

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**UNIDAD LAGUNA**  
**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



Fitorremediación: una alternativa ecológica en el tratamiento de zonas contaminadas con arsénico y mercurio.

**POR**

**NOELIA ANZURES VALDEPEÑA**

**MONOGRAFÍA**

Que presenta como requisito parcial  
para obtener el título de

**INGENIERO AGRÓNOMO**

**Torreón Coahuila, México, diciembre del 2021**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
UNIDAD LAGUNA  
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Fitorremediación: una alternativa ecológica en el tratamiento de zonas  
contaminadas con arsénico y mercurio.

POR

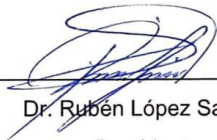
**NOELIA ANZURES VALDEPEÑA**

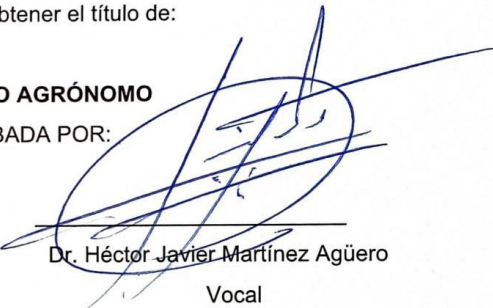
MONOGRAFÍA


Que se somete a la consideración del H. Jurado examinador, como requisito  
parcial para obtener el título de:


**INGENIERO AGRÓNOMO**

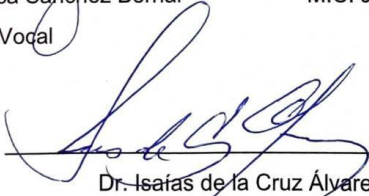
APROBADA POR:

  
Dr. Rubén López Salazar  
Presidente

  
Dr. Héctor Javier Martínez Agüero  
Vocal

  
M.C. Francisca Sánchez Bernal  
Vocal

  
M.C. Julieta Ziomara Ordoñez  
Morales  
Vocal suplente

  
Dr. Isaías de la Cruz Álvarez

Coordinador Interino de la División de Carreras Agronómicas

Universidad Autónoma Agraria  
ANTONIO NARRO



COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN  
DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Torreón, Coahuila, México

Diciembre, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
UNIDAD LAGUNA  
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Fitorremediación: una alternativa ecológica en el tratamiento de zonas  
contaminadas con arsénico y mercurio.

POR:

**NOELIA ANZURES VALDEPEÑA**

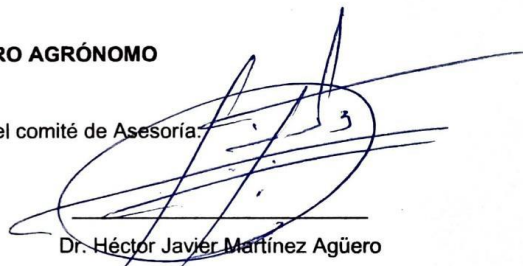
MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO**

Aprobada por el comité de Asesoría:

  
Dr. Rubén López Salazar  
Presidente

  
Dr. Héctor Javier Martínez Agüero  
Coasesor

  
M.C. Francisca Sánchez Bernal  
Coasesor

  
Dr. Isaías de la Cruz Álvarez  
Coordinador Interino de la División de Carreras Agronómicas

Torreón, Coahuila, México

Diciembre, 2021

Universidad Autónoma Agraria  
ANTONIO NARRO



COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN  
DE CARRERAS AGRONÓMICAS

## **AGRADECIMIENTOS**

**A mis padres**, Antonio Anzures Castellanos e Irma Valdepeña Molina por haberme dado la oportunidad y el apoyo incondicional para lograr con éxito culminar mis estudios profesionales.

**A mis hermanas**, Araceli Anzures Valdepeña y Lorena Anzures Valdepeña por apoyarme todos los días de mi vida y motivarme a ser mejor.

**A mi abuela**, María Félix Castellanos Gutiérrez, por ser el motor de mi vida y mi inspiración para salir adelante cada amanecer.

**A mi compañero**, Adiel Castillo Maldonado, por ser un apoyo incondicional durante la carrera y apoyarme en los momentos difíciles lejos de casa.

**A mi Alma Mater**, por darme la oportunidad de ser parte de su institución y por inculcarme valores que me han hecho crecer como persona y como profesional.

**A mi tutor**, el Ingeniero José Simón Carrillo Amaya, por ser parte fundamental de mi desarrollo durante mi estancia en la Universidad.

**A todos los docentes que me impartieron clases**, porque gracias a ellos logré adquirir conocimientos que facilitarían mi trabajo al egresar y de los que recibí apoyo en todo momento de mi carrera.

## DEDICATORIAS

**A mis padres**, Antonio e Irma, por apoyarme económica, moral, y psicológicamente durante toda mi vida.

**A mis hermanas**, Araceli y Lorena, por ser parte fundamental de mi desarrollo intelectual y por apoyarme siempre.

**A mi abuela**, por motivarme a ser mejor persona y ayudarme a salir adelante.

## RESUMEN

La fitorremediación es un proceso utilizado en la actualidad para tratar zonas contaminadas por metales pesados, entre los que destacan el arsénico (As) y el mercurio (Hg). Dichos metales son considerados contaminantes de fuentes hídricas y del suelo, principalmente en zonas mineras e industrias. Este proceso incluye mecanismos para la descontaminación del área a tratar y se caracteriza por utilizar especies vegetales para llevarlo a cabo. En la actualidad, es considerado como el proceso de mayor relevancia debido a su bajo costo y eficacia, dado que los procesos físico-químicos utilizados anteriormente son de costos elevados y efecto retardado. En el proceso, las especies vegetales reducen, degradan, extraen o inmovilizan los compuestos contaminantes del suelo, agua y aire de manera ecológica, con la finalidad de preservar del medio ambiente.

**Palabras clave:** Biorremediación, Metales pesados, Fitotecnologías, Resistencia, Contaminación.

## ÍNDICE

|  | Pág.       |
|--|------------|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b>                         | <b>i</b>   |
| <b>DEDICATORIAS</b>                            | <b>ii</b>  |
| <b>RESUMEN</b>                                 | <b>iii</b> |
| <b>ÍNDICE</b>                                  | <b>iv</b>  |
| <b>ÍNDICE DE CUADROS</b>                       | <b>v</b>   |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>                       | <b>vi</b>  |
| <b>1.INTRODUCCIÓN</b>                          | <b>1</b>   |
| 1.1. Objetivo                                  | 2          |
| 1.2. Justificación                             | 2          |
| <b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b>               | <b>3</b>   |
| 2.1. Contaminación por metales pesados         | 3          |
| 2.2. Mercurio                                  | 6          |
| 2.2.1. Toxicidad                               | 6          |
| 2.3. Arsénico                                  | 7          |
| 2.3.1. Toxicidad                               | 7          |
| 2.4. Biorremediación                           | 7          |
| 2.5. Fitorremediación                          | 9          |
| 2.5.1. Mecanismos de fitorremediación          | 11         |
| 2.6. Especies vegetales utilizadas             | 13         |
| 2.6.1. Fitorremediación de mercurio y arsénico | 15         |
| 2.7. Fitorremediación: un ejemplo              | 16         |
| 2.8. Sistemas de fitorremediación              | 18         |
| <b>3. DISCUSIÓN</b>                            | <b>20</b>  |
| <b>4. CONCLUSIONES</b>                         | <b>21</b>  |
| <b>5. RECOMENDACIONES</b>                      | <b>22</b>  |
| <b>6. LITERATURA CITADA</b>                    | <b>23</b>  |

## ÍNDICE DE CUADROS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Cuadro 1.</b> Actividades industriales y metales pesados generados. | <b>4</b>    |
| <b>Cuadro 2.</b> Metal pesado y síntomas de intoxicación.              | <b>5</b>    |
| <b>Cuadro 3.</b> Fitorremediación: ventajas y desventajas.             | <b>12</b>   |
| <b>Cuadro 4.</b> Principales técnicas de fitorremediación.             | <b>13</b>   |
| <b>Cuadro 5.</b> Especies vegetales y contaminante a tratar.           | <b>15</b>   |
| <b>Cuadro 6.</b> Especies leñosas utilizadas en fitorremediación.      | <b>16</b>   |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Figura 1.</b> Suelo de un basurero contaminado con hidrocarburos y metales pesados.   | 5    |
| <b>Figura 2.</b> Técnicas utilizadas en el proceso de biorremediación  | 9    |
| <b>Figura 3.</b> Técnicas de fitorremediación utilizadas para el tratamiento de recursos contaminados y área de acción en la planta. | 10   |
| <b>Figura 4.</b> <i>Jatropha dioica</i>  | 14   |
| <b>Figura 5.</b> <i>Eichhornia crassipes</i>   | 14   |
| <b>Figura 6.</b> <i>Schinus molle</i>  | 14   |
| <b>Figura 7.</b> <i>Typha latifolia</i>  | 14   |
| <b>Figura 8.</b> <i>Helianthus annuus</i>  | 14   |
| <b>Figura 9.</b> <i>Colocasia esculenta</i>  | 14   |
| <b>Figura 10.</b> <i>Helicornia psittacorum</i>  | 14   |
| <b>Figura 11.</b> <i>Ricinus communis</i>  | 14   |
| <b>Figura 12.</b> <i>Scirpus americanus</i>  | 14   |
| <b>Figura 13.</b> Proceso de fitoextracción de mercurio mediante <i>Eichhornia crassipes</i> .                                       | 17   |
| <b>Figura 14.</b> Proceso de fitoextracción de arsénico mediante <i>Helianthus annuus</i> .  | 18   |
| <b>Figura 15.</b> <i>Chrysopogon zizanioides</i> utilizado en el sistema de fitorremediación.  | 18   |
| <b>Figura 16.</b> <i>Helicornia psittacorum</i> utilizado en el sistema de fitorremediación.   | 19   |

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el problema de contaminación ambiental es un tema de interés ecológico y salud debido a que van ligados unos de otros. Uno de los principales problemas relacionados directamente a la contaminación es el aumento excesivo en la concentración de metales pesados, los cuales se caracterizan por tener una densidad alta, superior al agua. Entre los principales metales contaminantes se encuentra el cobalto (Co), el cobre (Cu), el mercurio (Hg), el níquel (Ni), el zinc (Zn) y el arsénico (As). Estos elementos se consideran tóxicos y se relacionan principalmente a las actividades mineras e industrias, lo que afecta directamente la degradación de los recursos naturales (Caviedes *et al.*, 2015a; Mora *et al.*, 2016; Martínez *et al.*, 2017).

Los recursos naturales son indispensables para la vida de todo ser vivo, sin embargo, en los últimos años se han visto afectados por la actividad humana desmedida, por lo que se hace necesario buscar alternativas que ayuden a disminuir la problemática. Anteriormente se utilizaban procesos físico-químicos en el tratamiento de los recursos, entre los que destacan el método de precipitación, oxidación y adsorción, siendo el último el de mayor impacto, sin embargo, debido a su alto costo se ha optado por buscar otras alternativas que garanticen su efectividad a largo plazo y a precios accesibles (Sun-Kou *et al.*, 2014).

La biorremediación en la actualidad es una tecnología que involucra organismos vivos con capacidades específicas, estos utilizan diversos mecanismos bioquímicos para contrarrestar la toxicidad de los metales pesados. Este proceso se conforma por tres diferentes tipos: a) degradación enzimática, b) remediación microbiana y c) fitorremediación (Beltrán-Pineda y Gómez-Rodríguez, 2016; Garzón *et al.*, 2017).

La fitorremediación es una técnica utilizada para la descontaminación de áreas afectadas por actividades humanas, principalmente en zonas mineras e industrias. En este proceso se llevan a cabo una serie de biotecnologías basadas en el uso de especies vegetales que restauran ambientes contaminados,

principalmente fuentes hídricas y suelos, esta técnica es en sí una “ tecnología sustentable que se basa en el uso de plantas para reducir *in situ* la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, sedimentos, agua, y aire, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los diversos tipos de contaminantes” (Núñez *et al.*, 2004a).

En un artículo publicado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en 2020 describen cinco procesos de fitorremediación basados al tipo de metal, especie utilizada, tipo de raíz, entre otros, estos procesos son: a) fitoextracción, b) fitodegradación, c) fitoestabilización, d) fitovolatilización y e) rizofiltración.

### **1.1 Objetivo**

Entender el proceso mediante el cual contaminantes orgánicos e inorgánicos son extraídos, reducidos y degradados mediante el proceso de fitorremediación

### **1.2. Justificación**

Se realizó el presente trabajo con la finalidad de conocer y entender el proceso de fitorremediación, así como las técnicas empleadas en suelos y aguas contaminadas con arsénico y mercurio, metales pesados que en exceso causan toxicidad a los organismos vivos.

Anteriormente, los métodos físico-químicos, eran la principal tecnología para tratar zonas contaminadas, sin embargo, eran costosos y poco amigables, por lo que la fitorremediación tomó un lugar muy importante en la solución de esta problemática.

La presente investigación se realizó con la finalidad de entender los mecanismos, y el impacto de las especies vegetales en el proceso.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Contaminación por metales pesados

Se estima que alrededor de siete millones de personas mueren al año a causa del cáncer, relacionado directamente a la contaminación ambiental originada por metales pesados (Delgado *et al.*, 2019). Estos metales se encuentran de manera natural en el ecosistema, sin embargo, es gracias a las actividades humanas como minería, industrialización, uso de fertilizantes, insecticidas y estiércoles sin tratar, que se aumenta la concentración en fuentes hídricas, suelo y aire, lo que compromete directamente la calidad del agua debido a su rápida velocidad de propagación, afectando directamente la cadena trófica. El cuadro 1 enlista algunas actividades humanas que aportan metales pesados al medio ambiente, así como la figura 1 muestra una fuente de contaminación directa (Londoño *et al.*, 2016; Vera *et al.*, 2015; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015).

Los metales pesados (MP) son elementos de elevado peso atómico y densidades mayores a 4,5 g/cm<sup>3</sup>, capaces de ser nocivos para los organismos vivos incluso cuando se encuentran en bajas concentraciones, entre los principales metales se encuentra el mercurio (Hg), el arsénico (As), el cadmio (Cd), el cobre (Cu), el plomo (Pb), el zinc (Zn), el cromo (Cr) y el níquel (Ni). Por su elevada toxicidad y sus características de persistencia, bioacumulación y biotransformación son considerados elementos de impacto en la salud, ocasionando problemas cancerígenos y daños a órganos específicos, principalmente al sistema nervioso central y periférico en humanos, mientras que en plantas puede provocar necrosis, inhibición de crecimiento y muerte total. El daño en el organismo varía de acuerdo al tiempo, nivel de exposición, y la ruta de absorción del metal. (Rodríguez, 2017; Reyes *et al.*, 2016; Nava-Ruíz y Méndez- Armenta, 2011; Tejada-Tovar *et al.*, 2015).

**Cuadro 1.** Actividades industriales y metales pesados generados (Cavides *et al.*, 2015b).

| <b>Industria</b>        | <b>Metales</b>                 |
|-------------------------|--------------------------------|
| Extracción de minerales | As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn         |
| Fundición               | As, Cd, Pb                     |
| Metalúrgica             | Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn         |
| Aceros                  | Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Zn     |
| Gestión de residuos     | Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn |
| Pinturas                | Pb, Cr, As, Ti, Zn             |
| Baterías                | Pb, Zn, Cd, Ni, Hg             |
| Electrónica             | Pb, Cd, Hg, Cr, As, Ni, Mn     |
| Agricultura y ganadería | Cd, Cr, Mo, Pb, Zn, As, Mn, Cu |

Por lo tanto, los MP resultan ser un grupo muy peligroso de contaminantes, ya que no solo afectan ecológicamente, sino directamente a la salud de los organismos vivos debido a su baja biodegradabilidad y su capacidad de acumulación y concentración. El cuadro 2 muestra diferentes síntomas de intoxicación a corto y largo plazo provocados por metales pesados encontrados en agua, suelo y aire contaminado. (Huamani-Yupanqui *et al.*, 2012; Cardona *et al.*, 2013; Huaranga *et al.*, 2012).

**Cuadro 2.** Metal pesado y síntomas de intoxicación (Cavides *et al.*, 2015c).

| <b>Metal pesado</b> | <b>Toxicidad</b>  |
|---------------------|---|
| As                  | Cánceres viscerales, enfermedades vasculares y cutáneas |
| Cd                  | Cánceres y enfermedades renales                         |
| Cr                  | Cánceres, diarrea, náuseas, vomito.                     |
| Cu                  | Enfermedades relacionadas al hígado                     |
| Ni                  | Cánceres, asma, náuseas, dermatitis                     |
| Zn                  | Problemas neurológicos, letargo y depresión             |
| Pb                  | Enfermedades renales, vasculares y neuronales           |
| Hg                  | Enfermedades óseas, renales, vasculares y neuronales    |



**Figura 1.** Suelo de un basurero contaminado con hidrocarburos y metales pesados.

## **2.2. Mercurio**

El mercurio Hg, es un elemento químico, con número atómico de 80 y masa atómica de 200.59. Es un metal pesado perteneciente al bloque d. Es el único elemento que se presenta en estado líquido a temperatura ambiente. Se encuentra de manera natural en el medio ambiente, principalmente, es liberado a través de erupciones volcánicas como sales de mercurio. Algunas propiedades del metal le permiten tener movilidad ya que a diferencia de los otros metales se presenta en forma sólida, líquida y gaseosa (Cano, 2012).

El mercurio está presente en tres formas: a) mercurio elemental, b) sal inorgánica de mercurio y c) mercurio orgánico, siendo este último el de mayor importancia debido a sus compuestos en los que encontramos al metilmercurio, etilmercurio y fenilmercurio, de los cuales, el metilmercurio resulta de mayor preocupación debido a que fácilmente logra bioacumularse y biomagnificarse hasta ser ingerido por organismos vivos ocasionando toxicidad y en casos fatales, la muerte (Raimann *et al.*, 2014).

### **2.2.1. Toxicidad**

Es considerado en la actualidad, como el metal pesado de mayor importancia a nivel mundial. Sus efectos tienen lugar en el ambiente y en la salud humana, al provocar enfermedades crónicas degenerativas, así como trastornos del neurodesarrollo en infantes. La toxicidad del metal depende de la forma en que se presente, así como la intoxicación depende de la cantidad, el tiempo de exposición y la vía de entrada al organismo (Gaiolia *et al.*, 2012; Casas *et al.*, 2015).

La principal fuente de ingestión e intoxicación por mercurio es a través del consumo de peces y mariscos, dado que llega a las aguas subterráneas y se traslada rápidamente, estas pequeñas partículas son consumidas por los microorganismos acuáticos y es así como entra en la cadena trófica hasta llegar al humano (Díaz-Arriaga, 2014; Paisio *et al.*, 2012; Chaves, 2016; Osoreo *et al.*, 2012; Tejada *et al.* 2012).

### **2.3. Arsénico**

El arsénico (As) es un elemento considerado como metal pesado debido a su alta densidad, sin embargo, pertenece al bloque p de tabla periódica, que incluye elementos no metales (metaloideos). Tiene un número atómico de 33 y una masa atómica de 74.9216. Es un elemento tóxico debido principalmente a su fácil movilidad en el entorno (agua subterránea) y se puede encontrar en diferentes formas, tanto en compuestos naturales como en sintéticos (Rangel *et al.*, 2015; Gasque, 2013).

Generalmente se encuentra de manera natural en la corteza terrestres, no se degrada de forma natural y se encuentra en su mayoría como contaminante hídrico. El As ingresa al organismo por vías respiratorias, digestivas y cutáneas, donde se acumula y se transforma en ácidos (dimetilarlésnico y metilarlésnico), es un elemento cancerígeno y provoca daños al organismo a corto y largo plazo (Mancilla-Villa *et al.*, 2012; Ramírez, 2013; Medina-Pizzali *et al.*, 2018; Francisca y Carro, 2014; García-Nieto *et al.*, 2011).

#### **2.3.1. Toxicidad**

La toxicidad del elemento varía de acuerdo a la dosis y tiempo de exposición, así como a factores físicos y genéticos del individuo. Entre los problemas de salud que se conocen está el hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE), trastornos vasculares, metabólicos y cánceres derivados del consumo de agua contaminada con As (Navoni *et al.*, 2012; Apaza, 2014).

El HACRE, es una enfermedad resultante de la intoxicación crónica de arsénico en el agua de consumo que incluye afecciones leves como leucodermia a otras más graves como diabetes y cáncer (figura 2) (Villaamil, 2015; Bocanegra *et al.*, 2002).

### **2.4. Biorremediación**

La biotecnología ambiental surgió como una solución a problemas de contaminación. Dentro de esta disciplina se encuentra una rama importante para



la recuperación de la calidad de los recursos naturales, a esta rama se le conoce como biorremediación (Yaima, 2011).

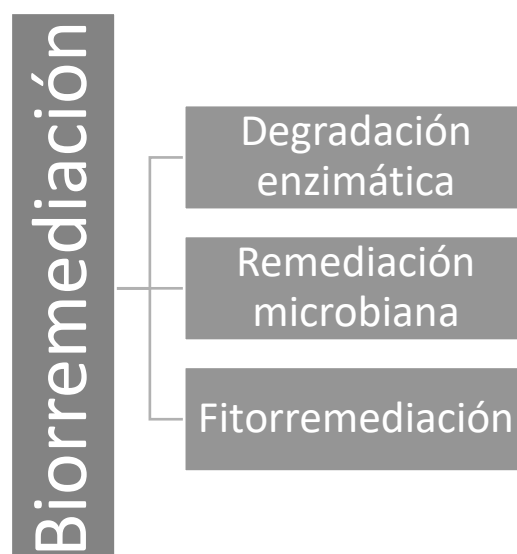
Martínez-Prado *et al.* (2011), mencionan que existen tres principales tecnologías de remediación, a) biológicas, b) físico-químicas y c) térmicas, donde se destaca a los primeros por su impacto en la actualidad. Entre las tecnologías biológicas encontramos una que particularmente llama la atención, la biorremediación, que utiliza organismos vivos para degradar, transformar y eliminar elementos tóxicos del ambiente, con riesgos mínimos para la salud y sin tratamientos posteriores (Arrieta *et al.*, 2012; Rivera *et al.*, 2018).

Se conoce como biorremediación al tratamiento biológico de los recursos, aire, suelo y agua que han pasado o se encuentran en un caso de contaminación. Este proceso utiliza microorganismos y/o plantas para degradar los contaminantes y así disminuir su impacto en el ambiente, además, se caracteriza por utilizar los sistemas biológicos de los organismos vivos para destruir o transformar compuestos químicos tóxicos a otros de menos impacto. Es una alternativa sostenible y ecológica utilizada por su fácil desarrollo, efectividad y bajo costo (Alvarez, 2015; Trujillo y Ramírez, 2012; González, 2014; Buendía, 2012).

Cabe mencionar que para que el proceso de biorremediación sea funcional y efectivo es necesario que las condiciones ambientales y los factores internos y externos sean los adecuadas, por lo que es importante que las concentraciones de nutrientes y los niveles poblacionales de microorganismos sean los adecuados. La bioestimulación y la bioaumentación son estrategias para garantizar la funcionalidad del proceso, la primera consiste en adicionar los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos y el segundo hace referencia a la adición de microorganismos al lugar específico (Núñez *et al.*, 2014; Ferreira Do Nascimento *et al.*, 2013; Acuña *et al.*, 2012).

Covarrubias *et al.* (2015) y Benítez-Campo (2011), Dentro de esta biotecnología se utilizan procesos para disminuir las concentraciones de contaminantes del agua y suelo, como bioadsorción, bioacumulación, biolixiviación, biotransformación, biovolatilización y precipitación. La biorremediación utiliza

distintas técnicas para el tratamiento de áreas contaminadas, las cuales se presentan en la figura 2 según información de los mismos autores.



**Figura 2.** Técnicas utilizadas en el proceso de biorremediación.

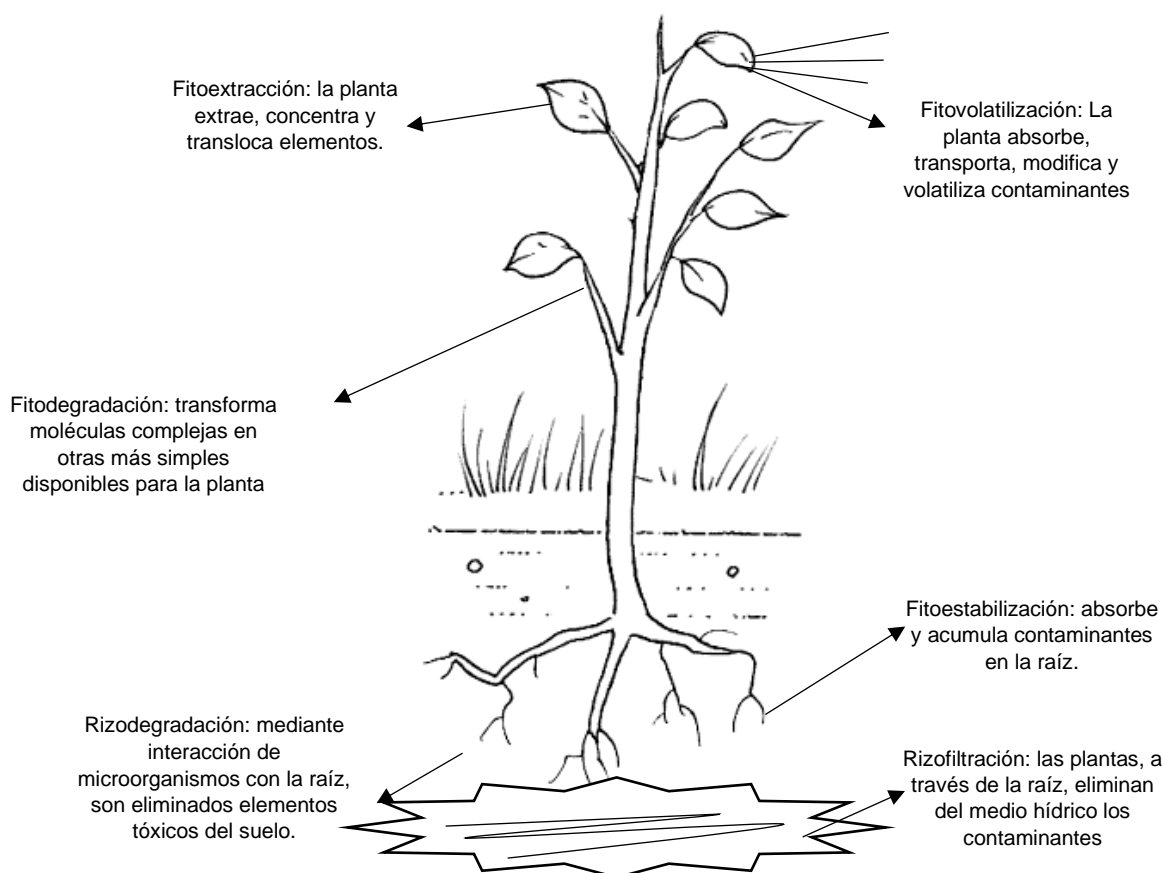
## 2.5. Fitorremediación

La fitorremediación es conocida como una alternativa sustentable para contribuir a la solución del problema de contaminación, así como para remediar áreas degradadas. Esta técnica se caracteriza por utilizar especies vegetales, inclusive especies leñosas, para remover del suelo y el agua, elementos tóxicos para el ambiente y la salud del ser humano. Cabe mencionar que es una estrategia agradable visual y estéticamente, amigable con el medio ambiente, además de ser una tecnología de bajo costo, que no presenta problemas a largo plazo (Velásquez, 2017; Cubillos, 2011; Munive *et al.*, 2018).

Un aspecto importante es que además de disminuir el impacto ambiental de los contaminantes, mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo al incrementar los agregados, el contenido de carbono, la calidad del drenaje, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana debido al uso de enmiendas utilizadas para que la planta se desarrolle al mismo tiempo que elimina el contaminante. Cabe mencionar que existen algunas desventajas de

esta tecnología, las cuales se describen en el cuadro 3 (Mager y Hernández-Valencia, 2013).

Esta tecnología, es una vía de remediación viable en el que las plantas degradan, extraen, acumulan y estabilizan diferentes elementos para hacerlos biodisponibles, los procesos mencionados se realizan dependiendo el origen del contaminante. Para contaminantes orgánicos destacan los procesos de fitodegradación, rizorremediación y rizodegradación, mientras que, para compuestos inorgánicos como los metales pesados y metaloides, destacan la fitoextracción, fitovolatilización, fitoestabilización y rizofiltración (figura 3) y cuadro 4 (Peralta-Pérez y Volke-Sepúlveda, 2012; Hernández *et al.*, 2017; Arias-Trinidad *et al.*, 2017; Peña y Beltrán, 2012).



**Figura 3.** Técnicas de fitorremediación utilizadas para el tratamiento de recursos contaminados y área de acción en la planta (Amaya *et al.*, 2015).

### 2.5.1. Mecanismos de fitorremediación

*Fitodegradación:* mediante este proceso la planta absorbe, transloca y metaboliza contaminantes extraídos del suelo, de esta forma, moléculas complejas, pasan a ser más simples, solubles en agua, biotransformadas e inclusive de utilidad para la planta. Este proceso se realiza en la parte aérea (López-Martínez *et al.*, 2005; Muñoz *et al.*, 2010).

*Fitoextracción:* consiste en absorber contaminantes por medio del sistema radicular, principalmente metales pesados, estos elementos se acumulan en la raíz y posteriormente son translocados al sistema aéreo, tallos, hojas, flores, frutos y semillas, lo que provoca la disminución gradual de MP (Falcon, 2017; Ortiz-Cano *et al.*, 2009).

*Fitovolatilización:* se conoce así a la técnica de fitorremediación en la que compuestos orgánicos e inorgánicos que contaminan el agua y suelo son absorbidos, translocados y transpirados como moléculas gaseosas a través de las hojas, sin embargo, es importante mencionar que esta tecnología debe ser realizada bajo cuidados especiales, considerando que el contaminante es transferido de un recurso a otro (Nerio y Olivero, 2008; Samaniego, 2011).

*Fitoestabilización:* se trata de cubiertas verdes autosustentables, tratadas mediante la incorporación de enmiendas, que le aportan nutrientes a largo plazo para que la planta se desarrolle y complete su ciclo, tiempo suficiente para estabilizar el contaminante y evitar su migración hacia las aguas subterráneas, con esta técnica se inmovilizan los elementos (metales pesados principalmente), mediante el sistema radicular. El proceso de adsorción de la rizosfera ocasiona la acumulación en las raíces, lo que se refleja en una disminución de contaminantes (Zonzora *et al.*, 2017; Martínez-Martínez, 2014; Loch, 2017.).

*Rizorremediación:* las plantas llevan a cabo este proceso en la rizosfera, donde mediante la asociación con microorganismos la planta remueve los contaminantes

del medio en que se encuentra, sin que estos pasen a la parte área de la planta (Marín, 2020; Massot *et al.*, 2018).

*Rizodegradación:* se lleva a cabo en el suelo que rodea las raíces, es un proceso relativamente lento en comparación con la fitodegradación, y hace referencia principalmente a la degradación de contaminantes por medio de la interacción planta-microorganismo (Arenas y Hernández, 2012; Bernai, 2014).

*Rizofiltración:* se caracteriza por ser utilizada en el tratamiento de aguas residuales, contaminadas con material orgánico e inorgánico. En ella, plantas acuáticas resistentes son introducidas al medio hídrico donde se desarrollan al mismo tiempo que sus raíces adsorben los elementos (Parra, 2017).

**Cuadro 3.** Fitorremediación: ventajas y desventajas (Delgadillo-López *et al.*, 2011a).

| <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>   |
|---|--|
| 1.- Se realiza in situ y ex situ                                    | 1.- Proceso lento en especies leñosas                                      |
| 2.- Tecnología sustentable  | 2.- Se restringe a sitios superficiales                                    |
| 3.- Se utiliza para contaminantes orgánicos e inorgánicos           | 3.- En ocasiones no resulta favorable la volatilización al ambiente        |
| 4.- Bajo costo  | 4.- No todas las plantas son tolerantes                                    |
| 5.- Mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo | 5.- Algunos contaminantes pueden migrar o dispersarse mediante el proceso. |
| 6.- Es estéticamente agradable                                      |  |
| 7.- Puede ser empleada en agua, suelo y aire                        |  |
| 8.- Poco perjudicial para el ambiente                               |  |
| 9.- Son diversas las plantas utilizadas                             |  |
| 10.- Se pueden hacer que un individuo sea más eficiente.            |  |

**Cuadro 4.** Principales técnicas de fitorremediación (Delgadillo-López *et al.*, 2011b).

| <b>Proceso</b>     | <b>Mecanismo</b>               | <b>Contaminante</b>   |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Fitoextracción     | Hiperacumulación               | Inorgánicos           |
| Fitoestabilización | Complejación                   | Orgánico e inorgánico |
| Fitovolatilización | Volatilización                 | Orgánico e inorgánico |
| Fitoimmobilización | Acumulación en raíz            | Orgánico e inorgánico |
| Fitodegradación    | Asociación con microorganismo  | Orgánicos             |
| Rizofiltración     | Absorción y adsorción por raíz | Orgánico e inorgánico |

## 2.6. Especies vegetales utilizadas

Marrero-Coto *et al.* (2012), en investigaciones pasadas encontró que son alrededor de 122 especies de plantas hiperacumuladoras (HA), con alta capacidad para absorber metales pesados (MP) y 35 acumuladoras (A), que absorben menor cantidad de MP (Alvarado *et al.*, 2011). Estas especies pertenecen en su mayoría a las familias: *Asteraceae*, *Euphorbiaceae* y *Rubiaceae*. Sin embargo, es importante mencionar que el proceso depende de la especie en particular y sus características, las cuales, pueden ser modificadas y mejoradas con técnicas de biotecnología (Bernal, 2014).

Son muchas las plantas utilizadas para el proceso de fitorremediación, algunas de ellas son: *Scirpus americanus*, *Typha latifolia*, *Jatropha dioica*, *Amaranthus hybridus*, *Eichhornia crassipes* (Covarrubias y Peña 2017), *Helianthus annuus* L. (Buendía *et al.*, 2014), *Acacia farnesiana* L. Will (Landeros-Márquez *et al.*, 2011), *Acacia visco*, *Buddleja coriacea*, *Eucalyptus globulus*, *Myoporum laetum*, *Polylepis racemosa*, *Schinus molle* (Paredes, 2015), *Medicago sativa* L. (Carrillo-Castañeda *et al.*, 2011), *Salvinia biloba Raddi* (Tello *et al.*, 2015), *Colocasia esculenta*, *Heliconia psittacorum*, *Gynerium sagittatum* (Madera-Parra *et al.*, 2014), *Alopecurus magellanicus bracteatus*, *Muhlenbergia angustata* (Argota-

Pérez *et al.*, 2020), *Ricinus communis*, *Lolium perenne* L., *Poa pratensis* L. entre otras (Amezcuá-Ávila *et al.*, 2020).



**Figura 4.** *Jatropha dioica*



**Figura 5.** *Eichhornia crassipes*



**Figura 6.** *Schinus molle*



**Figura 7.** *Typha latifolia*



**Figura 8.** *Helianthus annuus*



**Figura 9.** *Colocasia esculenta*



**Figura 10.** *Heliconia psittacorum*



**Figura 11.** *Ricinus communis*



**Figura 12.** *Scirpus americanus*

La característica principal para la elección de una especie es su adaptabilidad al medio, el nivel de tolerancia al contaminante, su rápido crecimiento, desarrollo y reproducción (Noguez-Inesta *et al.*, 2017).

### 2.6.1. Fitorremediadoras de Mercurio y Arsénico

Las especies utilizadas son diversas, en el cuadro 5 y 6 se muestran algunas de las más empleadas para el tratamiento y remoción de mercurio y arsénico.

**Cuadro 5.** Especie vegetal y metal contaminante a tratar. **Fuente:** Recopilado de Paredes y Ñique, 2016; Sepúlveda *et al.*, 2012; Jaramillo *et al.*, 2015; Navazas, 2014; Herrera *et al.*, 2017; Rumaja y Huamán, 2017).

| <b>Especie vegetal</b>            | <b>Contaminante</b> |
|-----------------------------------|---------------------|
| <i>Lycopersicon esculentum L.</i> | Arsénico            |
| <i>Arabidopsis halleri</i>        | Arsénico            |
| <i>Pteris vittata L.</i>          | Arsénico            |
| <i>Pteris cretica</i>             | Arsénico            |
| <i>Pteris biaurita</i>            | Arsénico            |
| <i>Arabidopsis sp.</i>            | Arsénico y mercurio |
| <i>Azolla pinnata</i>             | Mercurio            |
| <i>Eichhornia crassipes</i>       | Mercurio            |
| <i>Salicornia sp.</i>             | Arsénico y mercurio |
| <i>Elodea sp.</i>                 | Mercurio            |
| <i>Pistia stratiotes</i>          | Mercurio            |
| <i>Zea mays</i>                   | Arsénico            |
| <i>Brassica juncea</i>            | Arsénico            |
| <i>Flaveria trinervia</i>         | Arsénico            |
| <i>Nasturtium officinale</i>      | Mercurio            |
| <i>Hydrocotyle ranunculoides</i>  | Mercurio            |
| <i>Chlorella sp.</i>              | Mercurio            |
| <i>Astragalus arequipensis</i>    | Mercurio            |



**Cuadro 6.** Especies leñosas utilizadas en fitorremediación. **Fuente:** Recopilado de Wong-Argüelles *et al.*, 2021; Vidal *et al.*, 2010.

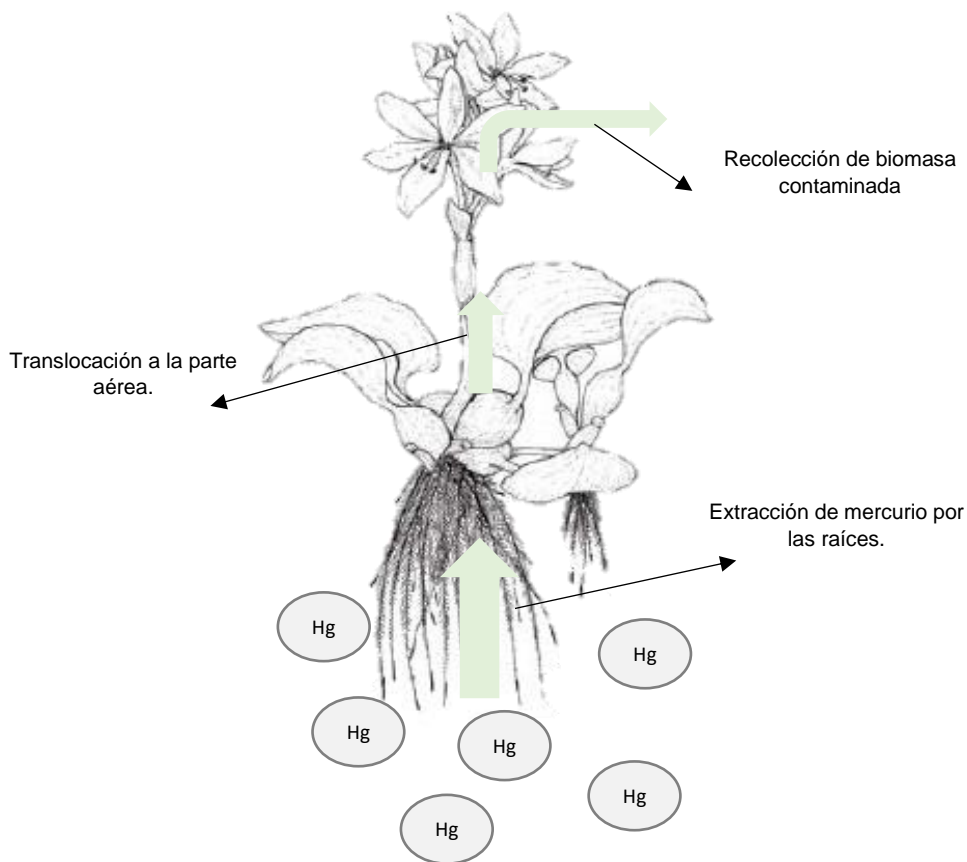
| <b>Especie vegetal</b>     | <b>Contaminante</b> |
|----------------------------|---------------------|
| <i>Salix atrocinerea</i>   | Arsénico            |
| <i>Myoporum laetum</i>     | Arsénico            |
| <i>Buddleja coriacea</i>   | Arsénico            |
| <i>Acacia visco</i>        | Arsénico            |
| <i>Polylepis racemosa</i>  | Arsénico            |
| <i>Schinus molle</i>       | Arsénico            |
| <i>Eucalyptus globulus</i> | Arsénico            |
| <i>Cecropia peltata</i>    | Mercurio            |
| <i>Acacia mangium</i>      | Mercurio            |

## 2.7. Fitorremediación: un ejemplo

- *Eichhornia crassipes*: fitoextracción de mercurio en aguas subterráneas.

En el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio se ha realizado investigación debido a que es un metal altamente tóxico y muy abundante en zonas mineras, el sector salud, industrias de pilas y baterías, etc. Una de las especies de interés en el tratamiento de este contaminante es *Eichhornia crassipes*, considerada por su eficiencia en la remoción de metales (Vargas *et al.*, 2018; Valencia y Flórez, 2020).

En un estudio realizado por Poma y Valderrama (2014a), se evaluó el nivel de resistencia de *E. Crassipes* a diferentes concentraciones de mercurio alcanzando hasta 5mg/l, por lo que se considera una planta hiperacumuladora que por medio de fitoextracción absorbe del agua el metal y lo transporta a la parte aérea para posteriormente ser recolectado (figura 13).

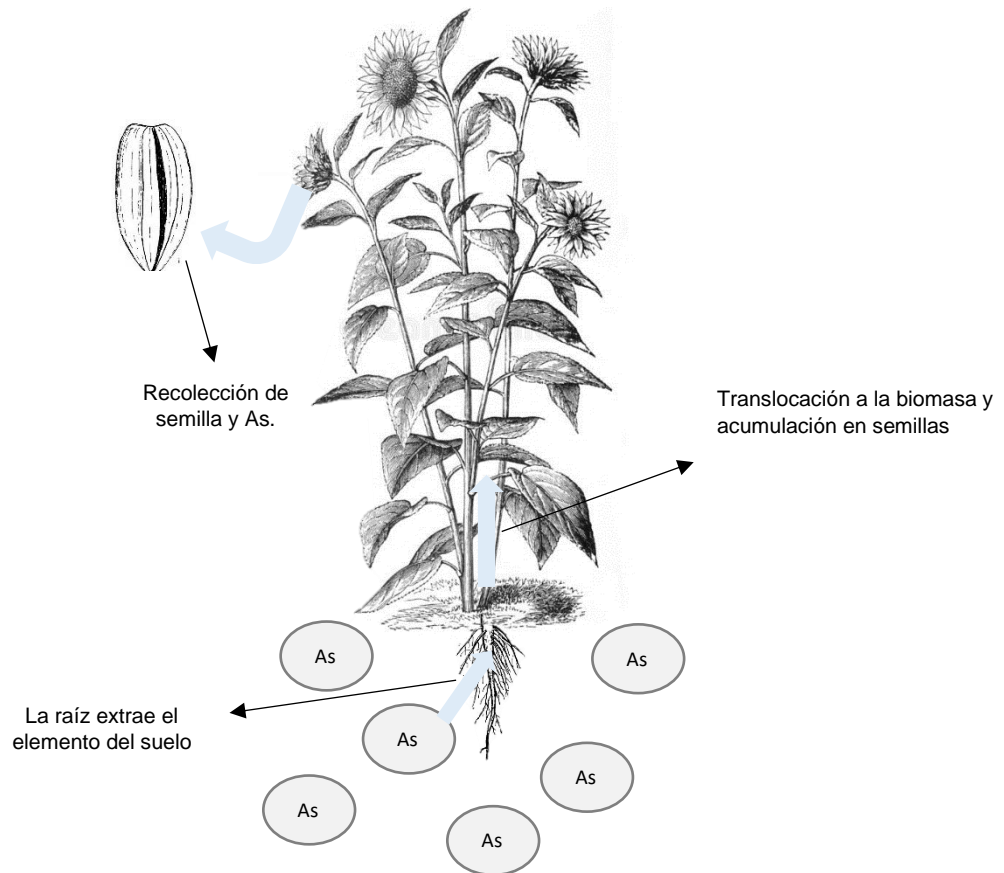


**Figura 13.** Proceso de fitoextracción de mercurio mediante *Eichhornia crassipes* (Poma y Valderrama, 2014b).

- *Helianthus annuus*: fitoextracción de arsénico en el suelo.

Se han utilizado plantas herbáceas, arbustivas y leñosas para el tratamiento de arsénico. La especie *Helianthus annuus* ha sido estudiada debido a su resistencia y adaptabilidad a suelos con altos contenidos de metales pesados, incluyendo el arsénico (Segretin *et al.*, 2010).

Investigación de Gallardo (2019a), menciona que la planta disminuye la dispersión del contaminante ya que al extraerlo del suelo lo adsorbe y evita su migración por lixiviación y escorrentía. Se ha observado que la planta absorbe y acumula la mayor concentración del metal en sus semillas (figura 14).



**Figura 14.** Proceso de fitoextracción de arsénico mediante *Helianthus annuus* (Gallardo, 2019b).

## 2.8. Sistemas de fitorremediación



**Figura 15.** *Chrysopogon zizanioides* utilizado en el sistema de fitorremediación.



**Figura 16.** *Heliconia psittacorum* utilizado en el sistema de fitorremediación

### 3. DISCUSIÓN

Durante los últimos años debido a las actividades de hombre se ha incrementado la concentración de elementos contaminantes en el ambiente, lo que ha provocado problemas de salud, ecológicos, estéticos y una disminución de los recursos viables, debido a ello, se ha visto la necesidad de buscar alternativas que disminuyan el impacto de estos elementos. Durante décadas se han desarrollado y empleado tecnologías que permitan remediar la contaminación, sin embargo, no fue hasta 1991, cuando el término de fitorremediación dio un giro inesperado a la problemática (Núñez *et al.*, 2004b).

Esta tecnología utiliza a las plantas para eliminar o hacer menos disponibles elementos contaminantes, principalmente metales pesados del suelo y el agua, absorbiendo del 67% al 90%, minimizando el riesgo de contaminación e intoxicación de seres vivos (Cubillos *et al.*, 2014). Tal es el caso de Agudelo *et al.*, (2005), quienes mencionan que es el proceso más eficaz y ecológico en el tratamiento de biosólidos, así mismo Ordaz *et al.* (2011) y De la rosa *et al.* (2014), mencionan que al aplicar esta tecnología se redujeron significativamente las concentraciones de hidrocarburos de petróleo del suelo, por su parte, Barrios-Ziolo *et al.* (2015), analizaron la efectividad de proceso en la extracción de aceites de motor, obteniendo resultados favorables. Para el caso de metales pesados Bernal *et al.* (2007), en trabajos anteriores aplicando el proceso de Fitoimmobilización logró evitar la dispersión y migración de elementos como As, Cd, Cu, Pb, y Zn, con lo que disminuyó el impacto ambiental producido. Por su parte Domínguez *et al.* (2016), en experimentos con *Eichhornia crassipes* lograron reducir los niveles de mercurio en aguas superficiales al extraer el 71 % del metal.

Por lo anterior se entiende a la fitorremediación como una tecnología efectiva y aplicable. Sin embargo, es necesario realizar más investigaciones para entender el mecanismo de la planta y de esta forma transmitir ese conocimiento de manera clara y entendible para su aceptación y práctica por la sociedad.

#### **4. CONCLUSIONES**

La lucha contra el cambio climático y la reducción de contaminantes es una prioridad desde hace ya varios años, sin embargo, las técnicas utilizadas anteriormente resultan ser costosas, poco amigables y de efectos secundarios, por lo que se hizo necesario buscar otras alternativas costo-efectivas para ser aplicadas en el tratamiento de aguas y suelos.

Es por ello que la biorremediación, particularmente la fitorremediación resulta ser de utilidad para el medio ambiente, esta tecnología utiliza cien por ciento a las plantas para adsorber, acumular, estabilizar, volatizar y metabolizar los contaminates.

A pesar de ser descubierta décadas atrás, sigue siendo de interés para aquellos involucrados en la mejora de los recursos naturales de manera sustentable y sostenible.

Por lo que se continúan las investigaciones y mejoras genéticas en especies específicas para el tratamiento de elementos orgánicos e inorgánicos contaminantes del medio ambiente.

## **5. RECOMENDACIONES**

Es recomendable investigar más sobre el tema, para de esta manera entender a profundidad los procesos de fitoextracción, fitoestabilización, fitodegradación, etc., con el fin de utilizar las plantas y microorganismos adecuados para cada proceso.

Así mismo, se recomienda realizar más experimentación en los sitios de interés para determinar el tipo de planta en base a su resistencia a las diferentes concentraciones del metal y con ello garantizar su efectividad.

Por otra parte, es indispensable dar a conocer la información recolectada hasta la fecha a la sociedad en general, para que de esta manera todos seamos partícipes de una mejora en la calidad de vida de nuestro planeta ya que como se ha mencionado, esta tecnología no necesita de un especialista para su aplicación y se puede realizar a baja escala en cualquier sitio.

## 6. LITERATURA CITADA

- Acuña, A.J., Tonín, N.L., Díaz, V, Pucci, G.N. y Pucci, O.H. 2012. Optimización de un sistema de biorremediación de hidrocarburos a escala de laboratorio. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(1), 105-112.
- Agudelo, B. L. M., Macias, M. K. I. y Suárez, M. A. J. 2005. Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1),57-60. ISSN: 1794-4449.
- ALVARADO, C. J., DASGUPTA-SCHUBERT, N., AMBRIZ, E., SÁNCHEZ-YAÑEZ, J. M. y VILLEGAS, J. 2011. Hongos micorrízicos arbusculares y la fitorremediación de plomo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(4), 357-364.
- Álvarez, H. M. 2015. Biorremediación de ambientes contaminados con hidrocarburos: un proceso complejo que involucra múltiples variables. *Química Viva*, 14(1),18-25.
- Amaya C., A., Chávez, M. L., Jiménez M., Ma. Del C., Islas E., M., Cano R., C. y Roa M., G. 2015. FITORREMEDIACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS
- Amezcuá-Ávila, A. V., Hernández-Acosta, E. y Díaz Vargas, P. 2020. Fitorremediación de residuos de minas contaminados con metales pesados. *Revista Iberoamericana de Ciencias* ISSN 2334-2501.
- Apaza, P. R. 2014. Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la zona de carancas y huata, puno. Revista Investigaciones Altoandinas, ISSN 2306-8582, ISSN-e 2313-2957, Vol. 16, N.º. 1.
- Arias-Trinidad, A., Rivera-Cruz, M., Roldán-Garrigós, A., Aceves-Navarro, L. A., Quintero-Lizaola, R. y Hernández-Guzmán, J. 2017. Uso de *Leersia hexandra* (Poaceae) en la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo fresco e intemperizado. *Revista de Biología Tropical*, 65(1),21-30.



- Arenas M., S. y Hernández C., S. A. 2012. Fitotoxicidad del Cadmio (Cd) y el Mercurio (Hg) en la especie *Brassica nigra*. Universidad de Medellín.
- Argota-Pérez, G., Encinas-Cáceres, M., Argota-Coello, H. y Iannacone, J. 2020. COEFICIENTES BIOLÓGICOS DE FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS EXPUESTOS A PLOMO Y CADMIO UTILIZANDO *ALOPECURUS MAGELLANICUS BRACTEATUS* Y *MUHLENBERGIA ANGUSTATA* (POACEAE), PUNO, PERÚ. *The Biologist (Lima)*, 12(1).
- Arrieta R., O. M., Rivera R., A. P., Arias M., L., Rojano, B. A., Ruiz, O., Cardona G., S. A. 2012. Biorremediación de un suelo con diesel Mediante el uso de microorganismos autóctonos. *Gestión y Ambiente*, 15(1),27-39.
- Barrios-Ziolo, L. F., Robayo-Gómez, J., Prieto-Cadavid, S. y Cardona-Gallo, S. A. 2015. Biorremediación de Suelos Contaminados con Aceites Usados de Motor. *Revista CINTEX*, Vol. 20(1), 69-96.
- Beltrán-Pineda, M. E. y Gómez-Rodríguez, A. M. 2016. Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 12(2), 172-197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>
- Benítez-Campo, N. 2011. PRODUCCIÓN LIMPIA Y BIORREMEDIACIÓN PARA DISMINUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR CROMO EN LA INDUSTRIA DE CURTIEMBRES. *Revista del Doctorado Interinstitucional en Ciencias Ambientales. Ambiente y Sostenibilidad* (1): 25-31 ISSN: 2339-3122 25.
- Bernal F., A. A. 2014. Fitorremediación en la recuperación de suelos una visión general. Universidad de Boyacá. ISSN-e 2145-6453, Vol. 5 (2). págs. 245-258.
- Bernal, M., Clemente, R., Vázquez, S. y Walker, D. 2007. Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. *Ecosistemas*, 16(2).

- Bocanegra, O. C., Bocanegra, E. M. y Álvarez, A. A. 2002. ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS: SU IMPACTO EN LA SALUD. ISBN 987-544-063-9.
- Buendía R. H., Cruz R. F. C. R., Meza A. C. y Arévalo Z., J. 2014. Fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo. *Alma máter Segunda época*, (1), 113–121.
- Buendía R., H. 2012. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, Vol. 15(30), 123–130. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v15i30.4101>
- Cano, E. S. 2012. Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomédica*, 32(3). ISSN: 0120-4157. <https://doi.org/10.7705/issn.0120-4157>
- Carrillo-Castañeda, G., Juárez-Muñoz, J. y Tijerina-Castro, G. D. 2011. AISLAMIENTO DE MICROORGANISMOS INOCUOS PRODUCTORES DE SIDERÓFOROS PARA SISTEMAS DE FITORREMEDIACIÓN. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3),501-509.
- Casas, I. C., Gómez, E., Rodríguez, L. M., Girón, S. L. y Mateus, J. C. 2015. Hacia un plan nacional para el control de los efectos del mercurio en la salud en Colombia. *Biomédica*, 35(2),30-37. ISSN: 0120-4157
- Cardona G., A. F., Cabañas V., D.D. y Zepeda P., A. 2013. Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*, 17(1),1-9. ISSN: 1665-529X.
- Caviedes, R. D. I., Muñoz, C. R. A., Perdomo, G. A. Rodríguez, A. D. y Sandoval, R. I. J. 2015 Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*;13(1):73-90.

- Covarrubias, S. A., García B., J. A., y Peña C., J. J. 2015. El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Universitaria*, 25, 40–45. <https://doi.org/10.15174/au.2015.907>
- Covarrubias, S. A. y Peña C. J. J. 2017. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR METALES PESADOS EN MÉXICO: PROBLEMÁTICA Y ESTRATEGIAS DE FITORREMEDIACIÓN. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 33, 7–21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Cubillos V., J. A. 2011. Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia)
- Cubillos, J., Pulgarín, P., Gutiérrez, J. y Paredes, D. 2014. Fitorremediación en Aguas y Suelos Contaminados con Hidrocarburos del Petróleo. *Ingeniería y Competitividad*, 16(1),131-146. ISSN: 0123-3033.
- Chaves, R. I. 2016. Metodologías analíticas utilizadas actualmente para la determinación de mercurio en músculo de pescado. PENSAMIENTO ACTUAL. VOL. 16 NÚM. 26. DOI 10.15517/PA.V16I26.25187
- Cynthia Wong-Argüelles, C., Carranza-Álvarez, C., Alonso-Castro, A. J. y Ilizaliturri-Hernández C. A. 2021. FITORREMEDIACIÓN in situ EN MÉXICO: UNA REVISIÓN. Vol. 44. Núm. 2. DOI: <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.133>
- Delgado, C., Bautista, F., Gogichaishvili, A., Cortés, J. L., Quintana, P., Aguilar, D. y Cejudo, R. 2019. IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS CONTAMINADAS CON METALES PESADOS EN EL POLVO URBANO DE LA CIUDAD DE MÉXICO. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(1), 81-100.
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R. y Acevedo-Sandoval, O. 2011. FITORREMEDIACIÓN: UNA

ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14 (2011): 597- 612.

De la Rosa C., N. L., Sánchez-Salinas, E. y Ortiz-Hernández, M. L. 2014. Biosurfactantes y su papel en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Alga* volumen 5(4).

Díaz-Arriaga, F. A. 2014. Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Rev. salud pública*. 16 (6): 947-957. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/rsap.v16n6.45406> Ensayo

Domínguez, M. C., Gómez S., S., y Ardila A, A. N. 2016. Fitorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de la industria minera. *UGCiencia*, 22(1), 227-237.

Falcon E., J. V. 2017. Fitoextracción de metales pesados en suelo contaminado con *Zea mays* L. en la Estación Experimental El Mantaro - Junín en el año 2016.

FRANCISCA, F. M. y CARRO PÉREZ, M. E. 2014. Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 177-190.

FERREIRA DO NASCIMENTO, T. C., SANTOS O., F.J. y PESSOA DE FRANÇA, F. 2013. Biorremediación de un suelo tropical contaminado con residuos aceitosos intemperizados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(1), 21-28.

Gaiolia, M., Amoedo, D. y González, D. 2012. Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. Hospital Nacional de Pediatría "Prof. Dr. Juan P. Garrahan". *Arch. Argent. Pediatr.* 2012;110(3):259-264 / 259.

Gallardo Q., S. A. 2019. Propuesta de Fitorremediación en suelos contaminados con metales pesados mediante la utilización de *Helianthus annuus* L en Camilo Ponce Enríquez, Azuay, Ecuador. Tesis de grado.

- García-Nieto, E., Carrizales-Yañez, L., Juárez-Santacruz, L., García- Gallegos, E., Hernández-Acosta, E., Briones-Corona, E. y Vázquez-Cuecuecha, O. G. 2011. Plomo y arsénico en la subcuenca del Alto Atoyac en Tlaxcala, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(1), 7-17. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.06.040>
- Garzón, J., Rodríguez M. J. y Hernández G. C. 2017. Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad Y Salud*, 19(2), 309-318. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>
- Gasque, S. L. 2013. Arsénico, el elemento inclasificable. *Educación Química*. Volumen 24. Pag. 495-500 [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)72519-9](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(13)72519-9).
- González R., E. H. 2014. Concepto y estrategias de biorremediación. *INGE@UAN - TENDENCIAS EN LA INGENIERÍA*, Vol. 1(2).
- Hernández V. I., Navas, G. y Infante, C. 2017. FITORREMEDIACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO CON PETRÓLEO EXTRA PESADO CON *Megathyrus maximus*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(3), 495-503. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.12>
- Herrera A., V., Carrasco F., C., Sandoval C., P. y Cortés C., C.2017. Transferencia de arsénico en el sistema aguasuelo-maíz de Zea Mays L. cultivados en la quebrada de Camiña, norte de Chile. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(1), 52-64.
- Huamaní-Yupanqui, H. A., Huauya-Rojas, M. Á., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., y Neira-Trujillo, G. M. 2012. Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*, 61(4), 339-344.
- Huaranga M. F., Méndez G. E., Quilcat L. V. y Huaranga, A. F. 2012. Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980 –

2010, La Libertad – Perú. *Scientia Agropecuaria*, 3(3),235-247. ISSN: 2077-9917.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2020. Fitorremediación para suelos sanos y productivos libres de contaminantes.

Jaramillo F., M. C., Zapata O., L. F. y Marulanda L., T. 2015. Fitorremediación de mercurio a partir de *elodea* sp. *Revista Ingenierías USBMed*, ISSN-e 2027-5846, Vol. 6. Núm. 2. págs. 42-45

Landeros-Márquez, O., Tejo-Calzada, R., Reveles-Hernández, M., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Pedroza-Sandoval, A. y Ruíz-Torres, J. 2011. Uso potencial del huizache (*Acacia farnesiana* L. Will) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(spe), 11-20. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.059>

Loch A., B. 2017. Evaluación del uso de *atriplex nummularia* con la aplicación de enmiendas húmicas para la fitoestabilización de relaves mineros.

Londoño F. L. F., Londoño M. P. T. y Muñoz G. F. G. 2016. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)

López-Martínez, S. Gallegos-Martínez, M., Pérez-Flores, L. J. y Gutiérrez-Rojas, M. 2005. MECANISMOS DE FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON MOLÉCULAS ORGÁNICAS XENOBIÓTICAS. *Rev. Int. Contam. Ambient.* Vol. 21 (2) 91-100.

Madera-Parra C.A., Peña-Salamanca E.J., Solarte-Soto J.A. 2014. Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios.

- Mager, D y Hernández-Valencia, I. 2013. Actividad microbiana durante la fitorremediación de un suelo contaminado con un crudo liviano. *Rev. Fac. Agron.* 30: 52-71
- Mahecha-Pulido, J. D., Trujillo- González, J. M. y Torres- Mora, M. A. 2015. Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. Localización: Orinoquía, ISSN-e 0121-3709, Vol. 19, N.º. 1, págs. 118-122.
- MANCILLA-VILLA, Ó. R, ORTEGA-ESCOBAR, H. M., RAMÍREZ-AYALA, C., USCANGA-MORTERA, E., RAMOS-BELLO, R. y REYES-ORTIGOZA, A. L. 2012. Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(1), 39-48.
- Marín V., C. L. 2020. Rizorremediación de suelos agrícolas contaminados con diésel de la zona de Acatzingo, Puebla. Tesis de licenciatura.
- Marrero-Coto, J., Amores-Sánchez, I. y Coto-Pérez, O. 2012. Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 46(3),52-61.
- Martínez-Martínez, S. 2014. Influencia de la fitoestabilización asistida sobre la fertilidad y movilidad de Pb-Zn en un depósito minero del sureste español. Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).
- MARTÍNEZ-PRADO, A., PÉREZ-LÓPEZ, Ma. E., PINTO-ESPINOZA, J., GURROLA-NEVÁREZ, B. A. OSORIO-RODRÍGUEZ, A. L. 2011. Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(3), 241-252.
- Martínez, Z., González, M. S., Paternina, J. y Cantero, M. 2016. Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El Alacrán,

Córdoba-Colombia. *Temas Agrarios*, 22(2), 21-31.  
<https://doi.org/10.21897/rta.v22i2.941>.

Massot, F., Merini, L. J., Rodríguez T., J. y Vangronsveld, J. 2018. Estrategias de rizadorremediación de glifosato en suelos bajo explotación agrícola intensiva.

Medina-Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M. y Torres, C. 2018. Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(1), 93-102.  
<https://dx.doi.org/10.17843/rpmesp.2018.351.3604>.

Munive C. R., Loli F. O., Azabache L. A. y Gamarra S. G. 2018. Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551-560. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.11>

Muñoz C., L. N., Nevárez M., G. V., Ballinas C., M. L y Peralta P., M. R. 2010. FITORREMEDIACIÓN COMO UNA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología Biomédica*.

Mora, A., Jumbo-Flores, D., González-Merizalde, M. y Bermeo-Flores, S. A. 2016. Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río Puyango, Ecuador. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(4), 385-397. <https://doi.org/10.20937/rica.2016.32.04.02>

Nava-Ruíz, C. y Méndez-Armenta, M. 2011. Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurociencia* ;16(3):140-147.

Navazas Á., A. 2014. Bacterias asociadas a *Salix atrocinerea* y respuestas in vitro frente al estrés por As: potencial aplicación en fitorremediación. Tesis de grado, Universidad de Oviedo



- Navoni, J. A., De Pietri, D., García, S. y Villaamil Lepori, E.C. 2012. Riesgo sanitario de la población vulnerable expuesta al arsénico en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Rev. Panam. Salud Publica.* 31(1):1–8.
- Nerio Q., L. y Olivero V. J. 2008. Fitorremediación: una alternativa para mitigar los procesos de contaminación ambiental. Universidad de Cartagena
- Noguez-Inesta, A., López-Sánchez, A.S., Carrillo-González, R, González-Chávez. 2017. USO DE LEGUMINOSAS (FABACEAE) EN FITORREMEDIACIÓN. *Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 4, abril. 2017. pp: 57-62*
- Núñez L. R. A., Vong Y. M., Ortega B. R. y Olgún J. E. 2004. Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Rev. Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias. Biotecnología y biología molecular. ISSN: 1405-6550*
- Ñústez C., D. C., Paredes C., D. y Cubillos V., J. 2014. Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 37(1), 20-28.
- Ordaz, J. A., Martínez Toledo, Á., Ramos Morales, F., Sánchez Díaz, L. F., Martínez, A. J., Tenorio López, J. A. y Cuevas-Díaz, Ma. Del C. 2011. Biorremediación de un suelo contaminado con petróleo mediante el empleo de bagazo de caña con diferentes tamaños de partícula. *Multiciencias*, 11(2),136-145.
- Ortiz-Cano, H. G., Trejo-Calzada, R., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Flores-Hernández, A. y López-Ariza, B. 2009. Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15(2), 161-168.
- Osores P. F., Rojas J. J. E. Manrique, L. E. C. E. 2012. Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública. *Acta Médica Peruana*, 29(1), 38-42.

- Paisio, C. E., González, P. S., Talano, M. A. y Agostini, E. 2012. Remediación biológica de Mercurio: Recientes avances. *Revista latinoamericana de biotecnología ambiental y algal*. Vol. 3 Núm. 2.
- Paredes, J. y Ñique, M. 2016. Optimización de la fitorremediación de mercurio en humedales de flujo continuo empleando *Eichhornia crassipes* "JACINTO DE AGUA". *Investigación y Amazonía* Vol. 5 (1 y 2): 44-49 ISSN 2224-445X 44.
- Paredes M., J. 2015. Evaluación de la aplicabilidad de especies forestales de la serranía peruana en fitorremediación de relaves mineros. *Revista ECIPerú*. Vol. 11 Núm. 2.
- Parra G., F. 2017. RIZOFILTRACIÓN DE AGUAS DE RIEGOAGRÍCOLA CONTAMINADOS POR METALES PESADOS EN COMUNIDADES DEL MUNICIPIO DE ATLIXCO, PUEBLA. Tesis de grado
- Peña R., F. de M. y Beltrán L., M. E. 2012. "Aplicación de la fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados utilizando *Helianthus annuus* L. En la Estación Experimental El Mantaro". *Revista Prospectiva Universitaria*. Vol. 9, Núm. 1.
- Peralta-Pérez, M. del R., & Volke-Sepúlveda, T.L. 2012. La defensa antioxidante en las plantas: Una herramienta clave para la fitorremediación. *Revista mexicana de ingeniería química*, 11(1), 75-88.
- Poma L., V. R. y Valderrama N., A. C. 2014. Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (ii) y mercurio (ii) con la especie *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(3),164-173.
- Raimann, X., Rodríguez O, L., Chávez, P. y Torrejón, C. 2014. Mercurio en pescados y su importancia en la salud. *Revista médica de Chile*, 142(9), 1174-1180. <https://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872014000900012>

- Ramírez, A. V. 2013. Exposición ocupacional y ambiental al arsénico: actualización bibliográfica para investigación científica. *Anales de la Facultad de Medicina*, 74(3), 237-248.
- Rangel M., E. A., Montañez H., L. E., Luévanos E., M. P. y Balagurusamy, N. 2015. Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103-118.
- Reyes, Y.C., Vergara, I., Torres, O.E., Díaz-Lagos, M. y González, E.E. 2016. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16 (2), pp. 66-77.
- Rivera O. P., Rivera L. J. M., Andrade, L. E., Heyer, R. L., Garza, R. F. y Castro M. B. I. 2018. BIOESTIMULACIÓN Y BIORREMEDIACIÓN DE RECORTES DE PERFORACIÓN CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(2), 249-262. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.02.06>
- Rodríguez H., D. 2017. Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21(12),7003-7016.
- Rumaja, S. A. y Huamán, T. J. S. 2017. Evaluación de la capacidad fitorremediadora de las especies vegetales *Nasturtium officinale* W.T Aiton (Berro) e *Hydrocotyle ranunculoides* L. f. (Mateccllo) en relación con la contaminación con mercurio a diferentes concentraciones.
- Segretin, M. E., Bey, P. y Mentaberry, A. N. 2010. Fitorremediación. Editorial: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. ISBN: 987-521-138-9
- SAMANIEGO M., L. 2011. REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ESPECÍFICOS EN ECOSISTEMAS CONSTRUIDOS. Tesis de grado.
- Sepúlveda, B. A., Pavez, O. y Tapia, M. 2012. FITOEXTRACCIÓN DE METALES PESADOS DESDE RELAVES UTILIZANDO PLANTAS DE *Salicornia* sp. 28 (2012) 20-26

- Sun-Kou, M del R., Obregón-Valencia, D., Pinedo-Flores, Á., Paredes-Doig, A. L., y Aylas-Orejón, J. 2014. Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(4), 225-236.
- Tejada, T. C., Villabona, O. A. y Ruíz, R. V. 2012. Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión. *Ingenium*, 6(14), 11-21).
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, A. y Garcés-Jaraba, L. 2015. “Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico”, *Tecno Lógicas*, vol. 18, no. 34, pp. 109-123.
- Tello Z., W., Salvatierra, L. M., Pérez, L. M. 2015. Evaluación de los mecanismos de eliminación de Pb<sup>2+</sup> en sistemas de fitorremediación en lotes operados con *Salvinia biloba raddi* (acordeón de agua). *Energeia*, 13(13).
- Trujillo T. M. A. y Ramírez Q. J. F. 2012. Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*. Vol. 3 Núm. 2. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.952>
- Valencia, P. E. M. y Flórez, S. V. K. 2020. Evaluación in vitro de *Eichhornia crassipes* como alternativa para el tratamiento de las aguas residuales en una planta de beneficio de minería de oro en Suárez – Cauca.
- Vargas P., C. M., Oviedo S, A., Montañez V., M. N. y Polania P., A. 2018. Estado del arte; del uso de la *Eichhornia crassipes* en la fitorremediación de aguas residuales industriales ISSN-e 2422-2399, ISSN 2145-9282, Vol. 9 (2).
- Velásquez A., J. A. 2017. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. Vol. 8(1).
- Vera, L., Uguña, M. F., García, N., Flores, M. y Vázquez, V. 2015. Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. Centro de Estudios Ambientales de la Universidad de Cuenca, Ecuador.

- Vidal, D. J. V., Marrugo, N. J. L., Jaramillo, C. B. y Perez C. L. M. 2010. Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Ingeniería y Desarrollo*, (27), 113-129.
- Villaamil Lepori, E. C. 2015. Hidroarsenicismo crónico regional endémico en Argentina. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 49(1),83-104. ISSN: 0325-2957.
- Yaima B., Sn. M. 2011. Biorremediación: una herramienta para el saneamiento de ecosistemas marinos contaminados con petróleo Centro de Investigación del Petróleo, CEINPET. *Biología Aplicada*; 28:60-68.
- Zornoza, R., Faz, Á., Martínez-Martínez, S., Acosta, J. A., Gómez-López, M. D., Muñoz, M. A., Sánchez-Medrano, R., Murcia, R. F., Fernández Cortés, F. G., López Martínez, E. y Espín de Gea, A. 2017. Rehabilitación de una presa de residuos mineros mediante la aplicación de lodo de mármol y purín de cerdo para el desarrollo de una fitoestabilización asistida. *Boletín Geológico y Minero*, 128 (2): 421-435 ISSN: 0366-0176 DOI: 10.21701/bolgeomin.128.2.010