

**ESTUDIO SOBRE CAPTURA EFICIENTE DE METALES PESADOS EMPLEANDO
PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN.**



**MARLON JONATHAN INSUASTY MANRIQUE
CÓDIGO 91.018.546**

Monografía de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

**DIRECTORA:
JANETH BIBIANA GARCÍA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA UNAD
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE
INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2017**

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi esposa, por darme su respaldo incondicional, el tiempo y la confianza necesaria para desarrollar con este éxito este trabajo de grado.

A mis padres, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me han infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mis amigos, que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos, y por haberme ayudado a realizar este trabajo.

MARLON JONATHAN INSUASTY MANRIQUE

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi apoyo y la mano que me guía en el camino de la sabiduría.

Mi más sincero agradecimiento para la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, por permitirme desarrollar mis estudios de Pregrado y enriquecer mis conocimientos.

A mi tutor por brindarme su orientación, apoyo, y de esta manera, permitirme llevar un feliz término este trabajo de grado.

Y por último a mis padres, que siempre ha sido un modelo a seguir y me enseñado que ningún logro en la vida es importante sino se consigue con esfuerzo y dedicación.

Muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
3. JUSTIFICACIÓN	3
4. OBJETIVOS	4
4.1 OBJETIVO GENERAL.	4
4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
5. MARCO REFERENCIAL	5
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	5
5.2 MARCO TEÓRICO.....	6
5.2.1 <i>Los Metales pesados</i>	6
5.2.2 <i>Contaminación por metales pesados en Colombia</i>	7
5.2.3 <i>Contaminación del suelo por metales pesados</i>	7
5.2.3.1 FUENTES DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS.....	7
5.2.3.2 Dinámicas de los contaminantes en el suelo.	8
5.2.3.3 Factores que afectan a la disponibilidad de los metales.....	8
5.2.3.4 Comportamiento de los metales en el sistema suelo-planta.	9
5.2.3.5 Efectos desfavorables de la contaminación.....	9
5.2.4 <i>Contaminación del agua por metales pesados</i>	10
5.2.4.1 Formas de contaminación del agua por metales pesados en el agua.....	10
5.2.4.2 Algunos de los metales pesados que contaminan el agua.	10
6 DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	12
6.1 DESARROLLO DE OBJETIVOS.	12
6.1.1 <i>Etapa 1. Identificar los tipos de contaminación con metales pesados y sus causas, para los recursos agua y suelo</i>	12
6.1.2 <i>Etapa 2. Describir los mecanismos de biorremediación para el tratamiento del recurso suelo y agua, contaminados</i>	12
6.1.3 <i>Etapa 3. Determinar los procesos de biorremediación aplicados a la captación de metales pesados, y su incidencia en los recursos agua y suelo</i>	12
7. RESULTADOS	13
7.1 ETAPA 1. IDENTIFICAR LOS TIPOS DE CONTAMINACIÓN CON METALES PESADOS Y SUS CAUSAS, PARA LOS RECURSOS AGUA Y SUELO.	13
7.1.1 <i>Metales pesados</i>	13
7.1.1.1 Relación metales pesados - seres vivos.....	13
7.1.1.2 Contaminación con metales pesados.....	13

7.1.2 Fuentes de emisión que generan contaminación en el recurso agua y suelo, con metales pesados.....	14
7.1.2.1 Grandes instalaciones de combustión.....	14
7.1.2.2 Instalaciones de fabricación de cemento.....	14
7.1.2.3 Incineración y co-incineración.....	15
7.1.2.4 La minería y sus efectos.....	17
7.1.2.5 La actividad agrícola.....	18
7.1.2.5 Los lodos residuales.....	19
7.1.2.6 Residuos domésticos (pilas y baterías).....	20
7.2 ETAPA 2. DESCRIBIR LOS MECANISMOS DE BIORREMEDIACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DEL RECURSO SUELO Y AGUA, CONTAMINADOS.....	21
7.2.1 Técnicas de contención.....	21
7.2.2 Técnicas de confinamiento.....	23
7.2.3 Técnicas de descontaminación.....	25
7.2.3.1 Tratamientos físico-químicos.....	25
7.2.4 Intercambio iónico.....	27
7.2.4.1 Remoción y eficiencia.....	27
7.2.4.2 Ventajas.....	27
7.2.4.3 Desventajas.....	27
7.2.5 Ósmosis inversa.....	27
7.3 ETAPA 3. DETERMINAR LOS PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN APLICADOS A LA CAPTACIÓN DE METALES PESADOS, Y SU INCIDENCIA EN LOS RECURSOS AGUA Y SUELO.....	29
7.3.1 <i>Pasto vetiver para la recuperación de aguas contaminadas con metales pesados</i>	29
7.3.1.1 Nombres.....	29
7.3.1.2 Características generales del pasto vetiver.....	29
7.3.1.3 Ventajas del uso de Vetiver.....	30
7.3.1.4 Tratamiento de Aguas Residuales con Tecnología Pasto Vetiver.....	31
7.3.2 <i>Pasto vetiver para la recuperación de suelos</i>	32
7.3.3 <i>El girasol amarillo (Helianthus annuus), en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados</i>	35
7.3.3.1 Requerimientos Edafoclimáticos.....	35
7.3.3.2 Particularidades del cultivo.....	36
7.3.3.3 Características favorables del girasol amarillo como planta fitorremediadora.....	36
7.3.4 <i>Las microalgas en la recuperación de aguas contaminadas con metales pesados</i>	37
7.3.4.1 Generalidades.....	37
7.3.4.2 Antecedentes.....	38
7.3.4.3 Tipos de sistemas de tratamiento con microalgas.....	38
7.3.4.4 Microalgas comunes en lagunas de estabilización.....	39
7.3.4.5 Biorremoción de metales pesados con microalgas.....	40
7.3.4.6 Adaptaciones de las microalgas a los efluentes con metales pesados.....	40
7.3.4.7 Mecanismos de tolerancia de las microalgas a los efluentes con metales.....	41
7.3.5 <i>bacterias utilizadas en el proceso de remoción de metales pesados en suelos y aguas</i>	41
7.3.5.1 Impacto ambiental de los metales pesados sobre el medio.....	41
7.3.5.2 Las bacterias y sus procesos para remoción de metales pesados.....	42

7.3.6 <i>Tratamientos biológicos</i>	44
8. CONCLUSIONES	46
9. RECOMENDACIONES	48
10. BIBLIOGRAFIA	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dinámica de los metales pesados en el suelo.	8
Figura 2. Fotografía metal pesado: plomo.	11
Figura 3. Fotografía metal pesado: mercurio.	11
Figura 4. Fotografía metal pesado: cadmio.	11
Figura 5. Instalaciones de combustión.	14
Figura 6. Planta de producción fabricación de cemento.	15
Figura 7. Planta de incineración y coincineración.	16
Figura 8. Agua contaminada con metales pesados.	17
Figura 9. Plagas de insectos a tratar con plaguicidas e insecticidas.	18
Figura 10. Lodos contaminados con metales pesados.	19
Figura 11. Proceso de lavado de suelo.	26
Figura 12. Proceso de inyección de aire comprimido.	26
Figura 13. Osmosis inversa.	28
Figura 14. Pasto vetiver.	29
Figura 15. Fenología de la planta de girasol amarillo.	36
Figura 16. Sistema de absorción de metales pesados mediante microalgas.	38
Figura 17. Enzimas microbianas utilizadas para el proceso de biotransformación.	43
Figura 18. Esquema de biorrecuperación asistida.	45

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales técnicas de recuperación de suelos.....	22
Tabla 2. Tipos de contaminantes tratados en la recuperación de los recursos suelo y aguas.....	24
Tabla 3. Comportamiento de vetiver en suelos con alta carga de metales pesados.	32
Tabla 4. Concentraciones de metales pesados acumulados en vetiver.	33
Tabla 5. Microalgas comunes en lagunas de estabilización.....	39
Tabla 6. Empleo de microalgas producidas en el tratamiento de aguas residuales.....	40

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de elementos bióticos del ecosistema, actualmente conocido como procesos de biorremediación, están enfocados a la recuperación de los recursos naturales para evitar su deterioro, es una técnica que está siendo muy utilizada hoy en día, por ello, la presente monografía consiste en realizar un estudio teórico sobre captura eficiente de metales pesados empleando procesos de biorremediación.

La metodología utilizada en esta investigación fue estructurada en el desarrollo de fases donde en la primera de ellas se identificaron los distintos componentes del medio natural, tales como suelo y agua tanto superficial como subterránea, que se ven afectadas con la depositación de metales contaminantes, en segundo se trataran las causas que originan la contaminación, seguido de la descripción de las distintas fuentes y tipos de contaminantes para terminar con una amplia descripción de los procesos y condiciones técnicas para los procesos de biorremediación y su aplicación a la captación de metales pesados.

El principal aporte de este estudio, es ahondar en el conocimiento que se tiene sobre los tratamientos biológicos y la contaminación generada por metales pesados, así ayudando a la minimización de las cargas contaminantes presentes en los cuerpos hídricos y suelos, contribuyendo así en la eliminación de diversos parámetros químicos entre ellos metales pesados y proporcionando una adición valiosa de recuperación al espacio natural.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los problemas ambientales más alarmantes a nivel global en la actualidad, es la contaminación de ecosistemas acuáticos ocasionada por actividades antrópicas industriales, que necesitan para el desarrollo de sus procesos el preciado líquido y generan una serie de vertimientos que no son tratados adecuadamente, y que tienen contacto con diversas sustancias químicas como metales pesados, lo cual ocasiona un desequilibrio y gran deterioro de la riqueza faunística y florística que en estos ambientes naturales se desarrolla.

A través de la revisión bibliográfica realizada, sobre las técnicas de biorremediación para aguas, suelos y mediante el análisis de involucrados, se pudo determinar las causas ambientales y antropogénicas más relevantes. Como la ausencia de procesos industriales limpios, la carencia de una cultura ambiental, la falta de control permanente por parte de las autoridades ambientales, la disposición indebida de residuos sólidos, de vertimientos y la actividad minera son algunas de las actividades que generan un alto grado de contaminación, aportado por empresas y viviendas cercanas. Lo cual ocasiona sobreexplotación y alteración de las condiciones naturales de estos recursos naturales, para lo cual es necesario tomar medidas de tipo técnico, legal y ambiental, que permitan generar un desarrollo sustentable

Los efectos que se generan los metales pesados en los recursos, al no ejecutarse medidas correctivas a esta problemática ambiental negativa, son los siguientes: disminución de los caudales hídricos, pérdida de la calidad del agua, cambios en la morfología de las microcuencas, pérdida de la biodiversidad, eliminación de cobertura vegetal nativa, desaparición de la fauna, desequilibrio, la progresiva y excesiva contaminación puede producir desertificación y problemas sociales entre las comunidades aledañas a estos medios acuáticos. De igual forma el poco seguimiento que se realiza por parte de las autoridades ambientales a este tipo de contaminación.

Al percibir esta problemática, existe una preocupación colectiva y se genera una pregunta concreta para esta investigación la cual es:

¿Cuáles son las técnicas más efectivas en el proceso de biorremediación, capaces de eliminar el exceso de metales pesados en las fuentes hídricas y en el suelo?

3. JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas el desarrollo de procesos industriales ha generado a mayor escala, la relación de este ciclo económico con los recursos naturales, identificándose dentro de sus causas y consecuencias, la alteración de las condiciones naturales de los recursos y la ausencia de alternativas para el tratamiento del agua y suelo, los cuales se ven afectados en mayor proporción.

Plantear alternativas para el tratamiento de las aguas residuales y los suelos contaminados con metales pesados, no es fácil debido al desarrollo de diferentes actividades industriales, por lo cual se deben evaluar una serie de variables tanto teóricas, técnicas y económicas para definir finalmente la mejor alternativa a implementar, que a su vez sea ambientalmente sostenible.

Por tal motivo se argumenta la necesidad y conveniencia, de efectuar la búsqueda de diferentes técnicas de biorremediación para el tratamiento de aguas y suelos contaminados por metales pesados. Teniendo como referente la documentación de un procedimiento base, que permita conocer las etapas de biorremediación y donde se busca de manera urgente la identificación de los métodos más adecuados para la mitigación de las causas que generan dicha problemática ambiental.

El desarrollo de esta evaluación analítica ambiental, permite la identificación e inclusión de sistemas de tratamiento, que promuevan el cuidado de los recursos agua y suelo para contrarrestar los efectos causados por la contaminación. Todo ello dignificando la calidad de vida de la comunidad y mejorando el estado del entorno natural.

Esta monografía genera un aporte al desarrollo investigativo, en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, a partir de una revisión documental, para la identificación de los impactos ambientales generados por actividades antrópicas industriales, que utilizan en sus procesos metales pesados los cuales son descargados en el recurso agua y suelo, puesto que a su vez permitirá conocer cuáles son las técnicas de biorremediación aplicables y más utilizadas en la disminución del exceso de metales pesados en las fuentes hídricas y en la capa del subsuelo.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL.

- Realizar un estudio teórico sobre captura eficiente de metales pesados empleando procesos de biorremediación.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Identificar los tipos de contaminación con metales pesados y sus causas, para los recursos agua y suelo.
- Describir los mecanismos de biorremediación para el tratamiento del recurso suelo y agua, contaminados.
- Determinar los procesos de biorremediación aplicados a la captura de metales pesados, y su incidencia en el tratamiento de los recursos agua y suelo.

5. MARCO REFERENCIAL.

5.1 MARCO CONCEPTUAL.

- **Aerobio.** Proceso bioquímico o condición ambiental que sucede en presencia de oxígeno. (CORPOURABA, s.f.)
- **Agua residual.** Se consideran Aguas Residuales a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias, tanto domésticas, comerciales, industriales y de servicios. (Cuido el agua, Org., 2009).
- **Algas.** Son organismos acuáticos que van desde seres microscópicos unicelulares hasta organismos multicelulares que forman grandes colonias muy grandes y vistosas. Aportan gran parte de oxígeno al planeta. Tienen células con núcleo (Eucariontes) y se excluyen las algas-verde azules pertenecientes al reino de las bacterias. (Woese et al. 1990).
- **Análisis físico químico de aguas residuales.** Es el proceso mediante el cual se determinan las características físicas y químicas de una muestra de agua, la cual ha sido recolectada de manera técnica cumpliendo con los estándares de seguridad y calidad de las normativas vigentes en el país. (CORPOURABA, s.f.)
- **Antrópico.** De origen humano, humanizado, opuesto a lo natural. (CORPOURABA, s.f.)
- **Biodiversidad.** Se entiende como la variabilidad de los organismos vivos de cualquier fuente, y la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y los complejos ecológicos que forman parte. (CORPOURABA, s.f.)
- **Biorremediación.** Es un proceso que utiliza microorganismos, hongos, plantas o enzimas derivadas de ellos para retornar a un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural. Puede ser usada para contrarrestar los contaminantes específicos en el suelo, un ejemplo de ello es la degradación bacteriana de compuestos como los hidrocarburos (CORPOURABA, s.f.)
- **Contaminantes antropogénicos.** Producidos por la acción del hombre en diferentes procesos. (CORPOURABA, s.f.)
- **Hidropónico.** Es un método de cultivo industrial de plantas que utiliza únicamente soluciones acuosas, nutrientes disueltas y sustratos estériles como la arena, grava entre otros para ser soporte de la raíz de las plantas. (Beltrano & Gimenez, s.f.).

- **Hiperacumuladora.** Es una planta capaz de crecer en suelos con grandes concentraciones de metales pesados, concentraciones que resultan tóxicas incluso para especies cercanamente emparentadas a la misma. Estas plantas extraen el metal del suelo a través de sus raíces y lo concentran hasta niveles extremadamente altos en sus tejidos. (Rascio & Navari-Izzo, 2011).
- **Macrófita.** Especie vegetal capaz de adaptarse y desarrollarse en medios acuáticos. Pueden vivir en áreas inundadas de forma flotante, sumergida o emergente. La utilización de macrófitas son utilizadas como un tratamiento secundario o terciario alternativo para las aguas por su eficiencia en la remoción de las diferentes sustancias químicas incluyendo los metales pesados. (Abigail, 2014).
- **Retención de nutrientes.** Los nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, son retenidos por las plantas y los sedimentos de los humedales, mejorando la calidad del agua. Los nitratos pueden ser reconvertidos en nitrógeno gaseoso y reintroducidos en la atmósfera como resultado de la desnitrificación. (Camargo, 2006)
- **Tratamiento de aguas residuales.** Proceso de mejora por el cual se transforma las aguas residuales crudas con tratamientos biológicos, bioquímicos y medios físicos para minimizar las concentraciones de contaminantes a los niveles máximos permisibles por la normatividad legal y el ministerio del medio ambiente, se dividen en tratamiento primario, secundario y terciario. (Cuido el agua, Org., 2009).

5.2 MARCO TEÓRICO.

5.2.1 Los Metales pesados.

“Se refiere a aquellos metales de la tabla periódica cuyo peso específico es superior a 5 g/cm³ o que tienen un número atómico por encima de 20, excluyendo generalmente a los metales alcalinos y elementos alcalinotérreos”. (Breckle, 1991, Tiller, 1989; citado en Lázaro, 2008).

Se presentan en el suelo en diferentes formas de retención para los elementos (capacidad de ciertos componentes del suelo para captar partículas e incorporarlas a su estructura) y disponibilidad, algunas de ellas son: solubles en la solución del suelo, iones intercambiables de los coloides, formando complejos con la materia orgánica, adsorbidos en los óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al, sulfuros y fosfatos y como constituyentes de los minerales del suelo.

Las fuentes naturales más significativas de metales pesados derivan de los procesos de erosión del sustrato rocoso y de las erupciones volcánicas, pero su contribución es insignificante si comparamos estas fuentes con las diversas acciones antropogénicas. De acuerdo a la Unión

Europea las cinco actividades que generan mayor contaminación por metales pesados son: la industria (accidentes, vertidos, escapes o fugas, deposición de residuos), actividades mineras (drenajes ácidos), procesamiento de residuos (residuos municipales), tráfico (emisión de gases), otras actividades (construcción, agricultura, gasolineras) (Van-Camp et al, 2004).

5.2.2 Contaminación por metales pesados en Colombia.

En los últimos años los diferentes estudios de calidad del recurso agua en los ríos, lagos, embalses, etc, cobra gran importancia en el reconocimiento de la toxicidad de los metales pesados, por las diferentes actividades que han influido directa e indirectamente en el recurso, como el notable crecimiento de la población en sus riberas, el aumento de industrialización, los aportes de los sectores agrícolas, ganaderos y mineros. *Reyes et al (2016), afirma que “Sus efectos no se detectan fácilmente a corto plazo puesto que la toxicidad de estos metales pesados es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos”.* (P. 71).

Durante el año 2013 en el país, se realizaron 169 muestreos de cadmio, 180 muestreos de cromo y plomo y 104 muestreos de mercurio (IDEAM, 2014). De acuerdo a los valores de concentración arrojados en los diferentes monitoreos los metales pesados más destacados son: el Mercurio (Hg) más elevado se encuentran en los ríos Marmato, Nechí, Magdalena, Guachal y río Coello, con respecto al Cadmio (Cd) las mayores concentraciones se identificaron en los ríos Negro, Bogotá y Cararé, el Plomo (Pb) se presentan en los ríos Marmato, Bogotá, Cauca la Pintada, Achi y Pinillos. (Reyes et al 2016).

Los vertimientos que se realizan en las fuentes hídricas en diferentes concentraciones de metales pesados (Hg, As, cd y Pb), afectan la población aledaña de las riberas del río, puesto que al utilizar el recurso para el riego de los cultivos, promueve que los metales lleguen a los suelos y plantas usadas para el consumo humano como la lechuga y el brócoli. (Miranda et al., 2011).

5.2.3 Contaminación del suelo por metales pesados.

5.2.3.1 Fuentes de contaminación por metales pesados.

En la contaminación por metales pesados en los suelos se pueden distinguir dos fuentes de acuerdo a su origen: una que se produce en la naturaleza denominada endógena y la segunda por los aportes externos que realizan las actividades antropogénicas, denominada contaminación exógena.

Algunas actividades que contribuyen a la contaminación del suelo por aporte directo, son las tareas realizadas en la agricultura por el uso inadecuado de fertilizantes y productos fitosanitarios, el vertimiento de los residuos sólidos que se generan y los vertimientos de las industrias son las fuentes más representativas para la contaminación por los metales.

5.2.3.2 Dinámicas de los contaminantes en el suelo.

El suelo es un medio receptor de multitud de sustancias potencialmente contaminantes, convirtiéndose en una estación de tránsito, donde se retienen por grandes periodos de tiempo, esta condición puede ayudar a que el contaminante sea degradado o se vuelva móvil y llegue a otros medios.

A continuación se muestra un diagrama con la dinámica de los contaminantes en el suelo:

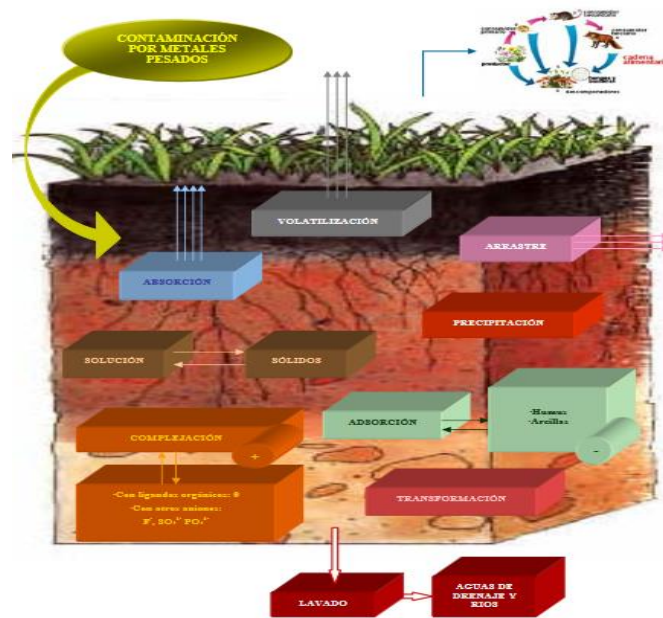


Figura 1. Dinámica de los metales pesados en el suelo.

Fuente. Modificado de García & Dorransoro, (2005), citado de: Solano, (2005).

5.2.3.3 Factores que afectan a la disponibilidad de los metales.

A continuación se enumera los diferentes parámetros más importantes en la disponibilidad de los metales pesados:

- **pH.** “Es el parámetro principal de control en la disponibilidad de los metales para las plantas, debido a que la mayor parte de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, ya que al producirse un descenso se mejora la solubilidad de los metales y su absorción por las raíces de las plantas”.

- **Textura.** La textura fina es la fuente principal de los metales pesados, por lo cual sus características son fácilmente alteradas por la contaminación. Caso contrario a los suelos de textura gruesa que presentan un bajo contenido en metales pesados.
- **Condiciones de óxido-reducción.** Muchos metales forman sulfuros relativamente insolubles en condiciones fuertemente reductoras. Algunos de ellos son el Cd, Zn, Ni, Co, Cu y Pb, mientras que metales como el Fe y Mn pueden volverse más solubles en estas condiciones de óxido-reducción.
- **Materia orgánica.** Este parámetro presenta una elevada afinidad por ciertos metales (Co, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn), reaccionando con ellos e influyendo en su disponibilidad dentro del suelo.
- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).** Controla la disponibilidad de los metales del suelo, un incremento en la CIC produce un aumento en el tiempo en que estos metales se encuentran disponibles para las plantas dado que aumenta la capacidad del suelo de fijar metales.

5.2.3.4 Comportamiento de los metales en el sistema suelo-planta.

“El sistema suelo-planta se considera un sistema abierto, que se encuentra sujeto a aportes, tales como contaminantes, fertilizantes y pesticidas” (Ortiz et al., 2007). Donde los metales pesados son añadidos por las plantas desde el suelo a través de las raíces y parámetros como el tipo de suelo, la temperatura, pH, aireación, condiciones redox y fertilización contribuyen a la absorción del mismo, desplazándose por todo el interior de la planta y disminuyendo su nivel en el siguiente orden: Cd>B>Zn>Cu>Pb.

“Una vez incorporados en el suelo los metales pesados siguen cuatro vías, dentro de sus procesos físicos, químicos y biológicos:

- *Quedar retenidos en la solución del suelo o bien, fijados por adsorción, complejación y/o precipitación.*
- *Ser absorbidos por las plantas e incorporarse a las cadenas tróficas.*
- *Pasar a la atmósfera por volatilización.*
- *Movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas”.* (Ortiz et al., 2007).

5.2.3.5 Efectos desfavorables de la contaminación.

La contaminación provoca efectos negativos sobre los recursos naturales actuando de forma directa o indirectamente sobre el medio ambiente. A continuación, se describen diferentes efectos:

Efectos directos sobre los suelos.

- Destrucción del poder de autodepuración por procesos de regeneración biológica normales, al haberse superado la capacidad de aceptación del suelo.
- Disminución cualitativa y cuantitativa del crecimiento normal de las poblaciones de microorganismos y la fauna del suelo.
- Disminución del rendimiento de las cosechas y cambios en su composición, aumentando el riesgo de la salud.

Efectos indirectos sobre los suelos.

- Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia. Se alcanzan concentraciones superiores a las consideradas aceptables.
- Cambios en las propiedades físico-químicas de los diferentes recursos.
- Reducción de la fertilidad del suelo, al disminuir la flora y fauna del mismo, modificando su estructura.

5.2.4 Contaminación del agua por metales pesados.

5.2.4.1 Formas de contaminación del agua por metales pesados en el agua.

Una de las actividades principales que contribuyen a la contaminación del agua se debe principalmente al sector industrial, agropecuario y minero, al igual que los vertimientos de aguas residuales domésticas. Se puede también presentar un enriquecimiento de forma natural por metales pesados al pasar el agua por rocas que los contienen en su composición. (Metales Pesados, s.f.)

5.2.4.2 Algunos de los metales pesados que contaminan el agua.

❖ **Plomo.** Es un metal muy blando, antiguamente fue utilizado en las tuberías, drenajes y materiales de soldadura. Cada año, la industria produce alrededor de 2.5 millones de toneladas de residuos de plomo. (GWC, 2017)



Figura 2. Fotografía metal pesado: plomo.
Fuente. GWC, 2017

❖ **Mercurio.** “Se genera de forma natural en el medio ambiente de la desgasificación de la corteza terrestre y las emisiones volcánicas. Existe en tres formas: mercurio elemental, mercurio orgánico e inorgánico”. (GWC, 2017)



Figura 3. Fotografía metal pesado: mercurio.
Fuente. GWC, 2017

❖ **Cadmio.** Es un subproducto en la minería y la fundición de plomo y zinc. Llega al recurso agua por la fabricación de las tuberías (tubos y conexiones galvanizadas). (GWC, 2017)



Figura 4. Fotografía metal pesado: cadmio.
Fuente. (GWC, 2017)

6. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.

6.1 DESARROLLO DE OBJETIVOS.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, se definió el siguiente plan de trabajo que se describe a continuación:

6.1.1 Etapa 1. Identificar los tipos de contaminación con metales pesados y sus causas, para los recursos agua y suelo.

En esta primera etapa se realiza una identificación de los tipos de contaminación de los metales pesados por medio de un diagnóstico, con el fin de conocer la situación actual en el país, las causas que lo originan en los recursos agua y suelo.

6.1.2 Etapa 2. Describir los mecanismos de biorremediación para el tratamiento del recurso suelo y agua, contaminados.

Se realizó una investigación documental a fondo, con respecto a los mecanismos de biorremediación para el tratamiento del recurso suelo y agua, dentro de una perspectiva general de estudio. Donde se describieron las metodologías utilizadas desde la implementación de procedimientos químicos, físicos o biológicos para tal fin.

6.1.3 Etapa 3. Determinar los procesos de biorremediación aplicados a la captación de metales pesados, y su incidencia en los recursos agua y suelo.

Debido al análisis que se realizó, para la búsqueda de documentación en relación a los mecanismos de biorremediación, para el del recurso suelo y agua, se procedió a indagar y determinar mediante referenciación bibliográfica más específica, los procesos de biorremediación aplicados a la captación de metales pesados, y su incidencia en los recursos agua y suelo.

7. RESULTADOS.

7.1 Etapa 1. Identificar los tipos de contaminación con metales pesados y sus causas, para los recursos agua y suelo.

Antes de identificar y nombrar los tipos de contaminación con metales pesados, se definirá los términos de mayor importancia para esta monografía.

7.1.1 Metales pesados.

“Se refiere a aquellos metales de la tabla periódica cuyo peso específico es superior a 5 g/cm³ o que tienen un número atómico por encima de 20, excluyendo generalmente a los metales alcalinos y elementos alcalinotérreos”. (Breckle, 1991, Tiller, 1989; citado en Lázaro, 2008).

7.1.1.1 Relación metales pesados - seres vivos.

Los organismos vivos requieren diferentes metales pesados en pequeñas cantidades, para el funcionamiento diario, entre los cuales se encuentran: el hierro, cobalto, cobre, manganeso, molibdeno, y zinc. Un aumento excesivo en estas cantidades puede dañar el organismo, mientras que metales como el mercurio, plutonio, y plomo son tóxicos que generan un efecto negativo en el organismo, de acuerdo a su concentración y el tiempo de exposición en el cuerpo de los seres humanos como de los animales causan serios problemas en la salud, generando enfermedades y provocando la muerte. (Zevenhoven & Kilpinen, 2001).

7.1.1.2 Contaminación con metales pesados.

De acuerdo a la Unión Europea, los once elementos más relevantes son: arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, manganeso, níquel, plomo, estaño y talio. Los cuales son peligrosos para el medio ambiente y la salud de los humanos y animales siendo altamente tóxicos o corrosivos. La contaminación con metales pesados puede surgir de diferentes fuentes, pero más comúnmente de la purificación de metales. Mediante la precipitación de estos compuestos o el intercambio de iones hacia los suelos, los metales pesados se pueden localizar y quedar depositados. En la Actualidad, se utilizan plantas para realizar el proceso de fitorremediación y microorganismos para remover metales pesados, como el mercurio. (Zevenhoven & Kilpinen, 2001).

7.1.2 Fuentes de emisión que generan contaminación en el recurso agua y suelo, con metales pesados.

Se tendrá en cuenta para la contaminación del recurso agua y suelo por metales pesados, la intrínseca relación y la facilidad en el medio de transporte que estos dos poseen, ya sea por escorrentía, infiltración, o por la unión de las moléculas de agua con las partículas metálicas presentes en el aire.

7.1.2.1 Grandes instalaciones de combustión.

La instalación de combustión es una estructura técnica, diseñada con el fin de producir calor a partir de productos combustibles, los cuales se queman generalmente con aire como fuente de oxígeno. Algunos combustibles fósiles utilizados son: el carbono (C), el hidrógeno (H₂) y, en menor medida el azufre (S). Como producto de este proceso se obtienen el dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O) y dióxido de azufre (SO₂), entre otros contaminantes como el NO_x, CO, partículas, metales pesados, etc. Que son emisiones contaminantes introducidas en la atmósfera por el proceso de combustión, algunos de ellos conocidos como gases de efecto invernadero (Ministerio de agricultura y pesa, alimentación y medio ambiente, s.f.), en la figura 6 se muestra una planta de combustión.



Figura 5. Instalaciones de combustión.

Fuente. Ministerio de agricultura y pesa, alimentación y medio ambiente, s.f

7.1.2.2 Instalaciones de fabricación de cemento.

Estas instalaciones tienen el propósito la producción de clinker y cemento, uno necesario para la obtención del otro. En sus operaciones de obtención se utilizan materias primas como la caliza, margas, arcilla y arena, además de correctores de crudo (mineral de hierro y cenizas). Esta actividad es una de las grandes consumidoras de energía al igual que de las emisiones al aire de contaminantes procedentes de los hornos, algunos compuestos emitidos son los óxidos de

nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO₂) y, en menor medida, compuestos orgánicos volátiles (COV), metales y sus derivados, ácido fluorhídrico (HF) y clorhídrico (HCl), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y partículas (polvo). (Ministerio de agricultura y pesa, alimentación y medio ambiente, s.f.)



Figura 6. Planta de producción fabricación de cemento.

Fuente. Ministerio de agricultura y pesa, alimentación y medio ambiente, s.f.

Además de las emisiones procedentes de los hornos, se incluyen otras emisiones producidas por los demás procesos en este tipo de instalaciones, donde un gran porcentaje lo encabezan las emisiones de partículas emitidas por diferentes focos en toda la instalación, a continuación se nombran dos posibles focos de emisión:

- Focos principales estacionarios: destacan el enfriador del horno, los molinos de carbón y de cemento y los separadores de los molinos.
- Focos de contaminación difusa: como el parque de almacenamiento de materias primas, apilamiento a la intemperie, manipulación de estos materiales en el exterior, molienda de materias primas, operaciones de carga y descarga de los materiales y transporte (circulación de maquinaria pesada en el recinto de fábrica). (Ministerio de agricultura y pesa, alimentación y medio ambiente, s.f.)

7.1.2.3 Incineración y coincineración.

El tratamiento térmico de residuos es una respuesta a la problemática ambiental que se está presentando por la mala gestión que se ha implementado para el manejo de los residuos, este tratamiento tiene como objetivo proporcionar una reducción global en el impacto ambiental que se genera por las actividades antrópicas. De igual forma este tipo de proceso de incineración genera emisiones que de acuerdo a su diseño se podrá capturar o se liberar a la atmosfera.

El Ministerio de agricultura y pesa, alimentación y medio ambiente, (s.f.) de España define como:

“Instalación de incineración: cualquier unidad técnica o equipo, fijo o móvil, dedicado al tratamiento térmico de residuos con o sin recuperación del calor producido por la combustión”, de igual forma define como instalación de coincineración a “toda instalación fija o móvil cuya finalidad principal sea la generación de energía o la fabricación de productos materiales y que utilice residuos como combustible habitual o complementario, o bien los residuos reciban en ella tratamiento térmico para su eliminación mediante la incineración por oxidación de los residuos, así como por otros procesos de tratamiento térmico tales como pirólisis, gasificación y proceso de plasma”. ” (El Ministerio de agricultura y pesa, alimentación y medio ambiente, s.f.)



Figura 7. Planta de incineración y coincineración.

Fuente. Ministerio de agricultura y pesa, alimentación y medio ambiente, s.f

El ministerio de España presenta una serie sustancias contaminantes como resultado de las fuentes principales de emisión a la atmosfera producido por las chimeneas de las instalaciones de incineración:

- Partículas de diversos tamaños.
- Ácidos y otros gases: incluye HCl, HF, HBr, HI, SO₂, NO_X, NH₃, entre otros.
- Metales pesados: incluye Hg, Cd, Tl, As, Ni, Pb, entre otros.
- Compuestos de carbono (no GHG): incluye CO, hidrocarburos (COV), PCDD/F, PCB, entre otros.

Otras emisiones a la atmósfera pueden ser, si no existen medidas para su reducción:

- Olor: del manejo y almacenamiento de residuos sin tratar.
- Gases de efecto invernadero (GHG): de la descomposición de residuos almacenados. Por ejemplo: metano, CO₂.
- Polvo: de las zonas de manejo de reactivos secos y almacenaje de residuos

7.1.2.4 La minería y sus efectos

La minería y/o los procesos de extracción, transporte y procesamiento de minerales, producen impactos ambientales significativos en el ecosistema, que difícilmente se pueden reparar con el tiempo puesto que sus efectos han perdurado mucho más allá que la operación de los mismos (Cepeda, 2011). De acuerdo a esto se destacan dos operaciones en la minería, las cuales son:

- Operaciones en la superficie y subterráneas, para la producción de minerales metálicos, no metálicos e industriales, materiales de construcción y fertilizantes.
- Extracción in situ de los minerales fundibles o solubles (notablemente, azufre y más recientemente, cobre), dragado y extracción hidráulica, junto a los ríos y aguas costaneras, lixiviación de las pilas de desechos en las minas (principalmente oro y cobre).

Para el desarrollo de esta actividad se requiere de grandes equipos y de quien pueda transportar los materiales dentro del área de la mina a la planta de procesamiento, como camiones, cuchillas, palas, dragas, ruedas de cangilones y rapadoras, bandas, poliductos o rieles. Entre otro tipo de actividades como la adecuación de las instalaciones para el desarrollo de la actividad de extracción. (Cepeda, 2011).

- **Efectos en el agua.** El recurso agua es el principal afectado en la minería, puesto que las excavaciones dejan grandes agujeros y estos a su vez no cuentan con un entubado adecuado, pueden permitir intercambio y contaminación entre los acuíferos, si no se controla o trata adecuadamente. (Cepeda, 2011).



Figura 8. Agua contaminada con metales pesados.

Fuente. Molina, 2012.

Otros efectos causados por la mala gestión ambiental en este sector, está encaminada a la degradación de las aguas superficiales, al descargan en las fuentes incorrectamente los vertimientos generados en los procesos industriales, contaminados por grandes cantidades de productos químicos que alteran la calidad de las aguas, o si se produce filtración en los sistemas

de conducción y tratamiento como piscinas o poliductos de relaves, o si se realiza una deficiente disposición final de productos químicos como los solventes, lubricantes y químicos dentro del proceso extracción y transporte. (Molina, 2012)

7.1.2.5 La actividad agrícola.

La actividad agrícola se ha visto incrementada en las últimas décadas, debido al aumento demográfico, para abastecer a toda la población. Por lo cual se comienza a generar un impacto ambiental de forma negativa sobre los recursos naturales al necesitar mayores terrenos, el uso de fertilizantes y herbicidas para el control de las plagas.

La contaminación del suelo por esta actividad económica está altamente relacionada con la presencia de compuestos químicos hechos por el hombre para aumentar la producción o el control de las plagas en los cultivos los cuales son muy agresivos y ocasionan alteración en los elementos mayores (nitrógeno, fosforo y potasio) y menores del suelo (boro, cloro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc), y bioacumulandose en el mismo sin un control eficiente a lo largo de los años. Algunos productos químicos que son detectados en el suelo van desde hidrocarburos de petróleo, solventes, pesticidas hasta metales pesados. De igual forma otro recurso afectado son las fuentes hídricas, producto de la infiltración de estas sustancias químicas hasta llegar a las aguas subterráneas y/o superficiales.



Figura 9. Plagas de insectos a tratar con plaguicidas e insecticidas.

Fuente. Extertronic, 2015

Los insecticidas organoclorados pueden mantenerse por más de diez años en los suelos sin descomponerse. Diversos estudios han demostrado que pueden introducirse en las cadenas alimentarias concentrándose en los tejidos grasos de los animales. Existe gran diversidad de insecticidas hortofrutícolas que son biodegradables y no se concentran, pero se asocia su acción

tóxica al mecanismo trasmisor del impulso nervioso en animales y personas, los fungicidas se utilizan para combatir los hongos, su compuesto químico es el azufre y el cobre. Por último, se encuentran los herbicidas que destruyen cualquier vida vegetal impidiendo su crecimiento. (Extertronic, 2015)

Los efectos causados en el suelo por todos estos contaminantes pueden ser diversos, un factor importante es el tiempo o las condiciones climáticas, acelerando o disminuyendo su solubilidad. Causando efectos que pueden ser inmediatos o producirse a futuro.

7.1.2.5 Los lodos residuales.

El carácter tóxico de los lodos residuales para los seres vivos, genera un efecto de bioacumulación entre los organismos que componen las cadenas tróficas, debido a la alta concentración los metales pesados en el entorno y que en su mayoría muchos de estos organismos no tienen una función biológica definida. La procedencia de los metales pesados encontrados en las aguas residuales es variada, se asocia las fuentes de contaminación a pequeñas industrias donde no se cuenta con plantas de tratamiento, entre otras actividades económicas que contribuyen a las afectaciones como los talleres de automóviles, al pequeño y mediano comercio, a grandes infraestructuras como puertos y aeropuertos, a grandes áreas comerciales, al baldeo y limpieza de calles o a las de tipo propiamente doméstico. (Chicón, s.f.)

Los vertimientos ilegales al sistema de alcantarillado urbano de aceites lubricantes, ácidos, pinturas, entre otros agentes que generan la contaminación por metales pesados (níquel, cadmio o mercurio) en las aguas residuales es una de las claves fundamentales para que se alteren las condiciones de los recursos hídricos, considerando los diversos agentes contaminantes, procedentes de miles de procesos en todas las operaciones industriales, agrícolas e incluso domésticas, la baja efectividad en los controles ejecutados en el ámbito global, están ocasionando efectos indeseados no solo al entorno urbano sino al natural afectaciones graves.



Figura 10. Lodos contaminados con metales pesados.
Fuente. (Chicón, s.f)

7.1.2.6 Residuos domésticos (pilas y baterías).

Están en todas partes, pues representa un gran avance tecnológico por lo que ha generado un uso indiscriminado en toda la población en el consumo de equipos que necesitan este tipo de elementos para su funcionamiento. Pero la desinformación de los seres humanos con respecto a las características altamente tóxicas de este producto en un porcentaje del 30 % de su contenido son metales pesados como el cadmio, litio y plomo, más sin embargo se encuentran en todas partes desde el desierto hasta la selva. (Jacott, 2005)

De igual forma Jacott (2005), afirma que en Colombia, cuando ya no sirven, las pilas y baterías generalmente son tiradas en la basura doméstica o a cielo abierto, así las pilas y baterías se convertirán en un residuo tóxico y sus componentes químicos-tóxicos se modificarán en el ambiente, volviéndose en algunos casos incluso más tóxicos. No importa cuál sea su destino final este elemento causa grandísimos problemas ambientales, la fuente más grande de mercurio en la basura doméstica, por la que incrementa el riesgo de contaminación del agua.

Una medida de control para reducir el número de baterías que son desechadas es usar pilas recargables, otro tipo de pilas como la de los teléfonos inalámbricos, computadoras y teléfonos celulares contaminan bastante por su contenido de metales pesados como el cadmio.

- **Tipos de pilas y baterías** Las pilas desechadas son uno de los objetos más contaminantes, por la lenta degradación y toxicidad de sus componentes. Se conocen como pilas primarias aquellas que son desechables ya que sus componentes químicos al convertirse en energía eléctrica ya no pueden recuperarse y secundarias a las recargables ya que pueden recargarse invirtiendo su reacción química. . (Jacott, 2005)

Los costos ambientales y los económicos son muy altos al consumir baterías alcalinas y de uso pesado (heavy duty), frente al gasto tan pequeño que llevan las recargables a lo largo de un año. Las pilas recargables pueden recargarse más de 200 veces y duran más de 900 horas de uso. Existen ya en el mercado cargadores solares para pilas recargables. Para la fabricación de una pila se consume 50 veces más de energía de la que esta misma produce y la corriente generada por cada una es 450 veces más cara que la generada por la red eléctrica. (Jacott, 2005)

Se puede mencionar algunos retardantes de fuegos bromados, presentes en las pilas y baterías de los teléfonos celulares, equipos de cómputo y demás aparatos eléctricos y electrónicos. En el año 2004, fueron utilizados alrededor de mil toneladas de retardantes de fuego bromados en la fabricación de 674 millones de equipos celulares; este tipo de químico es bioacumulable, neurotóxico y ocasiona deterioro de las funciones de aprendizaje y memoria interfiere con las hormonas tiroidea y estrógeno y la exposición en la gestación puede relacionarse con problemas de comportamiento. (Jacott, 2005)

7.2 Etapa 2. Describir los mecanismos de biorremediación para el tratamiento del recurso suelo y agua, contaminados.

Actualmente existen variedades de tecnologías para el tratamiento de suelos y aguas contaminados, las cuales se realizan por medio de tratamientos químicos, térmicos y biológicos que alteran la estructura de las sustancias aislándolas o destruyéndolas en forma eficiente. (Ortiz et al., 2007). Su elección dependerá de las características del recurso que es afectado y del tipo de contaminante, de igual forma se tendrá en cuenta la eficiencia, el costo y el tiempo para su desarrollo. (Reddy & Admas, 1999).

Las distintas aplicaciones de las técnicas para la recuperación de los suelos son aplicadas en dos formas in-situ que actúan directamente en el lugar sobre los contaminantes, por lo cual estos requieren menor manejo, en la práctica son menos utilizados puesto que son más lentos y se dificulta poner el agente para la recuperación a toda la masa del suelo que se encuentra contaminada. La segunda forma se denomina tratamientos exsitu, donde se requiere que se realice una excavación del suelo para su tratamiento, lo que los hace ser más costosos, pero a su vez su eficiencia es más rápida logrando así una recuperación casi completa del área que es afectada. (Reddy & Admas, 1999).

De acuerdo a Kaifer et al., (2004), las técnicas en la recuperación del recurso suelo y agua son:

- **Técnicas de contención**, su aplicación se realiza por medio de barreras físicas que bloquean el contaminante en el recurso suelo pero no actúa sobre él.
- **Técnicas de confinamiento**, esta técnica actúa sobre las características fisicoquímicas del contaminante, reduciendo así su desplazamiento en el suelo.
- **Técnicas de descontaminación**, son utilizadas para disminuir la concentración de los contaminantes en el recurso suelo.

7.2.1 Técnicas de contención. Estas técnicas son de bajo costo, no requieren que se haga una excavación en el suelo y se utilizan para prevención y reducción considerable de los contaminantes con características orgánicas e inorgánicas tanto en el suelo como en el agua. Estas técnicas se clasifican en:

- **Barreras verticales.** Son empleadas en forma in situ, para la reducción de los desplazamientos laterales de los contaminantes como los lixiviados, la instalación de estas barreras requieren que se realicen excavaciones en el suelo con profundidad de hasta 100 mts, las cuales son rellenas de materiales aislantes (hormigón) y otras barreras recubiertas por geomembranas, generalmente constituidas por polietileno de alta densidad, para sellar el

espacio que ocupan. Son utilizadas de forma eficiente en suelos cuya textura es gruesa pero no muy compacta. (Thomas & Koerner, 1996)

- **Barreras horizontales.** Son técnicas in situ, construidas en forma de zanjas o sondeos horizontales que rellenan con material sellante, actualmente se encuentran en desarrollo por lo cual su eficiencia no se ha demostrado, pero pueden contribuir a la restricción en forma vertical de los contaminantes en el suelo. (Mulligan et al., 2001)

A continuación se muestra las principales técnicas para la recuperación de los suelos contaminados de acuerdo a la clasificación hecha por Ortiz et al., (2007).

Tabla 1. Principales técnicas de recuperación de suelos.

Tipo de Tratamiento		Tratamiento	Aplicación
Descontaminación	Físico-Químico	Extracción	In situ
		Lavado	Ex situ
		Flushing	In situ
		Electrocínética	In situ
		Adición de enmiendas	In situ
		Barreras permeables activas	In situ
		Inyección de aire comprimido	In situ
		Pozos de recirculación	In situ
		Oxidación ultravioleta	Ex situ
	Biológico	Bioremediación asistida	In situ
		Biotransformación de metales	In situ
		Fitorecuperación	In situ
		Bioventing	In situ
		Landfarming	Ex situ
		Biopilas	Ex situ
		Compostaje	Ex situ
		Lodos biológicos	Ex situ
	Térmico	Incineración	Ex situ
		Desorción térmica	Ex situ
	Mixto	Extracción multifase	In situ
Atenuación natural		In situ	
Contención	Barreras verticales	In situ	
	Barreras horizontales	In situ	
	Barreras de suelo seco	In situ	
	Sellado profundo	In situ	
	Barreras hidráulicas	In situ	
Confinamiento	Estabilización físico-química	Ex situ	
	Inyección de solidificantes	In situ	
	Vitrificación	Ex situ - In situ	

Fuente. Ortiz et al., 2007.

- **Barreras de suelo seco.** Es ideal para reducir la contaminación en ambientes subsuperficiales, se basa en la desecación del suelo para aumentar su capacidad de retención de sustancias contaminantes líquidas, impidiendo así su desplazamiento hacia los acuíferos. Se hace fluir aire seco hasta el área contaminada el cual vaporiza el agua del suelo y conduce el vapor de agua hacia pozos de extracción. Donde el agua es eliminada y el aire seco se vuelve a inyectar para evaporar el agua residual. **(Ortiz et al., 2007)**
- **Barreras hidráulicas.** Es una técnica que se basa en extraer el agua subterránea en los alrededores del área contaminada. La extracción se realiza por medio de pozos o zanjas de drenaje que rebajan el nivel freático, lo cual facilita la inyección nuevamente en el suelo para mitigar los efectos nocivos que la sobreextracción de agua pueda producir en el suelo y el subsuelo. **(Kaifer et al., 2004)**

7.2.2 Técnicas de confinamiento. Son también llamadas de estabilización o solidificación, esta técnica reduce el desplazamiento de los contaminantes por medio de procesos físicos y químicos, esta técnica presenta ciertas limitaciones al tratar sustancias orgánicas o pesticidas. (Suthersan, 1997). Algunas técnicas de confinamiento se describen a continuación:

- **Estabilización físico-química.** Técnica ex situ que se utiliza para reducir el desplazamiento de los contaminantes, principalmente sustancias inorgánicas (metales pesados), mediante reacciones químicas que minimizan la solubilidad en el suelo. Los agentes estabilizantes como cementos, fosfatos o álcalis, aumentan el pH y favorecen la precipitación e inmovilización de determinados metales pesados. Una ventaja de esta técnica es la reutilización del suelo que fue tratado. **(Smith et al., 1995).**
- **Inyección de solidificantes.** Técnica eficiente para el tratamiento de los suelos contaminados con sustancias inorgánicas. Utiliza el mismo principio que la estabilización físico-química en la que los agentes estabilizantes como el cemento son inyectados de forma in situ en el suelo contaminado por medio de pozos o también mezclados con el suelo. **(Khan et al., 2004)**
- **Vitrificación.** Técnica que emplea la estabilización térmica a través de calentar el suelo contaminado a altas temperaturas para lograr su fusión y que se transformen en un material vítreo de forma estable, contribuyendo así a reducir el desplazamiento de los contaminantes inorgánicos (Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y cianuros) y la transformación de los contaminantes orgánicos por reacciones de oxidación y/o pirólisis (FRTR, 1999b). Esta técnica tiene una limitante pues es necesario que el suelo tenga suficiente sílice para la formación de la masa vítrea y óxidos alcalinos (Na, Li, K) que le confieran estabilidad. **(Khan et al., 2004)**

A continuación se describen los tipos de contaminantes tratados en la recuperación de los recursos agua y suelo, clasificados de acuerdo a:

Tabla 2. Tipos de contaminantes tratados en la recuperación de los recursos suelo y aguas.

Tratamiento	Tipos de contaminantes tratados
Extracción	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, combustibles, metales, PCBs, hidrocarburos aromáticos.
Lavado	Compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos derivados del petróleo, cianuros y metales.
Flushing	Todo tipo de contaminantes, especialmente inorgánicos.
Electrocinética	Especialmente metales solubles o complejados.
Adición de enmiendas	Fundamentalmente sales y metales.
Barreras permeables activas	Contaminantes orgánicos biodegradables, metales, nitratos, sulfatos.
Inyección de aire comprimido	Solventes clorados, sustancias volátiles y semivolátiles ligeras como xileno, benceno, tolueno.
Pozos de recirculación	Tricloroetileno, derivados del petróleo, compuestos orgánicos no halogenados, semivolátiles, pesticidas.
Oxidación ultravioleta	Amplio espectro de contaminantes orgánicos y explosivos (hidrocarburos del petróleo, hidrocarburos semivolátiles, alcoholes, cetonas, aldehídos, fenoles, éteres, pesticidas, dioxinas, PCBs, TNT).
Biodegradación asistida	Amplio espectro de contaminantes orgánicos biodegradables.
Biotransformación de metales	Metales.
Fitorecuperación	Metales, pesticidas, solventes, explosivos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, crudo.
Bioveting	Hidrocarburos del petróleo de peso mediano, explosivos (DDT, DNT).
Landfarming	Fundamentalmente hidrocarburos del petróleo de peso mediano.
Biopilas	Derivados del petróleo, compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados.
Compostaje	Explosivos (TNT, RDX y HMX), hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos del petróleo.
Lodos biológicos	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles no halogenados, explosivos.
Incineración	Explosivos, hidrocarburos clorados, PCBs y dioxinas.
Desorción térmica	Compuestos orgánicos volátiles no halogenados, combustibles, pesticidas y metales volátiles
Extracción multifase	Compuestos orgánicos volátiles, en disolución y compuestos orgánicos no acuosos en fase libre
Atenuación natural	Compuestos BTEX (benceno, tolueno, etil benceno y xileno, hidrocarburos clorados).
Barreras verticales	Compuestos orgánicos e inorgánicos.
Barreras horizontales	Compuestos orgánicos e inorgánicos.
Barreras de suelo seco	Compuestos orgánicos e inorgánicos.
Sellado profundo	Compuestos orgánicos e inorgánicos.
Barreras hidráulicas	Compuestos orgánicos e inorgánicos.
Estabilización físico-química	Fundamentalmente compuestos inorgánicos como metales pesados.
Inyección de solidificantes	Fundamentalmente compuestos inorgánicos, eficacia mucho menor para compuestos orgánicos semivolátiles.

Vitrificación	Contaminantes inorgánicos (principalmente Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y Cianuros)
----------------------	--

Fuente. Ortiz et al., 2007.

7.2.3 Técnicas de descontaminación. Conforme a lo establece Ortiz et al. (2007), estas técnicas se clasifican en:

7.2.3.1 Tratamientos físico-químicos.

- **Extracción.** Técnicas in situ, muy sencillas que tienen como propósito la separación de contaminantes del suelo para llevarlo a un tratamiento depurador. De acuerdo a los elementos con que se realice la extracción, se clasifican en:

1. Extracción de aire. Se emplea para extraer los contaminantes adsorbidos en las partículas de suelos no saturados. (Ortiz et al., 2007).

2. Extracción de agua. Es una técnica empleada principalmente para acuíferos contaminados donde se extrae el agua contaminada del suelo y del subsuelo. (**Bear & Sun, 1998; Illangasekare & Reible, 2001**).

3. Extracción con disolventes y ácidos. Tratamiento ex situ, donde se extrae los contaminantes mediante la mezcla en un tanque del suelo con un disolvente orgánico, como acetona, hexano, metanol, éter dimetílico y trietilamina. Esta técnica es muy eficiente para la eliminación de contaminantes orgánicos, hidrocarburos derivados del petróleo, su mayor desventaja radica en la toxicidad del disolvente que va a ser empleado y los residuos generados. (Ortiz et al., 2007).

- **Lavado.** Tratamiento utilizado de forma ex situ, donde el suelo se separa por medios físicos como el tamizado, la densidad o la gravedad con el objetivo de eliminar las partículas de grava más gruesas, una vez finalizado se procede a un lavado con extractantes químicos que permitan disolver y solubilizar los contaminantes, como etapa final el suelo es lavado con agua para retirar los contaminantes y los extractante de la etapa anterior, para devolverse a su área de origen (**Van Benschoten et al., 1997**).

La eficacia de este tratamiento dependerá de ciertos procesos en el suelo como la adsorción del contaminante y parámetros como el pH, la textura, la capacidad de intercambio catiónico, la mineralogía y el contenido en materia orgánica, el tiempo es un factor importante para la para la determinación de elementos tóxicos. (**Reed et al., 1996**)

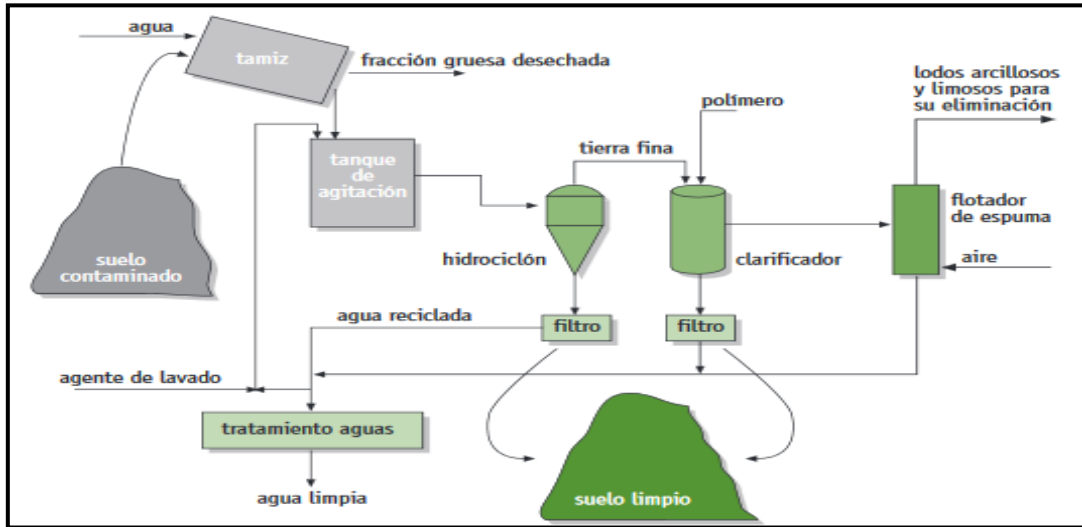


Figura 11. Proceso de lavado de suelo.

Fuente. Ortiz et al., 2007. (Adoptado de U.S. Naval Engineering Service Center).

- Inyección de aire comprimido.** Esta técnica in situ, tiene como propósito la separación de los contaminantes disueltos en el agua en forma de vapor. Se utiliza para tratar suelos y aguas subterráneas contaminadas con sustancias solventes cloradas, xileno, benceno, tolueno, entre otros. El aire contaminado que sale debe ser extraído mediante filtros de carbón activo. (Kaslusky & Udell, 2005)

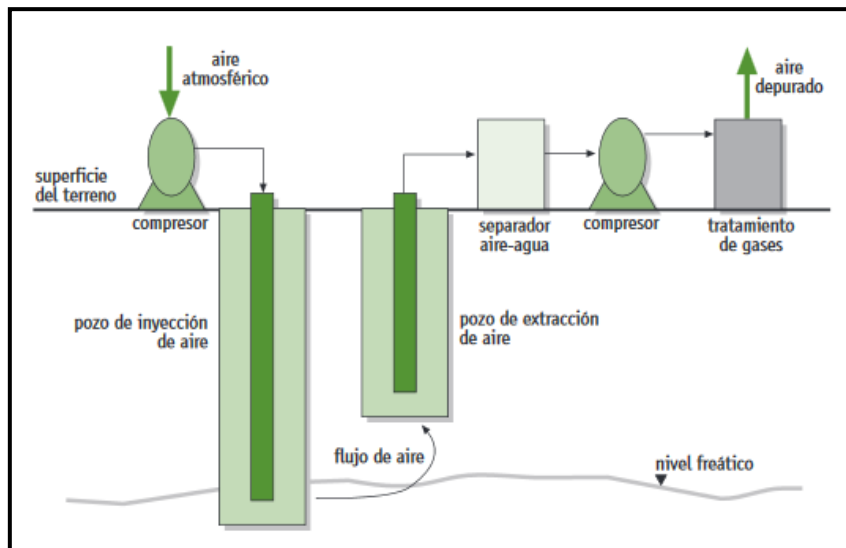


Figura 12. Proceso de inyección de aire comprimido.

Fuente. Ortiz et al., 2007.

7.2.4 Intercambio iónico.

El intercambio iónico es una reacción química reversible, los cationes y aniones presentes en el agua son reemplazados por iones cargados de manera similar dentro de una resina. Las resinas pueden ser inorgánicas u orgánicas de acuerdo al origen que la producen en forma natural o sintética.

7.2.4.1 Remoción y eficiencia.

Esta tecnología mediante resinas de intercambio iónico posee una eficiencia de 99,9 %, ha sido utilizada con gran efectividad en las industrias en el área de extracción de metales como oro, uranio, cobre, bario, Niquel, cobalto, mercurio, hierro y arsénico. También en la recuperación de aguas cianuradas, saladas y nitrificadas. **(Domic, 1996)**

7.2.4.2 Ventajas.

- Es posible la eliminación de metales a muy bajas concentraciones.
- Presenta alta selectividad.
- Es posible la recuperación de los metales por electrólisis.
- Es de operación simple necesita espacios pequeños para su funcionamiento.
- La posibilidad de regeneración del material de intercambio aumenta su vida útil.
- No genera lodos y produce bajos volúmenes de fluidos.
- Se adapta a fluctuaciones de concentraciones de elementos contenidos en las aguas a tratar.
- Tiene una gran flexibilidad en su aplicación y se complementa con otras tecnologías a bajos costos. **(Reyes, 2006)**

7.2.4.3 Desventajas.

- La presencia de Calcio, Sodio y Magnesio disminuye su rendimiento debido a que pueden saturar la resina.
- La posible competencia entre metales pesados y otros cationes.
- Las resinas no son muy tolerables al cambio del pH.
- Sus costos operacionales se generan por el consumo de reactivos químicos.
- La solución contaminada (fluidos) debe ser previamente tratada para eliminar los materiales en suspensión. **(Fundación Chile, 2017)**

7.2.5 Ósmosis inversa.

Es una tecnología utilizada para la desmineralización de las aguas, mediante la utilización de membranas para la separación de sólidos disueltos, o iones presentes en una solución. Dichas

membranas ejercen una acción filtrante de barreras semi-selectivas, debido al empuje aplicado por la presión osmótica de la solución más salada. La ósmosis inversa ofrece la mejor filtración disponible actualmente, siendo el mejor rechazo de sólidos disueltos, y de sólidos en suspensión. (Kucera, 2010)

❖ **La membrana de la ósmosis inversa.**

Esta membrana consta de un área "microporosa" que resiste las impurezas y permite el paso del agua. La membrana rechaza las bacterias, pirógenos, y 85%-95% de sólidos inorgánicos. Los iones "polivalentos" son rechazados más fácilmente que los iones "monovalentes". Los sólidos orgánicos con un peso molecular superior a 300 Kg/mol son rechazados por la membrana, pero los gases pasan a través. La ósmosis inversa es una tecnología de rechazo en porcentaje.

También retiene otras sustancias disueltas con altos contenidos de sales como sodio, calcio, boro, hierro, cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos; hasta alcanzar los límites considerados como agua aceptable. (Martínez, 2012)

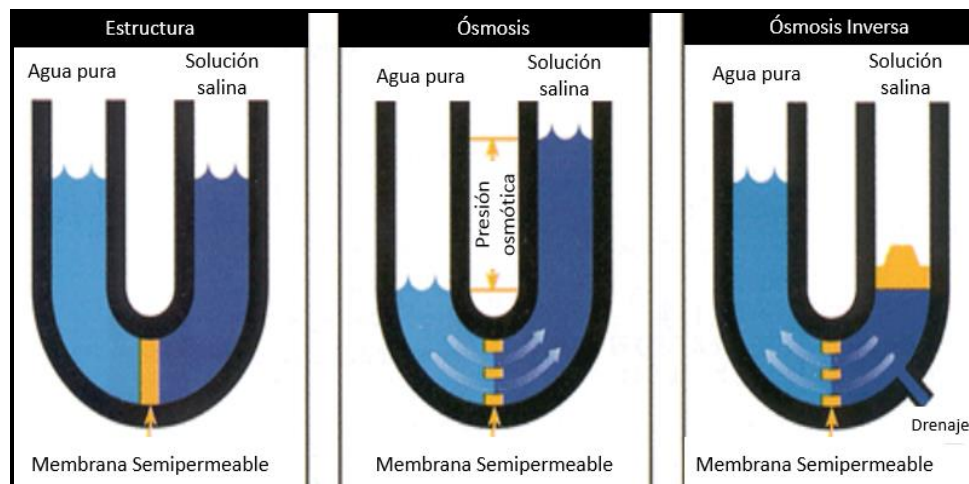


Figura 13. Ósmosis inversa.

Fuente. Diseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. *Ósmosis inversa*.2012

7.3 Etapa 3. Determinar los procesos de biorremediación aplicados a la captación de metales pesados, y su incidencia en los recursos agua y suelo.

7.3.1 Pasto vetiver para la recuperación de aguas contaminadas con metales pesados.

El pasto vetiver es una gramínea permanente, que posee un sistema radicular fibroso profundo (2 a 3 m de crecimiento en un año); fuerte. Su follaje es erecto, largo, abundante y resistente; pues cuando se establecen cercas vivas, este puede soportar láminas de agua de inundación de hasta 80 cm. Es una planta asexual, es decir sus semillas no son fértiles, y por ello no hay peligro que se convierta en maleza. Se adecua a suelos y aguas con existencia de aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, manganeso, mercurio, níquel, selenio y zinc; suelos sódicos, salinos, alcalinos. (Hengchaovanich & Nilaweera, 2012)



Figura 14. Pasto vetiver.

Fuente. El pasto vetiver: instalación y manejo de viveros., 2017.

7.3.1.1 Nombres.

Los nombres más comunes que recibe el pasto vetiver son los siguientes: Pasto Vetiver Zacate Vetiver; Zacate Violeta; Zacate Valeriana; Tiva; Capim (Portugués); Pachuli; Mura.

7.3.1.2 Características generales del pasto vetiver.

- Soporta temperaturas desde -9°C a más de 45° C.
- Tolera sequias extremas, pero crece mejor bajo condiciones húmedas.
- Las altitudes propias para su desarrollo están desde el nivel del mar hasta más de 2.800 msnm, está limitado por las temperaturas bajas en altitudes más altas y con nubosidad.

- El vetiver resiste la mayor parte de las plagas y enfermedades, pero parece ser susceptible a enfermedades cuando es débil y no crece bien.
- Sus costos de establecimiento son muy económicos, y depende del cobro de mano de obra agrícola, para su cuidado y manejo.
- El vetiver vive por un largo tiempo.
- Los limitantes que presenta esta técnica son: la profundidad de penetración de las raíces en aguas poco profundas, Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados, y la biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación. **(Daza, 2011)**

7.3.1.3 Ventajas del uso de Vetiver.

- **Fácil manejo.** Para la implementación de un sistema vetiver no se necesita la incorporación de alta tecnología, pero si el conocimiento básico acerca del funcionamiento y cuidado que este debe tener. **(Daza, 2011)**
- **Muy económico.** El proceso que conlleva la puesta en marcha de un sistema vetiver en el tratamiento de aguas contaminadas, es relativamente de bajo costo, pues su valor se adecua a una fracción en relación con la implementación de técnicas químicas y mecánicas. También posee grandes ventajas al ser un sistema de tecnología limpia y amigable con el medio ambiente. **(Daza, 2011)**
- **Mantenimiento Mínimo.** Es un sistema natural que se adapta a las condiciones propias del ambiente en el cual fue sembrado, por lo cual no necesita de mantenimiento constante, solo dos veces al año en referencia a una poda, no requiere de gran cantidad de personal para su vigilancia y control, y puede ser operado por un ingeniero o técnico calificado para tal función de acuerdo a su conocimiento y experiencia en el mismo. **(Daza, 2011)**
- **Beneficios Adicionales.**
 - Almacena contaminantes presentes en el agua, pero los utiliza en otras aplicaciones de los ciclos químicos (ciclo del carbono, ciclo del nitrógeno, ciclo del agua, que se desarrollan en un ecosistema.
 - Sirve de barrera natural.
 - Es la base para la producción de compost, en la siembra de especies ornamentales en el desarrollo de procesos de reforestación, este compost debe recibir un tratamiento preliminar con la aplicación de inhibidores para la regulación de los metales pesados retenidos, y así evitar su adherencia al suelo.

- Sus hojas, tallos y raíces son usados como insumos para la elaboración de artesanías y demás. **(Daza, 2011)**

7.3.1.4 Tratamiento de Aguas Residuales con Tecnología Pasto Vetiver.

Esta técnica de descontaminación es aplicable a vertimientos de aguas residuales de industrias, aguas residuales domesticas (alcantarillados), centros comerciales, sistemas de desagües residuales hospitalarios, sistemas de desagües de frigoríficos, etc.

➤ **Tipos de lixiviados a tratar con el cultivo piloto de pasto Vetiver.**

Muchos investigadores han podido remover o atrapar contaminantes de lixiviados provenientes de la agricultura, la industria, lodos de explotación petrolera y rellenos sanitarios. Esto se discute a continuación:

- **Lixiviados Industriales.** Se ha logrado tratar con pasto vetiver, vertimientos de desechos de industrias tales como las tenerías, talleres electrolíticos y de galvanizado, estos generan contaminación por metales pesados tales como As, Cd, Cr, Hg, y Ni, también los residuos líquidos de canteras, los cuales poseen altas cantidades de metales pesados. Estos elementos químicos son altamente tóxicos para los humanos, y deben ser eliminados de los lixiviados antes de que estos alcancen los cuerpos de agua. **(Daza, 2011)**
- **Lixiviados de Lodos Petroleros.** En Colombia se ha utilizado el pasto vetiver para mantener el nivel normal de pH, y también para retener metales pesados en lodos de locaciones de explotación petrolera, reportando muy buenos resultados que favorecen enormemente la adaptación de este material vegetal en esta clase de terrenos.
- **Lixiviados agrícolas.** El sistema de pasto vetiver, asegura el tratamiento de aguas residuales de procesos agrícolas. Estas poseen ciertos elementos y compuestos como los metales pesados, ejemplo: Pb, Hg, Cu, Cd, Cr, As, Residuos de plaguicidas, como insecticidas, funguicidas y herbicidas. **(Daza, 2011)**
- **Lixiviados de rellenos sanitarios.** Generalmente estos lixiviados poseen cada uno características propias, de acuerdo a la composición fisicoquímica de los residuos que llegan al relleno sanitario en particular, se pueden encontrar lixiviados con presencia de nitratos y fosfatos provenientes de residuos domésticos, también plaguicidas producto de residuos agrícolas, así como metales pesados y otras substancias peligrosas generadas en residuos industriales. **(Daza, 2011)**

7.3.2 Pasto vetiver para la recuperación de suelos.

Vetiver tiene una gran tolerancia en cuanto a las propiedades químicas del suelo. Permite un amplio rango de pH, de 3-11 y tiene una elevada tolerancia a la sodicidad y sulfatos e incluso elevadas concentraciones de Al, Mn, y metales pesados como Arsénico, Cadmio, Cromo, Níquel, Plomo, Mercurio, Selenio y Zinc en el suelo y en el agua. Debido a ello, Vetiver puede ser plantado en prácticamente cualquier tipo de suelo y admite para el riego hasta aguas residuales o salobres. El Vetiver tiene un umbral de salinidad de 8 dS/m, un valor que ya se considera muy salino y que altera el crecimiento normal de las plantas. Como referencia puede indicarse que un suelo se considera salino cuando la salinidad supera los 4 dS/m. Se ha observado una reducción en el crecimiento de Vetiver del 10% con 10 dS/m y un 50% con 20 dS/m. **(Wildschut, 2013)**

Con niveles adecuados de nutrientes, crece en suelos sódicos con 30-45% del CIC de Na intercambiable. Es altamente tolerante al aluminio, creciendo en suelos con pH 3 y niveles saturación de aluminio de hasta 70-80% del CIC. Como referencia, la mayoría de las plantas no resisten valores mayores de 30%. Así mismo tolera elevadas concentraciones de manganeso. Se reportan valores de más de 500 mg Mn/ kg que no afectaron el crecimiento de Vetiver. Esta característica hace que vetiver sea eficiente para mitigar la erosión en suelos sulfatados ácidos. El vetiver es muy tolerante a elevadas concentraciones de metales pesados en el suelo. Aunque se absorben en la planta, el As, Cd, Cr y Hg es retenido en las raíces. Solo una menor fracción (1-5%) pasa a la parte vegetal. En el caso de Cu, Pb, Ni, Sn y Zn, la incorporación de los metales a la parte vegetativa es mayor. **(Wildschut, 2013)**

Tabla 3. Comportamiento de vetiver en suelos con alta carga de metales pesados.

Comportamiento de vetiver en suelos con alta carga de metales pesados			
Metal pesado	Umbral en el suelo (mg/Kg)	Umbral en la planta (mg/Kg)	Distribución Vástago / raíz (%)
Arsénico	100-250	21-72	1-5/ 99-95
Cadmio	20-60	45-48	
Cromo	200-600	5-18	
Mercurio	>6	>0,12	
Cobre	50-100	13-15	16-33/ 84-67
Plomo	>1500	>78	
Níquel	100	347	
Selenio	>74	>11	
Zinc	>750	880	40/60

Fuente. **(Wildschut, 2013)**

Para fitorremediación se han identificado una serie de plantas que se han caracterizado como hiperacumuladoras. Una planta hiperacumuladora es aquella que absorbe y concentra por encima de un 0,1% (1.000 mg/kg) de un elemento en su tejido (materia seca). Estas concentraciones son entre 50 y 100 veces más de lo que se encuentran en plantas ordinarias. Además, la acumulación debe concentrarse en la parte aérea, lo que se define mediante el factor de translocación. Este factor, que expresa la relación entre la concentración en la parte aérea y las raíces, debe ser mayor de 1. Estudios con Vetiver han demostrado una elevada tolerancia a metales pesados y una notable acumulación en los tejidos. (Wildschut, 2013)

Tabla 4. Concentraciones de metales pesados acumulados en vetiver.

Concentraciones de metales pesados acumulados en vetiver				
Metal pesado	Suelo (mg/Kg)	Vegetal (mg/Kg)	Raíz (mg/Kg)	Factor traslocación
Arsénico	620	11	268	0,04
Cadmio	1,66	0,3	14	0,02
Cromo	600	18	1750	0,01
Mercurio	6,2	0,12	11	0,11
Cobre	50	13	68	0,19
Plomo	730	78	88	0,87
Níquel	300	448	1040	0,43
Selenio	74	11	25	0,46
Zinc				0,40

Fuente. (Wildschut, 2013)

Se considera Vetiver una planta útil en procesos de fitorremediación, por algunas características que la diferencian de especies hiperacumuladoras, como son:

- **Elevada producción de biomasa.** Las plantas hiperacumuladoras son generalmente de crecimiento lento. De este modo, aunque acumulan elevadas concentraciones, lo hacen de forma lenta y en una pequeña cantidad de biomasa. Vetiver, por el contrario produce mucha biomasa, pero con concentraciones menores. (Wildschut, 2013)
- **Profundidad de enraizamiento.** Las raíces de Vetiver llegan a mucha mayor profundidad que las especies hiperacumuladoras, generalmente de enraizamiento superficial. Vetiver, por tanto, trata un mayor volumen de suelo. (Wildschut, 2013)
- **Estabilización del terreno.** Vetiver puede ser plantado en laderas y/o en terrenos susceptibles de arrastre por escorrentía o erosión eólica, creando barreras que retienen el suelo contaminado. Como tal, Vetiver es una planta indicada para aplicación en fitoestabilización de suelos contaminados. (Wildschut, 2013)

❖ **Aplicaciones prácticas de Vetiver en suelos contaminados son:**

- Rehabilitación de zonas mineras, estas aplicaciones son en realidad de tipo geotécnico (estabilización), con la peculiaridad de las extremas condiciones físico-químicas del suelo. **(Wildschut, 2013)**
- Fitoestabilización de suelos contaminados. En esta aplicación, vetiver puede complementar la siembra de especies hiperacumuladoras, logrando de este modo una remediación de la capa superior y una reducción de la erosión del suelo. **(Wildschut, 2013)**

❖ **Aplicaciones generales del pasto vetiver.**

Además de la eficiente aplicabilidad que el pasto vetiver ha demostrado, para la disminución de la carga contaminante en aguas residuales, posee las que se nombran a continuación:

- Mitiga y controla la erosión en taludes de carreteras.
- Mitiga y controla la erosión en orillas de canales de riego.
- Mitiga y controla la erosión en riveras de ríos y quebradas.
- Permite la construcción de cercas vivas para el mantenimiento de cultivos.
- Mitiga y controla la erosión en cultivos de ladera como cafetales y horticuivos.
- Favorece el cuidado de gaviones.
- Protección de cuencas productoras de agua.
- Su parte radicular es usada para la elaboración de esencias y perfumes.
- Se utiliza como cubierta protectora que se extiende sobre el suelo (Mulch).
- Fuente primaria para la elaboración de Papel.
- Utilizado como insumo para la Materia para el recubrimiento de techos.
- Sus hojas y tallos son utilizadas como materia prima para la elaboración de Artesanías.
- Se ha descubierto su gran uso en la medicinal homeópata.
- Usado en el control biológico de cultivos.
- Material de combustión para procesos industriales. **(Daza, 2011)**

7.3.3 El girasol amarillo (*Helianthus annuus*), en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados.

Esta planta se encuentra relacionada a la familia de las Asteraceae, su nombre científico es *Helianthus annuus*. Posee un tiempo de supervivencia de un año, y se caracteriza porque sus órganos vegetales son muy fuertes y resistentes al ecosistema donde se desarrolle, dentro de esta especie se encuentran diversas subespecies cultivadas como plantas ornamentales, oleaginosas y forrajeras.

El girasol amarillo posee una raíz pivotante y una serie de raíces secundarias, de las que germinan raíces terciarias que atraviesan el suelo en sentido vertical y horizontal, normalmente la medida raíz principal supera la altura del tallo. El tallo es de consistencia semileñosa y maciza en su interior, es circular y con diámetro variable entre 2 y 6 cm y a una altura entre el capítulo entre 40 cm y 2 m. la superficie exterior del tallo es rugosa, asurcada y vellosa, excepto la base. Las hojas son grandes, medianas y pequeñas, trinervadas, largamente pecioladas acuminadas, dentadas y de áspera vellosidad tanto en el haz como en el envés. El número varía entre 12 y 49, de acuerdo con las condiciones de cultivo y la variedad, el color también es variable y va de verde oscuro a verde amarillento.

La flor posee un receptáculo floral o capítulo que puede tener forma lineal, o convexa, el capítulo es solitario y rotatorio y está rodeado por brácteas involucrales. Las flores del exterior del capítulo (pétalos amarillos) son infértiles, están dispuestas radialmente y su función es atraer a los insectos polinizadores. Las flores del interior están formadas por un ovario inferior, dos sépalos, una corola en forma de tubo compuesta por cinco pétalos y cinco antenas unidas a la base del tubo de la corola.

El fruto es un aquenio de tamaño comprendido entre 3 y 20 mm de largo y 2 y 13 mm de ancho. El pericarpio es fibroso y duro, quedando pegado a la semilla, la membrana seminal crece en el endospermo y forma una película fina que recubre al embrión y asegura la adherencia entre el pericarpio y la semilla. (Roblero, 2006)

7.3.3.1 Requerimientos Edafoclimáticos.

Es un cultivo poco exigente en el tipo de suelo, aunque prefiere los arcillo-arenosos y ricos en materia orgánica, es muy poco tolerante a la salinidad y contenido de aceite disminuye cuando esta aumenta en el suelo. En suelos neutros o alcalinos la producción de girasol no se ve afectada.

La temperatura es un factor muy importante en el desarrollo del girasol, adaptándose muy bien a un amplio margen de temperatura que van desde 25-35° C a 13 – 17 °C, las diferencias en cuanto a la aparición de hojas, fecha de floración y a la duración de las fases de crecimiento y

desarrollo son atribuidas al foto periodo. Durante la fase reproductiva el foto periodo deja de tener influencia y comienza a tener importancia la intensidad y la calidad de la luz, por tanto un sombreado en plantas jóvenes produce un alargamiento del tallo y reduce la superficie foliar.

7.3.3.2 Particularidades del cultivo.

El período de siembra no está establecido y obedece a las características climatológicas de cada zona. El conocimiento que se tiene de las plantas y su fisiología, desde la germinación de la semilla hasta la maduración de las mismas, permite una correcta utilización de los medios de producción, y una interpretación acertada de la forma de reaccionar de la planta frente a la influencia del medio ambiente y a las prácticas agrícolas utilizadas por su producción. **(Roblero, 2006)**

Las semillas de girasol, brotan al exterior en un tiempo estimado de 10 a 20 días, entre los 15 y 25 días la raíz de la planta se enraíza al suelo, el período de crecimiento óptimo de la planta es alrededor de 40 y 50 días, aparecen de cinco pares de hojas al inicio de la floración en el cual se realiza la mayor absorción de elementos minerales del suelo. La floración puede durar de 10 a 12 días, inicia con la apertura de las primeras flores liguladas y como proceso final la maduración puede durar entre 35 y 50 días. Esta fase se presenta con la culminación de la floración y llega hasta el estado de madurez fisiológica. (Ver figura 16) **(Roblero, 2006)**

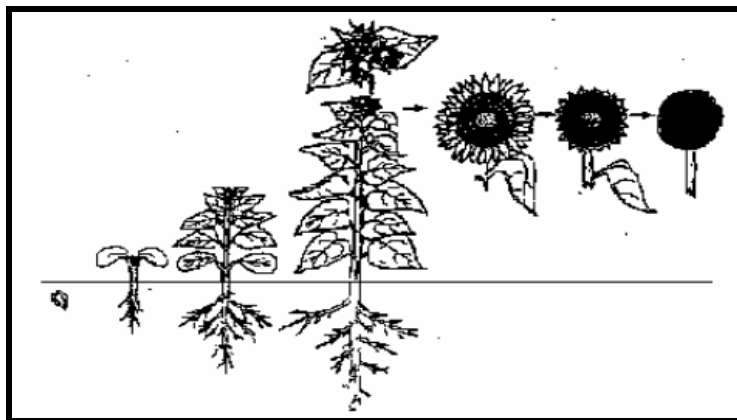


Figura 15. Fenología de la planta de girasol amarillo.

Fuente. Roblero, 2006

7.3.3.3 Características favorables del girasol amarillo como planta fitorremediadora.

- La siembra y posterior manejo y cuidado del cultivo son muy sencillos.
- Soporta altas temperaturas al igual que las bajas.

- La época de siembra no ha sido establecida y obedece a las características climatológicas de cada región.
- Es una planta hiperacumuladora de una variedad de metales pesados como: Cromo, arsénico, bismuto, cadmio cobre, manganeso, plomo, estaño, zinc.
- Es una planta microtrófica, y puede mitigar los impactos ambientales negativos generados por actividades antrópicas presentes en suelos y aguas contaminadas.

Como se mencionó anteriormente una de las limitaciones de la utilización de las plantas para recuperar suelos contaminados es su lento crecimiento y su poca biomasa radicular, pero a su vez toleran altos niveles de algunos metales en comparación con otros grupos taxonómicos y se les ha propuesto como especies fitorremediadoras. El girasol es reportado con una alta biomasa radicular y capacidad de acumular metales, no obstante una baja tolerancia al cromo comparado con otras plantas acumuladoras. **(Roblero, 2006)**

El girasol amarillo permite que se lleve a cabo el proceso de absorción, gracias a la gran cantidad de raíces fibrosas que posee, y a la gran cadena de vías vasculares dentro de sus tallos que permiten la acumulación de estos metales pesados en sus hojas, tales son almacenados en los orgánulos celulares presentes en la planta. **(Roblero, 2006)**

7.3.4 las microalgas en la recuperación de aguas contaminadas con metales pesados.

7.3.4.1 Generalidades.

Las microalgas para el tratamiento en disminución de carga contaminante en un efluente, son utilizadas como una alternativa de tratamiento terciario, mediante los procesos asociados a la actividad bacteriana (quienes realizan la degradación de la materia orgánica) y microalgas (quienes utilizan los compuestos inorgánicos), para efectuar una elevada bioconversión de la energía solar, en la utilización y eliminación de materia orgánica, lo cual se representa en la generación de biomasa, mejorando la calidad del efluente y aumentando la concentración de oxígeno. Esta biomasa de microalgas puede ser establecida en los sistemas de producción, (avicultura, diferentes aspectos de la acuicultura, etc). Este sistema para el tratamiento de aguas residuales, mediante el cultivo de microalgas clorofitas, posee ciertas ventajas en aplicaciones integrales. Algunos parámetros a tener en cuenta son el tipo de efluente, la carga orgánica, la temperatura, la intensidad de luz, el género de microalgas y el tipo de cultivo (monoalgal y mixto). **(Salazar, 2005)**



Figura 16. Sistema de absorción de metales pesados mediante microalgas.
Fuente. Salazar, 2005

7.3.4.2 Antecedentes.

La introducción de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales, tiene sus bases iniciales en la época de Caldwell (1940), quien enuncia los primeros estudios, sobre la factibilidad de utilizar las microalgas como microorganismos reparadores de aguas residuales", pues estas aprovechan los nutrientes inorgánicos" contenidos en esta agua, para acelerar el crecimiento de las microalgas, funcionando este como medio de cultivo. Posteriormente Oswald (1957), introduce un nuevo concepto en la producción masiva de microalgas, al llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales, obteniendo una producción de biomasa vegetal con un alto contenido proteico, lo que finalmente se considera como una valorización de las aguas residuales mediante el cultivo de microalgas.

En 1960, en la zona de Richmond, California, se desarrolla el sistema de cultivo más grande de los Estados Unidos, llegándose a presentar una producción elevada de biomasa de microalgas. Mediante este cultivo a gran escala se generó el desarrollo por parte de diversos países en el cultivo masivo de microalgas en sistemas cerrados y abiertos, con diferentes finalidades. Debido a lo expuesto anteriormente, se presenta el cultivo de microalgas, como una de las mejores alternativas para el tratamiento de aguas residuales, como un sistema biológico de tratamiento terciario económico, debido a la remoción de nutrientes y metales pesados, como una solución a los problemas de contaminación y eutroficación ocasionados por las descargas.

7.3.4.3 Tipos de sistemas de tratamiento con microalgas.

- **Tanque no aireado:** es un sistema muy sencillo poco hondo, el cual relaciona dos tipos de tratamiento, como son el secundario y terciario; sin embargo presenta bajas eficiencias y es difícil la recuperación de microalgas. **Salazar, 2005**

- **Tanque aireado:** es un sistema más completo de oxidación, el cual tiene un mecanismo de aireación, por lo que se eleva las concentraciones de oxígeno, presentándose una alta eficiencia y recuperando la biomasa por filtración en grava. **Salazar, 2005**
- **Lagunas de oxidación:** son estanques poco profundos (entre 30 y 60 cm), con mecanismos de aireación y agitación, los cuales favorecen el crecimiento de las microalgas. En este sistema se mejora el aumento en la degradación bacteriana, realizado por el incremento en la oxigenación, lo cual genera el aumento de microalgas, y por lo tanto, mejores resultados en la eficiencia global del tratamiento de las aguas residuales. **Salazar, 2005**
- **Lagunas de alta tasa de oxidación:** es una fase de tratamiento similar al anterior, el cual se ejecuta en el tratamiento secundario para las aguas residuales, siendo estas inoculadas con altas densidades microalgales. En la cual se alcanza una biomasa mixta, la cual aumenta la tasa de oxidación, la tasa de remoción y por lo tanto la eficiencia global del sistema. **Salazar, 2005**
- **Lagunas de oxidación de algas:** es un diseño similar al anterior, pero para este caso, está basado hacia la producción de biomasa con fines de alimentación y/o producción de metabolitos de interés comercial (pigmentos). (**Salazar, 2005**)

7.3.4.4 Microalgas comunes en lagunas de estabilización.

Las microalgas empleadas en el tratamiento de aguas residuales, soportan elevadas concentraciones de nutrientes presentes en las aguas residuales, los cuales son necesarios para el desarrollo y crecimiento poblacional, por lo que los microorganismos evolucionan con ciertas adaptaciones para poder sobrevivir en estos medios. Presentan además una actividad metabólica elevada, una capacidad de resistir variaciones ambientales y un desarrollo de cultivo en fase exponencial, con el objetivo de tolerar las elevadas concentraciones de nutrientes inorgánicos. Dentro de las microalgas tenemos grupos y géneros característicos, que son utilizados en el tratamiento biológico terciario de las aguas residuales, las cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5. Microalgas comunes en lagunas de estabilización.

Grupo	Género representativos	% de aplicación en lagunas de estabilización
Diatomeas	<i>Cyclotella, Gomphonema, Nitzschia</i>	10
Flageladas	<i>Chamydomonas, Euglena, Cryptomonas</i>	25
Algas Verdes	<i>Ankistrodesmus, Chlorella, Scenedesmus</i>	50
Algas Verdes-azules	<i>Anacytis, Anabaena, Oscillatoria</i>	15

Fuente. Salazar, 2005

La biomasa microalgal como residuo en estas fases de sistemas de tratamiento, puede ser tratada con las técnicas ya presentadas para su aplicación en diversos aspectos, como suplemento o complemento de la alimentación animal y elaboración de fertilizantes, lo cual genera la valorización y efectividad del tratamiento de las aguas residuales con cultivos de microalgas. (Salazar, 2005)

Tabla 6. Empleo de microalgas producidas en el tratamiento de aguas residuales.

Géneros de Microalgas	Empleo
<i>Chaetoceros</i> , <i>Chlamydomonas</i> , <i>Chlorella</i> , <i>Chlorococcum</i> , <i>Cyclotella</i> , <i>Dunaliella</i> , <i>Rhodomonas</i> .	Acuicultura Moluscos, bivalvos, crustáceos, rotíferos, cladóceros, copépodos y peces.
Otros géneros	Alimentación animal Avicultura, ganado porcino, ganado vacuno
	Fertilizantes diversos
Cianobacterias (Fijación de nitrógeno)	Arrozales, y cultivos diversos
Diversos géneros	Productos químicos y energía Producción de hidrógeno, metanización y ácidos orgánicos.

Fuente. Salazar, 2005

7.3.4.5 Biorremoción de metales pesados con microalgas.

En los vertimientos de aguas residuales domesticas e industriales, se encuentran elevadas concentraciones de materia orgánica, y también de desechos inorgánicos, destacándose entre estos unos elementos altamente tóxicos como los metales pesados, causantes de muchas alteraciones en los seres vivos, debido a los problemas que se presentan por la acumulación en la sangre, en el cabello, en el sistema nervioso, en la piel, etc, por lo que la biorremoción de estos metales en sistemas biológicos es posible a través de la aplicación del cultivo de microalgas, ya que presentan diferentes adaptaciones y ciertos mecanismos de tolerancia, los cuales son los responsables de llevar a cabo a través de la membrana, los procesos de adsorción, absorción y desorción. Los metales que más se han estudiados en este tipo de tratamiento son: Cd, Zn, Cu, Ag, P b, Hg, Ni y Cr. Así mismo, los géneros de *Chlorella* y *Scenedesmus*, mostraron la mayor capacidad de remoción de los metales señalados. (Salazar, 2005)

7.3.4.6 Adaptaciones de las microalgas a los efluentes con metales pesados.

- Capacidad para sobrevivir y reproducirse en hábitats contaminados con metales
- Adaptaciones genéticas, dependiendo de cada género a utilizar

- Cambios genéticos o fisiológicos producidos por la exposición a los metales, haciendo más tolerantes algunos géneros a un metal específico.
- Tolerancia a algunos metales (propiedades intrínsecas bioquímicas y fisiológicas), como la bioacumulación en vacuolas de Cd y Zn, siendo no dañinos.
- Resistencia dada por la respuesta de las microalgas al medio ambiente externo y a la exposición de metales.

7.3.4.7 Mecanismos de tolerancia de las microalgas a los efluentes con metales.

- Captación extracelular y precipitación: dada por la composición de las especies de algas, la biomasa total y parámetros fisicoquímicos.
- Impermeabilidad y exclusión: detoxificación en la cual los iones, no atraviesan la membrana celular, por lo que la célula no toma los metales al interior.
- Detoxificación interna: en la cual, los metales se depositan frecuentemente en varios organelos celulares, mitocondrias, vacuolas, núcleo, cloroplastos, cuerpos de inclusión (polifosfatos) y pared celular. **(Salazar, 2005)**

7.3.5 bacterias utilizadas en el proceso de remoción de metales pesados en suelos y aguas.

7.3.5.1 Impacto ambiental de los metales pesados sobre el medio.

El impacto ambiental de los metales pesados en suelos y sedimentos es estrictamente ligado a la diversidad de éstos con componentes del medio ambiente y su respuesta a las condiciones fisicoquímicas y biológicas de su entorno. Los metales son especies químicas no degradables. Por tal motivo, una vez volcados al medio ambiente, sólo pueden distribuirse entre los entornos aire - agua - suelo, a veces cambiando su estado de oxidación, o incorporarse a los seres vivos.

Los procesos de adsorción y la formación de complejos en medios naturales son responsables de que la mayor parte de los vestigios de metales pesados se acumulen en los sólidos en suspensión, incorporándose rápidamente a los sedimentos, donde se presentan los mayores niveles de concentración de estos contaminantes. Como resultado de estas interacciones, los sedimentos juegan un papel muy importante en la regulación de la calidad del agua. Por su parte, las aguas intersticiales, en contacto directo con los sedimentos, actúan como fuente o sumidero de estos contaminantes y en ellas se observan concentraciones intermedias entre las aguas superficiales y los sedimentos. **(Vullo, 2003)**

7.3.5.2 Las bacterias y sus procesos para remoción de metales pesados.

Los estudios más importantes sobre las bacterias han determinado que son microorganismos procariotas, con un tamaño característico de unos pocos micrómetros (por lo general entre 0,5 y 5 μm de longitud) y los cuales están clasificados por sus diversas formas, incluyendo filamentos, esferas (cocos), barras (bacilos), sacacorchos (vibrios) y hélices (espirilos).

A su vez se ha concluido que son los organismos presentes en todos los sectores del planeta, se encuentran en todos los ecosistemas terrestres y acuáticos; su crecimiento no se ve limitado por ello se presentan hasta en los más extremos lugares, como en los manantiales de aguas calientes y ácidas, en desechos radioactivos, en las profundidades tanto del mar como de la corteza terrestre. (Amado, 2013)

La inmovilización de metales pesados en aguas y suelos se está realizando Por intermedio de la acción microbiana, los metales presentes en los minerales resultan extraídos en fase acuosa. Tal es el caso de la obtención de Cu por la oxidación de las menas de Cu_2S (calcocita) a CuSO_4 por intermedio de la acción de las bacterias *Thiobacillus ferroxidans* y *Thiobacillus thiooxidans*.

Dentro de la amplia diversidad microbiana, existen microorganismos resistentes y microorganismos tolerantes a metales. Los resistentes se caracterizan por poseer mecanismos de detoxificación codificados genéticamente, inducidos por la presencia del metal. En cambio, los tolerantes son indiferentes a la presencia o ausencia de metal. Tanto los microorganismos resistentes como tolerantes son de particular interés como captores de metales en sitios contaminados, debido a que ambos pueden extraer los contaminantes. La resistencia o tolerancia experimentada por microorganismos es posible gracias a la acción de diferentes mecanismos. Estos fenómenos son: biosorción, bioacumulación, biomineralización, biotransformación y quimiosorción mediada por microorganismos.

- **Biosorción.** La biosorción es un fenómeno ampliamente estudiado en la biorremediación de diversos metales pesados como el cadmio, cromo, plomo, níquel, zinc y cobre (13, 19, 28, 29). Los microorganismos utilizados como biosorbentes, aislados a partir de ecosistemas contaminados, retienen los metales pesados a intervalos de tiempo relativamente cortos al entrar en contacto con soluciones de dichos metales. Esto minimiza los costos en un proceso de remediación, ya que no requiere el agregado de nutrientes al sistema, al no requerir un metabolismo microbiano activo. (Vullo, 2003)
- **Bioacumulación.** Este mecanismo celular involucra un sistema de transporte de membrana que internaliza al metal pesado presente en el entorno celular con gasto de energía. Este

consumo energético se genera a través del sistema H^+ -ATPasa. Una vez incorporado el metal pesado al citoplasma, éste es secuestrado por la presencia de proteínas ricas en grupos sulfhidrilos llamadas metalotioneínas o también puede ser compartimentalizado dentro de una vacuola, como ocurre en hongos.

- **Biomíneralización.** Los microorganismos son capaces de precipitar metales y radionuclidos como carbonatos e hidróxidos, mediante un mecanismo de resistencia codificado en plásmidos. Este mecanismo aparece por el funcionamiento de una bomba que expulsa el metal tóxico presente en el citoplasma hacia el exterior celular en contracorriente a un flujo de H^+ hacia el interior celular. Esto produce una alcalinización localizada sobre la superficie celular externa y por lo tanto la precipitación del metal pesado (Figura 3.). Otra forma de precipitar los metales es a través de la formación de sulfuros o fosfatos, como resultado de alguna actividad enzimática celular. (Vullo, 2003)
- **Biotransformación.** Esta técnica incluye la acción de un cambio químico sobre el metal pesado, como por ejemplo en el estado de oxidación o metilación. Este proceso de cambio biológico de los metales pesados que resultan tóxicos mediada por enzimas microbianas puede dar como resultado compuestos insolubles o volátiles en agua. El ejemplo más claro es el ciclo del Hg en la naturaleza, donde la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* puede reducir el catión Hg^{2+} a Hg^0 , y otros organismos pueden luego metilarlo dando como producto el CH_3Hg^+ y $(CH_3)_2Hg$, que son volátiles y aún más tóxicos que el propio Hg.

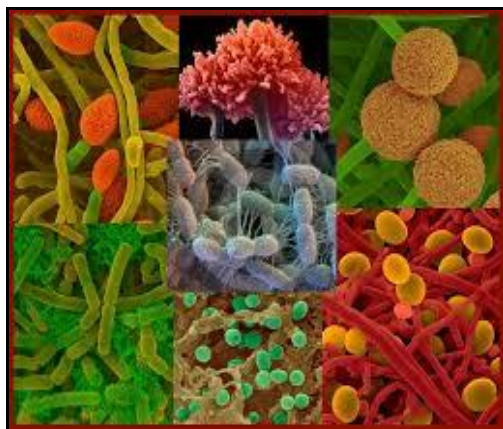


Figura 17. Enzimas microbianas utilizadas para el proceso de biotransformación.

Fuente. Vullo, 2003.

- **Quimiosorción mediada por microorganismos.** En este proceso se llevan a cabo ciertas reacciones por las cuales los microorganismos biomineralizan un metal, generando un depósito primario. Este depósito primario actúa como núcleo de cristalización, con el

subsecuente residuo del metal de interés, fomentando y acelerando así el mecanismo de mineralización.

Un ejemplo de este proceso es el adherido de Fe en un vertimiento a tratar, mediante al acción de bacterias reductoras del sulfato. Estos microorganismos producen sulfuros que precipitan en forma de FeS, sobre la superficie celular. Los otros metales contaminantes utilizan el sulfuro de hierro generado como soporte y cristalizan sobre sus cristales. Luego, aprovechando las propiedades magnéticas del Fe, pueden separarse fácilmente de la fase soluble, descontaminando así el material. (Vullo, 2003)

7.3.6 Tratamientos biológicos.

- ❖ **Procesos in situ.** La principal ventaja de los tratamientos biológicos in situ frente a los ex situ es: el suelo tratado no tiene que ser excavado ni transportado, por lo tanto sus costos son menores, pero tienen como desventaja que requieren más tiempo para poder desarrollarse, dependerá de las características de los suelos y de las aguas para poder evaluar su eficacia. (Ortiz et al., 2007). De igual forma se han desarrollado diferentes tratamientos como:
- **Biorrecuperación.** Este tipo de tratamiento utiliza bacterias, hongos y plantas para degradar y/o minimizar los contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales tóxicos), por medio de su actividad biológica y las reacciones que realizan. (Ortiz et al., 2007).
- **Biodegradación asistida.** Es el proceso por el cual microorganismos como las bacterias y los hongos biotransforman o metabolizan los contaminantes que se encuentran en el recurso suelo y/o el agua, convirtiéndolos en productos finales inocuos. Los microorganismos pueden ser utilizarlos para su propio crecimiento como fuente de carbono y energía (Ortiz et al., 2007). Cuando los microorganismos no realizan el proceso de biorremediación de forma natural este deberá ser asistido para acelerar las reacciones de biodegradación que puedan facilitar el crecimiento y optimizar las condiciones ambientales del área donde se desarrollan para llevar a cabo el proceso de descontaminación.

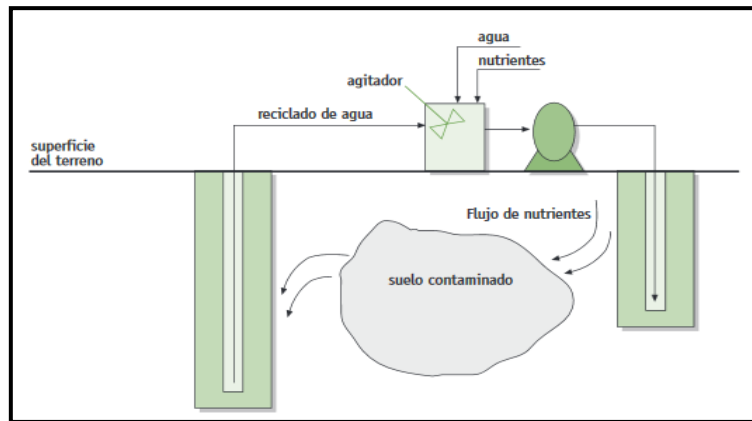


Figura 18. Esquema de biorrecuperación asistida.

Fuente. Ortiz et al., 2007.

- **Biotransformación de metales.** Los microorganismos se relacionan muy bien con los metales por medio de procesos que facilitan su desplazamiento y biodisponibilidad, se pueden evaluar de dos formas: una es la influencia que hacen los metales sobre la población microbiana y sus funciones; y la segunda la influencia que realizan los microorganismos en el proceso de transformación de los metales por medio de técnicas de lavado, transformaciones redox, metilación y consecuente volatilización. **(Gadd, 2004)**

8. CONCLUSIONES.

Mediante el diagnóstico preliminar realizado en la etapa uno, se pudo identificar que las actividades industriales, mineras y agrícolas, constituyen las principales fuentes de contaminación para el recurso agua y suelo con metales pesados, este estudio teórico, generó la búsqueda de los mejores procesos de biorremediación aplicados a la captura eficiente de metales pesados, aportando información confiable para la recuperación de los recursos naturales impactados.

La biorremediación para la recuperación del recurso suelo y agua, contaminados con diversas sustancias químicas, provenientes generalmente de procesos industriales, se constituye en uno de los mecanismos ambientales utilizados hoy en día por la rama científica, para el establecimiento de nuevas tecnologías, que propendan la sostenibilidad de los diferentes componentes de un ecosistema.

Los procesos de biorremediación, son una excelente técnica para la recuperación de suelos contaminados, con metales pesados como Mercurio y Cromo, debido a que se emplean procesos biológicos realizados por las plantas como absorción, transformación, acumulación, extracción, reserva y la degradación de los contaminantes, a esto le sumamos la capacidad de regeneración de las plantas y su facilidad de resistir altas concentraciones de químicos en comparación con otros organismos.

La implementación de técnicas hidropónicas como el pasto vetiver, se constituye en un solución importante a la problemática presentada en esta monografía, como un proceso biológico de biorremediación, dentro del sistema de tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, porque es un método de bajo costo y muy eficiente. En las investigaciones que se tomaron como base para la investigación se ha demostrado que realiza remociones con altos porcentajes de eficiencia en parámetros como: Cobre (54 %), Cromo (45 %), Níquel (44 %), Mercurio (70 %), bajo un tiempo de retención de 4 días.

En la identificación de las técnicas de biorremediación, para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados, se destaca la importancia que tienen las plantas hiperacumuladoras, denominadas así por la facilidad que tienen para tolerar y absorber altas concentraciones de estos elementos químicos. Si estas plantas poseen más de 0.1 % de Níquel, Cobalto, Cobre, Cromo y Plomo o 1% de Zinc en sus hojas, sobre la base del peso seco, pueden ser utilizadas para tal fin.

Analizada la información recolectada para este estudio, se identificó la aplicabilidad que se tiene hoy en día, en diversas técnicas biológicas para la adsorción y posterior disminución de

metales pesados, que se han incorporado al recurso agua o suelo, debido a procesos antropogénicos en mayor proporción.

Este estudio sobre captura eficiente de metales pesados empleando procesos de biorremediación, se constituye en una referencia para el desarrollo de otros trabajos de grado, con el fin mejorar las condiciones actuales de tratamiento para las aguas y suelos contaminados con metales pesados, minimizando el impacto sobre estos recursos y promoviendo el desarrollo sostenible, dentro de un ecosistema en específico.

9. RECOMENDACIONES.

Para implementar un tratamiento en la recuperación de agua y suelos contaminados, con alguna técnica de biorremediación, se recomienda incorporar en el equipo de trabajo los profesionales adecuados, con el objetivo de realizar todas las actividades implicadas en este proceso de la manera más técnica y profesional.

Se recomienda realizar los procesos de biorremediación, donde se ven involucradas plantas y microorganismos vegetales, aplicables a la recuperación de agua y suelos contaminados con metales pesados, pues son métodos de fácil manejo, bajo costo, mantenimiento mínimo y autosostenibles, que se basan en la continuidad de un ciclo para la remediación de los impactos ambientales negativos provocados sobre estos recursos.

Es necesario tener en cuenta mediante un análisis y evaluación de las técnicas de biorremediación a implementar, el cumplimiento de estas con la normatividad ambiental vigente, para la clase de aguas residuales a tratar.

Se recomienda utilizar información actualizada periódicamente, como apoyo para el uso de estas, en la determinación de los métodos de biorremediación más benéficos, y que brinden la capacidad de responder a numerosas preguntas que requiere la consulta y el cotejo de datos muy diversos.

10. BIBLIOGRAFIA

- Abigail, R. (2014). Evaluación de especies acuáticas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola previamente caracterizada en el cantón ambato, provincia de tungurahua. Ingeniería Bioquímica, Facultad de Ciencia E ingeniería en Alimentos. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8455/1/BQ%2056%20.pdf>
- Amado, F. (2013). Las bacterias y su importancia para el medio ambiente. Artículo. p. 5-9
- Beltrano, J. & Gimenez, D. (s.f.). Cultivo de Hidroponía. Facultad de ciencias agrarias y forestales. Universidad Nacional de la Plata. Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Camargo, J.A. (2006). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. Asociación Española de Ecología Terrestre, AEET. Recuperado de: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7673/1/ECO_16\(2\)_11.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7673/1/ECO_16(2)_11.pdf)
- Cepeda, V. (2011). Efectos de la minería y los metales pesados en el agua. Recuperado de: <http://vitaminas16catta.blogspot.com.co/p/efectos-de-la-mineria-en-el-agua.html>
- Chicón, L. (s.f.). Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelos. Trabajo de investigación del Programa de Doctorado en Ingeniería Ambiental. Universidad de Málaga, España. Recuperado de: <http://ambientis.org/lodos.html>
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá – CORPOURABA. (s.f.) Glosario de Términos Ambientales. Recuperado de: <https://www.crq.gov.co/Documentos/GLOSARIO%20AMBIENTAL/GLOSARIO%20AMBIENTAL.pdf>
- Cuido el agua, Org. (2009). Que son las aguas residuales. Recuperado de: <http://www.cuidoelagua.org/empapate/aguasresiduales/aguasresiduales.html>
- Diseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. (2012). Osmosis inversa. Recuperado de: http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf

- DOMIC, Esteban. (1996). Hidrometalurgia: fundamentos procesos y aplicaciones. Vol 2
- Facsa, ciclo integral del agua. (s.f.). Calidad de agua, Metales pesados. Recuperado de: <http://www.facsa.com/el-agua/calidad/Metales%20pesados#.Wcr6P8aQzIU>
- FRTR. (1999b). In situ and ex situ solidification/stabilization. Federal Remediation Technologies Roundtable. USEPA, 401 M Street, S. W., Washington, DC. Recuperado de: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_24.html.
- Fundación Chile. (2017). Tecnologías de intercambio iónico para acondicionamiento y tratamiento de aguas. Artículo. Recuperado de: http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_18.pdf.
- General Water Company Argentina, GWC. (2017). Metales pesados en el agua de consumo. Recuperado de: <https://gwc.com.ar/agua/metales-pesados-agua/>
- Gadd, G. M. 2004. Microbial influence on metal mobility and application for bioremediation. *Geoderma*, 122: 19-119.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM (2014). Informe batimetría Lago de Tota. Grupo de Modelación, Subdirección de Hidrología. 40p.
- Jacott M., 2005. (En línea). Información Básica Sobre Pilas Y Baterías. Greenpeace <http://www.greenpeace.org/raw/content/mexico/prensa/reports/informacion-basica-sobre-pilas.pdf>
- Kaifer, M. J., Aguilar, A., Arana, A., Balseiro, C., Torá, I., Caleyá, J. M. y Pijls, C. 2004. Guía de Tecnologías de Recuperación de Suelos Contaminados. Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Madrid. 175 pp.
- Kasluski, S. F., and Udell, K. S. 2005. Co-injection of air and steam for the prevention of the downward migration of DNAPLs during steam enhanced extraction: an experimental evaluation of optimum injection ratio predictions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 77 (4): 325-347.
- KUCERA J. (2010). Reverse Osmosis. Design, Processes, and applications for Engineers. Co-published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC, Salem, Massachusetts. USA. P. 151
- Lane, T.W. & Morel, F.M. (s.f.). A biological function for cadmium in marine diatoms.

Lázaro, J. (2008). Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados, evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. Departamento de Edafología e Química Agrícola. Universidad de Santiago de Compostela. Tesis doctoral. Recuperado de: https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2540/9788498872026_content.pdf;jsessionid=5387CCA736D33209BB461B7C96DB265D?sequence=1

Metales pesados en el agua de consumo. (2017). Recuperado de: <https://gwc.com.ar/agua/metales-pesados-agua/>

Ministerio de agricultura y pesa, alimentación y medio ambiente. (s.f.). Grandes instalaciones de combustión. Calidad y evaluación ambiental. España. Recuperado de: https://servicio.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/grandes_instalaciones_combustion.aspx

Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C. A., Jerez, C. M., Fischer, G., & Zurita, J. (2011). Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias*.

Mulligan, C. N., Yong, R. N., and Gibbs, B. F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, 60: p.p.193-207.

Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. & Villar, S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia tecnológica. Universidad de Alcalá, España. Recuperado de: https://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf

Rascio, N. & Navari-Izzo, F. (2011). “Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?». *Plant Science*. P.P. 169-181. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945210002402?via%3Dihub>

Reddy, K. R., Admas, J. F., and Richardson, C. (1999). Potential technologies for remediation of Brownfield. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 3 (2): 61-68.

Reed, B. E., Carriere, P. C., and Moore, R. 1996. Flushing of a Pb (II) contaminated soil using HCl, EDTA, and CaCl. *Journal of Environmental Engineering*, 122 (1): 48-50.

REYES, T. Erik, et al. (2006). Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. *Ingenierías*, 9 (31). pp. 59-64. ISSN 1405-0676

Reyes, Y.C., Vergara, I., Torres, O., González, E. (2016) Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Instituto Geofísico. Bogotá D.C., Colombia.

Solano, A. (2005). Capítulo VIII, Estudio de la movilización de metales pesados. Universidad de Murcia. España. Recuperado de: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/11036/Tasm11de16.pdf?sequence=11>

Smith, L. A., Means, J. L., Chen, A., Alleman, B., Chapma, C. C., Tixier Jr., J. S., Brauning, S. E., Gavaskar, A. R., and Royer, M. D. 1995. Remedial Option for Metals-Contaminated Sites. Lewis, Boca Ratón, FL.

Suthersan, S. S. (1997). Remediation Engineering: Design Concepts. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.

Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A-R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C., Selvaradjou, SK., (2004). Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/4, 872 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Vullo, D. (2003). Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Química viva*. p. 6-9

Wildschut. (2013). mercados potenciales de tecnologías de biorremediación con vetiver. Recuperado de: http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/11517/mod_resource/content/1/Mercados%20potenciales%20de%20tecnolog%C3%ADas%20de%20biorremediaci%C3%B3n%20con%20Vetiver.pdf

Woese C., O. Kandler, and M. Wheelis. 1990. Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria and Eukarya. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 87: 4576–4579.

Zevenhoven, R. & Kilpinen, P. (2001). Control of Pollutants in Flue Gases and Fuel Gases. TKK, Espoo.