI, Z; AUDU, A. & BALA, S. (2017). Assessment of the phytoremediation potentials of *Jatropha curcas* in the removal of heavy metals from contaminated soils of the Challawa Industrial Estate Kano, Nigeria. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 10, no 1, p. 579-583. [Fecha de consulta: 15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.ajol.info/index.php/bajopas/article/view/165702>  
Doi: 10.4314/bajopas.v10i1.109S
- ELHAG, M., *et al.* (2018). Evaluation of Aloe Vera l. as phytoremediator of heavy metals contaminated soils in arid environments. *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 16, no 5, p. 6033-6045. [Fecha de consulta: 19 de Julio de 2020]. Disponible en: [https://www.epa.hu/02500/02583/00055/pdf/EPA02583\\_applied\\_ecology\\_2018\\_05\\_60336045.pdf](https://www.epa.hu/02500/02583/00055/pdf/EPA02583_applied_ecology_2018_05_60336045.pdf)  
Doi: 10.15666/aeer/1605\_60336045
- SOTO C. & JIMÉNEZ M. (2019). Potential phytoremediator of native species in soils contaminated by heavy metals in the garbage dump Quitasol-Imponeda Abancay. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2019, vol. 7, no 4, p. 584-600. [Fecha de consulta: 22 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://sci-hub.se/http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d7.0261>  
Doi: 10.13044/j.sdewes.d7.0261
- KHAN, M., *et al.* (2019). Evaluation of phytoremediation potential of castor cultivars for heavy metals from soil. *Planta Daninha*, vol. 37. [Fecha de consulta: 14 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.scielo.br/pdf/pd/v37/0100-8358-PD-37-e019180998.pdf>  
Doi: 10.1590/s0100-83582019370100134

- DE LA FOURNIERE, E., *et al.* (2019). Determination of mercury in vegetal tissues by micropixe: application to the study of hyperaccumulation by *spirodela intermedia* (LEMNACEAE). *Boletín De La Sociedad Argentina De Botánica*, vol. 54, no 2, p. 263-275. [Fecha de consulta: 24 de mayo de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/10.31055/1851.2372.v54.n2.24373>  
Doi: 10.31055/1851.2372.v54.n2.24373
- BIAN, F., *et al.* (2019). Bamboo—an untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, p. 125750. [Fecha de consulta: 04 de julio de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/10.1016/j.chemosphere.2019.125750>  
Doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125750
- STELIGA, T. & KLUK, D. (2020). Application of *Festuca arundinacea* in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 194, p. 110409. [Fecha de consulta: 30 de julio de 2020]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651320302487>  
Doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110409
- ÁLVAREZ, P., ALÉS, F. & GARCÍA, J. (2019). Phytoremediation of highly contaminated mining soils by *Jatropha curcas* L. and production of catalytic carbons from the generated biomass. *Journal of environmental management*, vol. 231, p. 886-895. [Fecha de consulta: 23 de octubre de 2020]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718311861>  
Doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.052
- HEJNA, M., *et al.* Bioaccumulation of heavy metals from wastewater through a *Typha latifolia* and *Thelypteris palustris* phytoremediation system. *Chemosphere*, 2020, vol. 241, p. 125018. [Fecha de consulta: 16 de junio de 2020]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565351932257X>

Doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125018

- LU, J., *et al.* (2019). Multi-criteria decision analysis of optimal planting for enhancing phytoremediation of trace heavy metals in mining sites under interval residual contaminant concentrations. *Environmental Pollution*, vol. 255, p. 113255. [Fecha de consulta: 19 de agosto de 2020]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749119325564>  
Doi: 10.1016/j.envpol.2019.113255
- MIDHAT, L., *et al.* (2019). Accumulation of heavy metals in metallophytes from three mining sites (Southern Centre Morocco) and evaluation of their phytoremediation potential. *Ecotoxicology and environmental safety*, vol. 169, p. 150-160. [Fecha de consulta: 05 de octubre de 2020]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014765131831145X>  
Doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.11.009
- ELTAHER, G., *et al.* (2019). Biomass estimation and heavy metal accumulation by *Pluchea dioscoridis* (L.) DC. in the Middle Nile Delta, (Egypt): Perspectives for phytoremediation. *South African Journal of Botany*, 2019, vol. 127, p. 153-166. [Fecha de consulta: 05 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://sci-hub.se/10.1016/j.sajb.2019.08.053>  
Doi: 10.1016/j.sajb.2019.08.053
- CICERO-FERNÁNDEZ, D., *et al.* (2017). Long-term (two annual cycles) phytoremediation of heavy metal-contaminated estuarine sediments by *Phragmites australis*. *New biotechnology*, vol. 38, p. 56-64. [Fecha de consulta: 05 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27449529/>

Doi: 10.1016/j.nbt.2016.07.011

- BALDATONI, D. et al. (2014). Different behaviours in phytoremediation capacity of two heavy metal tolerant poplar clones in relation to iron and other trace elements. *Journal of environmental management*. vol. 146, pp. 94-99. [Fecha de consulta: 05 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25163599/>  
Doi: 10.1016/j.jenvman.2014.07.045
- BALLESTA, Raimundo (2017). *Introducción a la contaminación de suelos*. Mundi-Prensa Libros. [Fecha de consulta: 21 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=703084>  
ISBN: 9788484767893
- UNAM (2010) ¿Qué es la biorremediación? UNAM, 13pp. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2020]. Disponible en: [http://www.dgdc.unam.mx/assets/cienciaboletto/cb\\_11.pdf](http://www.dgdc.unam.mx/assets/cienciaboletto/cb_11.pdf)  
ISBN: 9786070212673
- REYES, Y. et al. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, vol. 16, no 2, p. 66-77. [Fecha de consulta: 18 de junio de 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>  
Doi: 10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447
- CORDERO, J. (2015). *Fitorremediación in situ para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados (plomo y cadmio) y evaluación de selenio en la finca Furatena alta en el municipio de Útica (Cundinamarca)*. Bogotá: Universidad Libre. [Fecha de consulta: 02 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/7958>

- BURBANO, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 33, no 2, p. 117-124. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2020]. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-01352016000200011&script=sci\\_abstract&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-01352016000200011&script=sci_abstract&tlng=en)  
Doi: 10.22267/rcia.163302.58.
- GARZÓN, J., RODRÍGUEZ, J. & HERNÁNDEZ, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y salud*, vol. 19, no 2, p. 309-318. [Fecha de consulta: 16 de julio de 2020]. Disponible en: <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/usalud/article/view/3120>  
Doi: 10.22267/rus.171902.93
- COTA, K., *et al.* (2019). Biorremediación: actualidad de conceptos y aplicaciones. *Biocencia*, vol. 21, no 1, p. 37-44. [Fecha de consulta: 22 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://biocencia.unison.mx/index.php/biocencia/article/view/811>  
Doi: 10.18633/biocencia.v21i1.811
- DELGADILLO, A., *et al.* (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, vol. 14, no 2, p. 597-612. [Fecha de consulta: 02 de agosto de 2020]. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci_arttext)  
ISSN 1870-0462
- MAHECHA, J., *et al.* (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. *Orinoquia*, vol. 19, no 1, p. 118-122. [Fecha de consulta: 19 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5441176>  
ISSN 0121-3709

- GARCÍA, J., et al. (2015). Evaluación del contenido de mercurio en suelos y lechos de quebradas en la zona minera de Miraflores, Quinchía, Colombia. *Acta agronómica*, 2015, vol. 64, no 2, p. 165-177. [Fecha de consulta: 23 de octubre de 2020]. Disponible en:  
<https://www.redalyc.org/pdf/1699/169933767008.pdf>  
ISSN: 0120-2812
- AMARI, T., GHNAYA, T. & ABDELLY, C. (2017). Nickel, cadmium and lead phytotoxicity and potential of halophytic plants in heavy metal extraction. *South African Journal of Botany*, vol. 111, p. 99-110. [Fecha de consulta: 23 de octubre de 2020]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629916303805?via%3Dihub>  
Doi: 10.1016/j.sajb.2017.03.011
- MORALES-FONSECA, D., et al. (2010). Desarrollo de un bioadsorbente laminar con *Phanerochaete chrysosporium* hipertolerante al cadmio, al níquel y al plomo para el tratamiento de aguas. *Revista iberoamericana de Micología*, vol. 27, no 3, p. 111-118. [Fecha de consulta: 18 de mayo de 2020]. Disponible en:  
<https://www.elsevier.es/es-revista-revista-iberoamericana-micologia-290-articulo-desarrollo-un-bioadsorbente-laminar-con-S1130140610000239>  
Doi: 10.1016/j.riam.2010.02.002
- SINGH, P., et al. (2020). Bioremediation: a sustainable approach for management of environmental contaminants. En *Abatement of Environmental Pollutants*. Elsevier, 2020. p. 1-23. [Fecha de consulta: 01 de junio de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818095-2.00001-1>  
Doi: 10.1016/B978-0-12-818095-2.00001-1
- BERNAL, M., et al. (2018). Validez de contenido por juicio de expertos de un instrumento para medir percepciones físico-emocionales en la



práctica de disección anatómica. *Educación médica*. p. 1-8. [Fecha de consulta: 30 de abril de 2020]. Disponible en:

<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.edumed.2018.08.008>

Doi: 10.1016/j.edumed.2018.08.008

- LUNA, M. (2015). Organización del conocimiento en la red digital. *Investigación bibliotecológica*, vol. 29, no 67, p. 77-89. [Fecha de consulta: 12 de abril de 2020]. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187358X2015000300077&script=sci\\_arttext&lng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187358X2015000300077&script=sci_arttext&lng=en)  
ISSN 2448-8321
- ROMERO, N. & GARCÍA, V. (2019). La ética en la investigación cualitativa. *CuidArte*, vol. 8, no 16, p. 36-46. [Fecha de consulta: 09 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/cuidarte/cui-2019/cui1916e.pdf>  
ISSN: 2395-8979
- VALENCIA, M. & MORA, C. (2011). El rigor científico en la investigación cualitativa. *Investigación y educación en enfermería*, vol. 29, no 3, p. 500-514. [Fecha de consulta: 22 de agosto de 2020]. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-53072011000300020](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-53072011000300020)  
ISSN 2216-0280
- HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. & BAPTISTA, P. (2014). Metodología de la Investigación. Quinta Edición Mcgraw-Hill. *Ultra, México*, 2010, p. 158-209. [Fecha de consulta: 22 de agosto de 2020]. Disponible en: [https://www.esup.edu.pe/descargas/dep\\_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigaci%C3%B3n%205ta%20Edici%C3%B3n.pdf](https://www.esup.edu.pe/descargas/dep_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigaci%C3%B3n%205ta%20Edici%C3%B3n.pdf)

- DOMÍNGUEZ, M. & RODRÍGUEZ, I. (2013) Aspectos éticos en la investigación cualitativa. [Fecha de consulta: 31 de julio de 2020]. Disponible en:  
<https://www.medigraphic.com/pdfs/enfneu/ene-2013/ene133b.pdf>
- MARTÍNEZ, T., *et al.* (2000). Establecimiento de valores máximos admisibles en suelo para la protección de la salud con el modelo Lur. *Gaceta Sanitaria*, vol. 14, no 6, p. 449-457. [Fecha de consulta: 14 de junio de 2020]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213911100719121>  
Doi: 10.1016/S0213-9111(00)71912-1
- LI, C., *et al.* (2019). A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques. *Soil and sediment contamination: An international journal*, p. 1–15. [Fecha de consulta: 27 de octubre de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1592108>  
Doi:10.1080/15320383.2019.1592108
- NANDINI. M., *et al.* (2015). A review on the bioremediation process for the removal of heavy metals. *International Journal for Scientific Research & Development*, vol. 3, p. 658-661. [Fecha de consulta: 16 de octubre de 2020]. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/profile/Madhukar\\_M/publication/308076031\\_A\\_Review\\_on\\_the\\_Bioremediation\\_Process\\_for\\_the\\_Removal\\_of\\_Heavy\\_Metals/links/57d911da08ae601b39b0e01c/A-Review-on-the-Bioremediation-Process-for-the-Removal-of-Heavy-Metals.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Madhukar_M/publication/308076031_A_Review_on_the_Bioremediation_Process_for_the_Removal_of_Heavy_Metals/links/57d911da08ae601b39b0e01c/A-Review-on-the-Bioremediation-Process-for-the-Removal-of-Heavy-Metals.pdf)  
ISSN: 2321-0613
- ZHANG, H., *et al.* (2020). Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: influence factors, mechanisms and evaluation methods. *Chemical Engineering Journal*, vol. 398, p. 1-19. [Fecha de consulta: 30 de septiembre de 2020]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138589472031785X>

Doi:10.1016/j.cej.2020.125657

- PUROHIT, J., *et al.* (2018). Mycoremediation of Agricultural Soil: Bioprospection for Sustainable Development. *Mycoremediation and Environmental Sustainability*, p. 91–120. [Fecha de consulta: 03 de octubre de 2020]. Disponible en:  
[https://sci-hub.se/10.1007/978-3-319-77386-5\\_4#](https://sci-hub.se/10.1007/978-3-319-77386-5_4#)  
Doi: 10.1007/978-3-319-77386-5\_4
- CHANDRA, P. & ENESPA. (2019). Fungal Enzymes for Bioremediation of Contaminated Soil. *Recent Advancement in White Biotechnology Through Fungi*, p. 189-215. [Fecha de consulta: 11 de octubre de 2020]. Disponible en:  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-25506-0\\_7#:~:text=Using%20important%20various%20fungal%20enzymes,is%20polluted%20by%20various%20effluents.&text=Various%20enzymes%20are%20employed%20for,%2Dproducing%20enzymes%2C%20and%20laccase.](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-25506-0_7#:~:text=Using%20important%20various%20fungal%20enzymes,is%20polluted%20by%20various%20effluents.&text=Various%20enzymes%20are%20employed%20for,%2Dproducing%20enzymes%2C%20and%20laccase.)  
Doi: 10.1007/978-3-030-25506-0\_7
- GRASSI, C., *et al.* (2020). Crop suitability assessment in remediation of Zn contaminated soil. *Chemosphere*, vol. 246, p. 1-11. [Fecha de consulta: 21 de octubre de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125706>  
Doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125706
- MAHAR, A., *et al.* (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, vol. 126, p. 111–121. [Fecha de consulta: 21 de octubre de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>  
Doi:10.1016/j.ecoenv.2015.12.023

- EMENIKE, C., *et al.* (2018). Biotransformation and removal of heavy metals: a review of phytoremediation and microbial remediation assessment on contaminated soil. *Environmental Reviews*, vol. 26, no 2, p. 1-47. [Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/er-2017-0045>  
Doi: 10.1139/er-2017-0045
- KAPAHI, M. & SACHDEVA, S. (2019). Bioremediation Options for Heavy Metal Pollution. *Journal of Health & Pollution*, vol. 9, no 24, p. 1-20. [Fecha de consulta: 02 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31893164/>  
Doi: 10.5696/2156-9614-9.24.191203
- VIEIRA, J. & STEFENON, V. (2017). Soil bioremediation in heavy metal contaminated mining areas: A microbiological/biotechnological point of view. *Journal of Advances in Microbiology*, vol. 4, no 1, p. 1-10. [Fecha de consulta: 12 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/144815222.pdf>  
ISSN: 2456-7116
- DHALIWAL, S., *et al.* (2019). Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1-15. [Fecha de consulta: 26 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1>  
Doi: 10.1007/s11356-019-06967-1
- YAN, A., *et al.* (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, vol. 11, no 359. p. 1-11. [Fecha de consulta: 05 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://sci-hub.se/10.3389/fpls.2020.00359>  
Doi:10.3389/fpls.2020.00359

- LIU, L., *et al.* (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of The Total Environment*, vol. 633, p. 206–219. [Fecha de consulta: 24 de agosto de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>  
Doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.161
- CHANDNI, U. (2019). The review of innovative approaches of bioremediation via phytoremediation of toxic heavy metals from polluted soil. *International Journal of Scientific Research and Reviews*, vol. 8, no 2, p. 440-450. [Fecha de consulta: 29 de agosto de 2020]. Disponible en:  
<http://docplayer.net/175833704-International-journal-of-scientific-research-and-reviews.html>  
ISSN: 2279–0543
- ASHRAF, S., *et al.* (2019). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 174, p. 714–727. [Fecha de consulta: 02 de septiembre de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>  
Doi:10.1016/j.ecoenv.2019.02.068
- VERMA, S., & KUILA, A. (2019). Bioremediation of heavy metals by microbial process. *Environmental Technology & Innovation*, vol. 14, p. 1-11. [Fecha de consulta: 25 de septiembre de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100369>  
Doi:10.1016/j.eti.2019.100369
- AGARRY, S., *et al.* (2019). Bioremediation of Crude Oil-Contaminated Soil in the Presence of Nickel, Zinc and Cadmium Heavy Metals Using Bacterial and Fungal Consortia-Bioaugmentation Strategy. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, vol.7, no 1, p. 179-195. [Fecha de consulta: 22 de octubre de 2020]. Disponible en:

<http://www.jett.dormaj.com/docs/Volume7/Issue%202/Bioremediation%20of%20Crude%20Oil%20Contaminated%20Soil%20in%20the%20Presence%20of%20Nickel,%20Zinc%20and%20Cadmium%20Heavy%20Metals%20Using%20Bacterial%20and%20Fungal%20Consortia%20Bi.pdf>  
ISSN: 2309-1185

- RAJ, D. (2018). Bioaccumulation of mercury, arsenic, cadmium, and lead in plants grown on coal mine soil. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, p. 1–13. [Fecha de consulta: 10 de octubre de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/10.1080/10807039.2018.1447360>  
ISSN: 1549-7860
- NWAEHIRI, U. *et al.* (2019). Bacterial remediation of heavy metal polluted soil and effluent from paper mill industry. *Environmental Analysis Health and Toxicology*, vol. 35, no 2, p. 1-10. [Fecha de consulta: 17 de octubre de 2020]. Disponible en:  
<https://www.eaht.org/upload/pdf/eaht-35-2-e2020009.pdf>  
ISSN: 2233-6567
- CHEN, X., *et al.* (2019). A review on remediation technologies for nickel-contaminated soil. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, p. 1–15. [Fecha de consulta: 07 de agosto de 2020]. Disponible en:  
<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1539639>  
Doi:10.1080/10807039.2018.1539639
- KABATA-PENDIAS, A. (2004). Transferencia suelo-planta de oligoelementos: un problema ambiental. *Geoderma*, vol. 122, no 2-4, pág. 143-149. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2020]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706104000084>  
Doi: 10.1016/j.geoderma.2004.01.004

## ANEXOS

 <b>UCV</b> UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	<b>FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO</b>
--	---------------------------------------

### TÍTULO:

<b>PÁGINA DE TEXTO EXTRAÍDO:</b>	<b>AÑO DE PUBLICACIÓN</b>	<b>LUGAR DE PUBLICACIÓN</b>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>

<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN:</b>	<b>AUTOR (ES):</b>

<b>CÓDIGO</b> :	
<b>PALABRAS CLAVES</b> :	
<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS</b> :	
<b>METAL PESADO CONTAMINANTE</b> :	
<b>PARÁMETROS ESTUDIADOS</b> : (PERFIL DE RECUPERACIÓN DEL SUELO)	
<b>MÉTODO DE APLICACIÓN POR BIORREMEDIACIÓN</b> :	
<b>RESULTADOS</b> :	
<b>CONCLUSIONES:</b>	



**Declaratoria de Originalidad de los Autores**

Nosotros, HUANUCO EVANGELISTA LIZETT KELLY, TEMOCHE CORTEZ KIARA LIZBETH 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 SOBRE LOS MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS COMO NÍQUEL, ZINC Y MERCURIO", 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.

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Firma</b>
TEMOCHE CORTEZ KIARA LIZBETH <b>DNI:</b> 72854053 <b>ORCID</b> 0000-0003-1669-1910	Firmado digitalmente por: KTEMOCHEC12 el 24-12-2020 21:34:42
HUANUCO EVANGELISTA LIZETT KELLY <b>DNI:</b> 46878218 <b>ORCID</b> 0000-0002-7978-9854	Firmado digitalmente por: LHUANUCOE el 24-12-2020 21:29:59