

FITORREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA A LA
DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES
INDUSTRIALES CON CARGAS DE METALES PESADOS

Sara Victoria Barros Agamez

Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Especialización de Planeación Ambiental y Manejo Integral
de los Recursos Naturales

Bogotá

2018

FITORREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA A LA DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES CON CARGAS DE METALES PESADOS

PHYTOREMEDIATION AS AN ALTERNATIVE FOR DESCONTAMINATION OF INDUSTRIAL WASTE WATER WITH CONTENTS OF HEAVY METALS

Sara Victoria Barros Agamez*

Universidad Militar Nueva Granada, Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales, Bogotá 2018

Resumen

Los procesos y actividades económicas han generado en los últimos años, el aumento de la contaminación del recurso hídrico por metales pesados tales como: plomo, cadmio, arsénico y mercurio, los cuales tienen repercusiones graves en la salud de las personas afectadas, así como en el medio ambiente generalmente por procesos de biomagnificación y bioacumulación. Los metales pesados se denominan como altamente contaminantes debido a su persistencia en el ambiente, su nula degradabilidad y alta toxicidad, por lo cual es primordial la gestión en su descontaminación. La fitorremediación se presenta como una alternativa eficaz para la remoción de ciertos metales pesados, por ejemplo, la planta *Eichornia crassipes* o más conocida como Jacinto o buchón de agua se caracteriza por ser hiperacumuladora de metales pesados, propiedad que la hace altamente elegible para su uso a mayor escala en los esfuerzos de descontaminación de fuentes hídricas.

Palabras clave: Metales pesados, Fitorremediación, Contaminación de agua, Minería, plantas, *Eichornia crassipes*

Abstract

In the last years, Colombia's economic activities triggered the contamination of the water resource with heavy metals. Substances such as lead, cadmium, arsenic and mercury have severe repercussions on the health of people that have been exposed to it as well as on the environment through biomagnification and bioaccumulation processes. Due to its permanent presence in the environment, their null degradability and high toxicity, heavy metals are considered highly polluting.

Phytoremediation is introduced as an effective alternative for the removal of certain heavy metals, for instance, the plant *Eichornia crassipes* or better known as water hyacinth is characterized by being hyper-accumulator of heavy metals, a property that makes it highly eligible for use on a larger scale in an effort to decontaminate water sources.

Key words: Heavy metals, Phytoremediation, water contamination, mining, plants, *Eichornia crassipes*

*Bióloga Ambiental. Trabaja en Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Dirección de Laboratorio e Innovación Ambiental, Mosquera, Cundinamarca. Correo Electrónico: saravbarros@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Las actividades de desarrollo e industrialización son una de las principales razones que conllevan al aumento de la contaminación del medio ambiente a nivel mundial, sin embargo, se encuentra encaminadas a obtener el mayor provecho de los recursos naturales, generando un beneficio económico y de bienestar a la población [1, 2].

La mayoría de las actividades antrópicas a nivel industrial generan contaminación en las diferentes matrices ambientales agua, suelo y aire, las cuales evidencian la falta de controles efectivos sobre los residuos generados en dichos procesos [1]. La contaminación ha generado el deterioro de distintos ecosistemas al presentarse una alta mortandad de las especies que allí se encuentran, debido a las dificultades que se les presentan en el desarrollo de sus ciclos biológicos inducidos por los cambios generados en sus ecosistemas [1, 3].

Sin embargo, esta situación ha generado alerta en aquellas comunidades científicas y sociales, quienes se han dado cuenta de la emergencia de este problema [2].

El agua es uno de los recursos naturales no renovables que más se utiliza y por ende más se contamina. Este recurso está presente para cualquier tipo de actividad realizada no solo por el hombre, sino también para el desarrollo de los diferentes tipos de organismos presentes en cualquier ecosistema. Por lo anterior, y muchas razones más, este recurso es uno de los más importantes, por lo cual, los esfuerzos para su buen uso deben aumentarse [1].

Las afectaciones de los metales pesados son de gran importancia, inicialmente, en

la salud de las personas afectadas, las cuales provocan dentro de otras cosas temblores en las manos, pérdida de memoria y disminución de su coeficiente intelectual, de igual manera, en el ámbito ambiental, se generan afectaciones secundarias debida a las actividades principales que utilizan metales pesados, como la minería la cual causa desplazamiento de especies, tala de bosques, retiro de capa vegetal, bioacumulación de metales en los organismos. [4] [5].

La contaminación del recurso hídrico debido a metales pesados es una de las problemáticas más preocupantes debido a la naturaleza de estos compuestos inorgánicos. Sus características de poca o nula degradabilidad, alta toxicidad y capacidad de bioacumularse y biomagnificarse, generan alta incidencia en la salud de la población colombiana expuesta, además de que sus efectos no son detectables a corto plazo [6]. Existen diversos panoramas a nivel nacional que dan cuenta de la introducción de dichos metales al medio biótico, y estudios en donde se evidencia las altas concentraciones de diferentes tipos de metales en aguas lólicas y lénticas.

En Colombia, el uso de metales pesados en los distintos tipos de actividades industriales como la minería, la agricultura, industria textil, y demás ejemplos, son fuentes de contaminación de metales pesados al recurso hídrico, esta problemática genera gran preocupación debido a que se ha demostrado la presencia de sustancias como cadmio, mercurio, plomo, etc., en distintos tipos de alimentos, generando una afectación directa a la seguridad alimentaria y a la salud pública [5] [6]

El panorama anteriormente descrito genera la necesidad del aumento de

información, inicialmente, de las fuentes de contaminación de dichos metales al recurso hídrico y en segundo lugar las posibles soluciones para la disminución de la disponibilidad de estas sustancias en el medio ambiente. El siguiente artículo es de relevancia debido a que brinda información recopilada y actualizada sobre el estado actual de la contaminación por metales pesados al recurso hídrico, la afectación de distintos metales pesados en la salud humana, información sobre los tipos de descontaminación, principalmente de la fitorremediación y sus casos de estudio, generando así una fuente de información que puede ser utilizada para la toma de medidas pertinentes en el uso de metales pesados y para la toma de decisiones de gestión ambiental.

1. METODOLOGÍA

La metodología de búsqueda de información para el desarrollo de artículos de revisión es de gran importancia, porque soporta una búsqueda específica y de gran calidad, descartando la información poco pertinente y ayudando a la elección de artículos y fuentes bibliográficas más específicas para el cumplimiento del tema a revisar. En este caso, se realizó una revisión descriptiva [7], es decir, la información que se presenta brinda al lector un análisis sobre el estado actual del principal aspecto generado por la industria en cuanto a la generación de aguas de tipo residual, las cuales al no presentar un adecuado manejo conllevan a una contaminación del recurso hídrico con los metales pesados presentes en sus vertimientos. Sin embargo, se encontraron casos de estudio que emplean la fitorremediación como alternativa para la descontaminación de las fuentes

hídricas impactadas con esta clase de vertimientos.

Lo anterior se realizó con la búsqueda de información sobre las actividades (principalmente mineras) realizadas en Colombia caracterizadas por generar contaminación hídrica con metales pesados. Igualmente se describen las características más relevantes de los metales pesados que son más preocupantes debido a su alta toxicidad y biodisponibilidad. Luego, la búsqueda se centró en los casos de estudio de fitorremediación para remoción de metales pesados, generando un contexto del uso de dicha alternativa como solución para la disminución de la contaminación de los efluentes impactados con estos.

Todo lo anterior se desarrolló siguiendo la metodología para la redacción de artículos de revisión [7] en donde se describe las etapas para su realización:

- Definir los objetivos de la revisión.
- Realizar la búsqueda bibliográfica
 - Selección de bases de datos y fuentes documentales.
 - Establecimiento de la estrategia de búsqueda (uso de palabras claves)
 - Especificación de los criterios de selección de documentos. (Son determinados según los objetivos de la revisión) [5]
- Organización de la información
- Redacción del artículo

2. CARACTERIZACIÓN DE METALES PESADOS Y EFECTOS SOBRE LA SALUD

Los metales pesados, son sustancias que se encuentran de forma natural en rocas, suelo, agua y aire, en concentraciones generalmente pequeñas que no ocasionan efectos adversos [3], y presentan diversos usos y aplicaciones en el ámbito natural como en el antrópico. Se definen como elementos químicos con densidades, masa y peso atómico altos; cabe aclarar que muchos de estos metales hacen parte de la dieta humana y son elementos esenciales para el desarrollo normal de los seres vivos, que en muchos casos su deficiencia o exceso pueden llevar a problemas de salud [8, 9]. Los metales pesados no pueden ser sintetizados ni degradados, sin embargo, pueden ser disueltos o transformados por diferentes agentes físicos, químicos o biológicos que les confieren nuevas propiedades que conllevan en ciertos casos al cambio de su toxicidad, biodisponibilidad o forma química, situación que implica según sea el caso, mayor o menor complejidad para su descontaminación [8].

A continuación se describen cuatro de los principales metales pesados utilizados ampliamente en distintas actividades industriales, y que por su concentración y alto impacto en la salud deben ser considerados para su correcto manejo y evaluación [5].

2.1 Plomo (Pb)

El plomo tiene un número y peso atómico de 82 y 207 respectivamente, de coloración azulosa, formador de sales, óxidos y compuestos organometálicos [9]. El plomo es un metal pesado que se

ha usado por muchos años en diferentes tipos de industrias debido a sus características de resistencia a la corrosión, ductibilidad, maleabilidad y facilidad para formar aleaciones con estaño, cobre, arsénico, bismuto, cadmio y sodio [5], [9]. Las principales fuentes de exposición a plomo radican en las actividades de manufactura de municiones, baterías, soldaduras, entre otros. Siendo principalmente las labores del servicio automotriz, torres de petróleo y litografía las actividades que más generan exposición a sus trabajadores a este metal [10]. Anteriormente, el plomo era utilizado ampliamente en la industria de la pintura, generando intoxicaciones masivas debido a su consumo por niños de corta edad que se llevaban a la boca pedazos de pintura desprendida, ya que presentaba un sabor dulce agradable [11].

El plomo es absorbido por medio de la piel, la ingestión e inhalación, generando afectaciones a nivel hematológico (anemia), neurológico como alteraciones visuales, auditivas, en el habla, la memoria a largo plazo; en la parte cardiovascular y renal, retraso en el desarrollo mental e intelectual, hipertensión, entre otros. Cabe aclarar que las afecciones debido a la exposición por plomo se evidencian en mayor magnitud en fetos y niños menores de siete años debido a su inferior masa corporal y al rápido desarrollo de su cerebro [5], [8, 9, 10, 11].

2.2 Cadmio (Cd)

Generalmente, este metal no se halla en la naturaleza en su forma pura, sin embargo, se encuentra abundantemente formando óxidos complejos, sulfuros y carbonatos. Presenta una textura suave y de coloración blanca-azulada, con un

peso atómico de 112 y densidad relativa de 8. Es utilizado en la industria de las pinturas, plásticos, baterías, soldaduras, abonos, reactores nucleares, fotografía, farmacéutica, entre otros [9, 12]. Su amplia utilización se debe a su resistencia a la corrosión, a sus propiedades electroquímicas, y otras características químicas que lo hacen útil en gran variedad de industrias [12].

El uso generalizado de este metal ha generado un incremento de sus concentraciones en el medio ambiente, y debido a que solo el 5% es reciclado y también a que sus características fisicoquímicas le permiten moverse fácilmente en las diferentes matrices ambientales [5].

Las principales fuentes de exposición de este metal son por la ingesta de alimentos, agua contaminada e inhalación de pequeñas partículas [5]. El cadmio en concentraciones elevadas produce afectaciones en la función renal y hepática, ya que tiene la característica de bioacumularse en ambos órganos, produciendo lesiones significativas, disminuyendo la calidad de vida de las personas afectadas [9, 10].

2.3 Mercurio

El mercurio es un metal líquido a temperatura ambiente, de coloración blanca-plateada de número atómico 80 y peso atómico 200, encontrándose generalmente en soluciones-amalgama con otros metales como el oro, plata, platino, uranio, cobre, plomo, sodio y potasio [9].

Este metal ha estado relacionado fuertemente con la historia económica de Colombia, porque es utilizado ampliamente en las actividades de minería aurífera, convirtiéndose en la principal fuente de exposición y

contaminación ambiental por este metal [10].

El mercurio en su estado elemental es poco soluble, lo cual le confiere baja toxicidad al momento de ingestión, sin embargo, causa efectos tóxicos severos por la inhalación de sus vapores [5], [13]. Las características contaminantes y tóxicas de este metal en particular se deben a la forma química en la que se encuentra, por ejemplo, el metilmercurio es uno de los compuestos más tóxicos ya que es fácilmente bioacumulado en la cadena trófica y presenta graves efectos adversos sobre la salud [5], [14].

Este metal realiza la acción tóxica principalmente sobre los sistemas enzimáticos debido a que precipita las proteínas producidas por las células, especialmente las neuronas e inhibe los grupos sulfhidrilo de varias enzimas esenciales [13].

La intoxicación crónica por este metal genera episodios de temblores, taquicardia, hipertrofia de tiroides, gingivitis, cambios de personalidad, cáncer, pérdida de la memoria, delirios, además de daño renal [5], [9].

2.4 Arsénico

En la antigüedad, este metal era utilizado ampliamente como veneno y en plaguicidas antes de la aparición de los compuestos orgánicos actuales, sin embargo, sigue utilizándose actualmente en estos compuestos y es, por el uso de plaguicidas, la mayor fuente de contaminación ambiental generada por este metal [12, 15].

Este metal se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, aunque no existen minas explotables de este compuesto, es obtenido como

subproducto en la obtención de otros metales como cobre o plomo [15].

Una de las propiedades que le da característica al arsénico de ser altamente tóxico es la persistencia de este en las zonas contaminadas, tiempo que puede alargarse en años si no es tratado adecuadamente [15]. Este metal está catalogado, en su forma inorgánica, como cancerígeno, aumentando el riesgo de dicha enfermedad en pulmón, piel, vejiga, hígado, riñón y próstata [16]

3. PROBLEMÁTICA CONTAMINACIÓN HÍDRICA EN COLOMBIA POR METALES PESADOS

Existen diversas actividades industriales que generan aspectos ambientales de tipo residual, entre los cuales se encuentra la contaminación de efluentes con metales pesados. Como se expuso anteriormente, los metales pesados como el plomo, mercurio, arsénico y cadmio tienen usos en gran variedad de actividades y productos que son fácilmente encontrados en la cotidianidad, desde pinturas, plásticos, hasta plaguicidas, siendo elementos esenciales para procesos industriales en la producción de diferentes bienes y servicios [4, 8-16]. Sin embargo, es importante resaltar el papel de las industrias que generan altas descargas de estos contaminantes al recurso hídrico en el panorama nacional, destacando aquellos procesos que son causantes de las elevadas concentraciones de algunos de estos metales en los efluentes y afluentes más importantes del país.

3.1 Actividades industriales contaminantes: Estudios de caso.

De las diferentes actividades industriales que contaminan el recurso hídrico de Colombia, se destaca la minería como principal fuente generadora de aguas residuales industriales con altas cargas de metales pesados, diferentes estudios corroboran la presencia de estos contaminantes en el agua, en el año 2017 se realizaron mediciones con espectroscopía de absorción atómica con horno de grafito a 21 muestras de agua de lluvia, en el municipio de Barrancas, departamento de la Guajira; en este estudio se evidencia la presencia de metales pesados en las muestras de agua lluvia, debido a los procesos de minería a cielo abierto para la extracción de carbón presentes en esta zona del país, generando contaminación a nivel atmosférico por el material particulado que es liberado en dicha actividad [16].

La lluvia en este caso ayuda a limpiar la atmósfera de estos contaminantes, por lo cual, y debido al ciclo hidrológico del agua, ciertas concentraciones (partes por millón ppm) de estos metales pesados que se encuentran en la atmósfera terminan en ríos, lagos, mares y demás fuentes hídricas cercanas a la zona donde se practica la minería a cielo abierto. Encontraron que las concentraciones de metales pesados en las muestras de agua lluvia, especialmente de Cd, son mayores a los valores permisibles para el consumo humano, según las directrices de calidad de agua para consumo humano dispuestas en la resolución 2115 de 2007 [16]. Es importante destacar que, aunque La Guajira es el departamento del país que ocupa el tercer lugar en cuanto a ingresos por regalías debido a

actividades como la minería del carbón, no se han evidenciado, inversiones necesarias para suplir las necesidades básicas de la población, siendo la falta de agua potable la situación que más afecta a la comunidad de este departamento [17]. Todo lo anterior agrava aún más la problemática, debido a que, como se demostró en el estudio, el agua lluvia, que en muchas ocasiones es recolectada por la población para uso doméstico, esta contaminada con metales pesados que a largo plazo pueden incidir en la salud de las comunidades de La Guajira, porque esta se bioacumula en él organismo.

Otro estudio, también realizado en La Guajira, demostró la presencia de metales pesados como Cobre (Cu) y Zinc (Zn) en concentraciones mayores a las permitidas por normas nacionales (Resolución 2115/2007 y decreto 1594/1984) e incluso internacionales (Resolución CONAMA 20/1986) [18].

Muestras de agua tomadas a lo largo de un sector de la playa de Riohacha demuestran dicho comportamiento y los autores explican que la procedencia de esos metales es debido a las actividades antrópicas principalmente la minería y la agricultura (lixiviados de plaguicidas) ejercidas en las cercanías del río Ranchería que desemboca en el mar [18, 19].

En el caso del Mercurio, se han realizado varios estudios, en uno de ellos, se analiza el contenido de este metal en muestras de cabello de la población cercana a minas de oro encontradas a los alrededores de Caimito, Sucre. Explican que el metal es principalmente consumido debido a procesos de bioacumulación y biomagnificación en los peces obtenidos del río San Jorge, dieta principal de esta población [14].

Un estudio conducido por Sánchez y compañía, recopila la información de distintos estudios realizados en Colombia sobre la presencia de metales pesados en las diferentes matrices ambientales, se destacan los estudios realizados en la cuenca del Atlántico, del Orinoco y del Pacífico, en donde se tiene como común denominador la problemática de la minería de oro artesanal, que genera grandes cantidades de lixiviados que terminan en los cuerpos hídricos, generando afectaciones tanto ambientales como de salud debido a las altas concentraciones de dicho metal pesado en el recurso hídrico [20].

Los metales pesados contaminantes del agua también pueden provenir de otras actividades como procesos de metalurgia, producción de compuestos químicos, descargas de residuos domésticos, operaciones de dragado, lixiviados de lavado de maquinaria, lixiviados de agricultura, etc [20]. Con respecto a la situación anterior, una de las cuencas con mayor importancia es la del Río Bogotá, recurso que es reconocido por su alta carga contaminante y es uno de los cuerpos de agua que mayor concentración de distintos tipos de metales pesados contiene [5]. Esta problemática es producida a lo largo de toda la cuenca, pero principalmente en la parte media, donde es fuente para la actividad agrícola de la sabana de Bogotá, actividades que se realizan de forma extensiva y generan lixiviados con altas cargas de plaguicidas que en muchos casos no son controlados de manera adecuada. De igual manera actividades de curtiembres realizadas en la zona de Villa Pinzón y San Benito agregan cargas importantes de estos contaminantes al río Bogotá [5].

4. Métodos de remoción de metales pesados del agua

Las características contaminantes de los metales pesados, como su alto potencial de bioacumulación, persistencia y alta toxicidad [5, 6, 8, 9], hacen de gran importancia la investigación de las diferentes soluciones para los procesos que descontaminan las matrices ambientales de metales pesados.

4.1 Técnicas convencionales de remoción de metales pesados del recurso hídrico

Los procesos de eliminación de metales pesados convencionales de aguas residuales industriales son variados, pero se pueden clasificar en 5 grandes grupos:

4.1.1 Filtración por membrana: Como su nombre lo indica, el agua a tratar pasa a través de una capa de materiales específicos que permite la retención de metales pesados. Es altamente eficiente, requiere poco espacio, no es selectiva y es fácil manipulación. Dentro de este tipo de filtración se encuentra la electrodiálisis, osmosis inversa, nanofiltración (tamaño de poro 0.1 nm-0.001 μm) y ultrafiltración (tamaño de poro 0.001-0.1 μm) [21, 22]

4.1.2 Adsorción: Es una técnica que presenta varias ventajas, dentro de las cuales se destacan la remoción de amplia variedad de contaminantes, puede ser selectiva dependiendo del tipo de adsorbente a utilizar, presenta alta capacidad y cinética rápida. Dentro de este grupo se encuentra el Carbón Activado, arcillas, biopolímeros, zeolitas,

perlas de sílice o nanotubos de carbono, que sirven como superficie adsorbente de contaminantes [21, 22, 23]

4.1.3 Precipitación Química: Es el proceso más utilizado debido a que es económico, a su fácil manipulación y es selectivo, sin embargo, los costos de mantenimiento son altos debido a la alta generación de lodos, en este proceso se utiliza sustancias químicas que reaccionan con los contaminantes para precipitarlos y removerlos fácilmente del agua a tratar [21].

4.1.4 Electrocoagulación: se realiza por medio de un recipiente que tiene una fuente de corriente y varios electrodos que aportan iones desestabilizadores de los coloides creados por los contaminantes en el agua en tratamiento [21].

4.1.5 Coagulación-floculación: En este método, se desestabiliza los coloides de contaminantes por medio de sustancias coagulantes, para luego aglomerarlos por medio de la atracción de los compuestos floculantes adheridos a los coloides desestabilizados [21, 24].

4.2 Técnicas no convencionales: Biorremediación

Una de las alternativas no convencionales para la eliminación de contaminantes, como los metales pesados, es la biorremediación o biorrecuperación. El término biorremediación fue acuñado a principios de la década de los '80, y proviene del concepto de remediación, que hace

referencia a la aplicación de estrategias fisicoquímicas para evitar el daño y la contaminación en diferentes matrices ambientales. Los científicos se dieron cuenta que era posible aplicar estrategias de remediación que fuesen biológicas, basadas esencialmente en la observación de la capacidad de los organismos de degradar, eliminar o transformar de forma natural ciertos compuestos contaminantes [25].

En la primera mitad del siglo XX, se desarrollaron métodos sofisticados para el tratamiento de contaminantes, tales como los lechos bacterianos, lodos activados o la fermentación anaerobia y desde 1960, se han seguido incluyendo nuevos métodos y procesos para la degradación de determinados tipos de compuestos bajo la categoría de procesos de tratamiento biológico [2].

La biorremediación utiliza varios procesos de recuperación que degradan, transforman, eliminan o disminuyen la toxicidad de contaminantes orgánicos o inorgánicos a través de la actividad biológica natural de organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.), sin embargo hay varios autores que se refieren a la biorremediación como los procesos de degradación de sustancias tóxicas por parte de los microorganismos, y que cuando este proceso es realizado por plantas se denomina fitorremediación [25, 26].

En los casos que se utilizan microorganismos heterotróficos para los procesos de biorremediación, se utilizan procesos metabólicos que transforman hidrocarburos y otros compuestos orgánicos e inorgánicos de forma aeróbica utilizando el oxígeno como aceptor final de electrones o anaeróbicamente hasta obtener productos como dióxido de carbono,

agua y fuentes de alimento para sustentar su crecimiento y reproducción [27, 28].

Cabe anotar que estos procesos se encuentran de forma natural y han sido adoptados por el hombre para realizar la misma función a gran escala en sitios de contaminación específicos para organismos que realicen procesos metabólicos a los compuestos presentes en la zona de biorremediación [28, 29].

4.2.1 Ventajas y desventajas

La biorremediación es un proceso en el cual se interviene el suelo y el agua para poder realizar procesos que ayuden a recuperar estos medios de algún tipo de contaminación. Como todo tratamiento, presenta algunas ventajas y desventajas principales que se presentan a continuación:

Ventajas:

- Generalmente solo se originan cambios físicos menores sobre el medio, es decir, es una técnica de bajo impacto ambiental.
- Cuando se usa correctamente no se produce efectos adversos en la biota local del sitio contaminado.
- Es una solución más sencilla, menos costosa y más completa que las tecnologías convencionales actuales [30].

Desventajas:

- Para muchos tipos de contaminación, estos procesos no han sido determinados.
- Su aplicación en el mar es de mayor dificultad y en general no es viable por la inestabilidad del medio.
- El tiempo para la acción de los organismos es largo.

- Su implementación es específica [27, 30].

4.2.2 Fitorremediación

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración y/o la peligrosidad de diversos compuestos orgánicos e inorgánicos, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas. La fitorremediación utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar distintos tipos de contaminantes [31, 32].

Se han identificado una amplia diversidad de especies que se emplean para este fin. Algunas de ellas, debido a su gran capacidad para acumular metales pesados, reciben el nombre de hiperacumuladoras [31].

Las fito tecnologías se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición [31].

Todo lo anterior genera, que la fitorremediación sea especialmente útil para su aplicación en superficies de gran extensión, que presenten contaminantes inmóviles, aunque los procesos de recuperación son a largo plazo [32].

4.2.3 Tipos de fitorremediación

Existen diferentes tipos de fitorremediación, dependiendo del mecanismo que la planta biorremediadora utilice para la

descontaminación de los compuestos, ya sea en suelo o agua [33].

Medios de contención:

- Rizofiltración
- Fitoestabilización
- Fitoinmovilización

Medios de Eliminación:

- Fitodegradación
- Fitoextracción
- Fitovilatilización [33]

Sin embargo, el proceso comúnmente utilizado para la fitorremediación de aguas contaminadas es el de rizofiltración, proceso en el que la planta extrae los contaminantes por medio de la raíz. Las plantas a utilizar se cultivan previamente en medios hidropónicos, y cuando el sistema radicular está bien desarrollado, se disponen en el sistema a tratar, generalmente aguas contaminadas con metales pesados, y allí absorben y acumulan dichos compuestos. A medida que las raíces se van saturando, las plantas son retiradas y dispuestas finalmente [33].

5. ESTUDIOS DE CASO-FITORREMEDIAÇÃO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES CONTAMINADAS CON METALES PESADOS

Varios estudios se han realizado con el fin de determinar la efectividad de la fitorremediación en aguas contaminadas por metales pesados, uno de estos es el realizado por Guevara, et. al [34], en donde utilizó la rizofiltración de diferentes especies de plantas como pasto y alfalfa para disminuir las concentraciones de cobre, cadmio y cromo de muestras de efluentes líquidos de cianuración. Encontró que, con el uso de 21 plantas

de pasto, logro una remoción del 99,9% de cobre, 85% de cadmio y 30% de cromo por un tiempo de 30 días, igualmente obtuvo para el mismo tratamiento, pero con alfalfa porcentajes de remoción de 99.6% para cobre, 80% de cadmio y 41% de cromo, teniendo en cuenta que para el día 15 ya se habían alcanzado resultados similares a los obtenidos en el día 30 [34].

Otro estudio que presenta la relevancia de la fitorremediación de metales pesados es el realizado por Jaramillo y Flores [32], donde tomaron muestras de agua de procesos industriales mineros y utilizaron las especies *Eichornia crassipes* (Buchón o Jacinto de agua) y *Lemna minor* (Lenteja de agua) para la realización de los procesos de fitorremediación. Se obtuvo, luego de una duración de 15 días, que la especie *Eichornia crassipes* presentaba mejor porcentaje de absorción (29.5%) de mercurio, a comparación de la lenteja de agua. Igualmente obtuvieron que el porcentaje de remoción en el tratamiento donde combinaron ambas especies no fue mayor al del tratamiento del buchón de agua solamente, por lo cual concluyeron que ambas especies pueden realizar la extracción de metales pesados sin necesidad de estar en presencia de otros tipos de plantas [32].

De igual forma, se utiliza el jacinto de agua para la remoción de Cadmio y Mercurio en el estudio realizado por Poma y Valderrama [35]. En este caso describen la acción fitoextraedora del buchón de agua, la cual recoge y acumula los metales pesados en la parte aérea de la planta, la cual es caracterizada como hiperacumuladora. Se obtuvieron valores de absorción de 6.41% en 7 días y un porcentaje de remoción de 63.4% en tres días para el

cadmio. Mientras que para el mercurio se obtuvo un porcentaje de absorción de 15.23% en un día y de remoción 91.8% en ocho días [35].

Por último, el estudio realizado por Ballesteros [36], indica el uso de la planta *Azolla filiculoides* para el tratamiento de agua contaminada con Cadmio en un tratamiento y con Plomo en otro. Realizo nueve tratamientos con cada metal, en donde disponía a la planta a diferentes proporciones de los metales tóxicos. Encontró que las concentraciones óptimas para presentar la mayor remoción de metales son de 3 ppm obteniendo el 81.67% para cadmio y el 86.67% para plomo luego de 15 días de exposición [36].

Los resultados obtenidos en los estudios anteriormente descritos demuestran la efectividad de la fitorremediación de metales pesados. Cabe anotar que muchos estudios con características similares a los expuestos utilizan plantas acuáticas que son características de ecosistemas de humedales. Estos organismos son distinguidos por su rápido crecimiento, y en muchos casos son considerados como plaga, ya que en estos ecosistemas enriquecidos de nutrientes pueden llegar a ocupar el espejo de agua [37, 38, 39]. Se evidencia el amplio uso del buchón de agua como especie fitorremediadora, como adsorbente de plomo y cromo [37], níquel [38], cadmio [39] entre otros.

6. CONCLUSIONES

La contaminación del recurso hídrico debido a vertimientos generados por las diferentes industrias en Colombia han generado gran preocupación por el alto índice de cuerpos acuáticos con concentraciones de metales pesados

que superan los límites permisibles nacionales según lo dispuesto en la resolución 2115/2007 y el decreto 1594/1984 e incluso en normas internacionales como la resolución CONAMA 20/1986. Se evidenció algunos de los metales pesados más comunes y las consecuencias devastadoras que generan no solo en el ambiente si no también en la salud de las personas que están directa o indirectamente involucradas en estas actividades.

De igual manera, es preocupante que las actividades generadoras del mayor porcentaje de emisiones y lixiviados contaminantes con metales pesados provienen de los procesos mineros, especialmente la minería aurífera, debido a su naturaleza genera grandes cantidades de residuos tóxicos que finalmente llegan a las cuencas y los cuerpos de agua. El panorama es más crítico debido a la falta de control de parte de las autoridades ambientales. Sin embargo, hay varias técnicas que permiten la recuperación del recurso hídrico, por lo cual la fitorremediación se presenta como una buena alternativa para los procesos descontaminantes de metales pesados en aguas, proceso que ha demostrado alta eficiencia a bajo costo y que puede ser aplicada de forma extensiva y de forma sencilla.

Es importante resaltar las características hiperacumuladoras de las plantas provenientes de ecosistemas de humedal, como *Eichornia crassipes*, *Lemna minor* y *Azolla filiculoides*, propiedades que las hacen realmente atractivas para su uso en procesos de fitorremediación. Igualmente se destaca que son organismos con altas tasas de reproducción, que en muchos casos

generan problemáticas de eutrofización en los ecosistemas en los que se desarrollan. Por lo anterior, es aún más conveniente, el uso de dichas plantas para procesos intensivos de fitorremediación, dando solución a dos problemas ambientales.

Todo lo anterior demuestra que se debe poner mayor atención a estos procesos amigables con el ambiente que son una alternativa bastante eficaz para una problemática de gran magnitud en el territorio colombiano.

Bibliografía

- [1] T. Panayotou, R. Faris, E. Uribe, J. Duque y E. Galarza, Competitividad y Contaminación industrial en la región Andina, M. D. Valle, Ed., Quito: Corporación Andina de Fomento, 2003.
- [2] I. Araujo, N. Angulo, C. Cárdenas, M. Mendez, M. Morante y M. Machado, Biorremediación de suelos con consorcio bacteriano, compostaje y fertilización, Zulia, 2004.
- [3] C. García, J. Moreno, M. T. Hernández y A. Polo, «Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo,» *Ciencia y Medio Ambiente*, pp. 125-138, 2002.
- [4] V. C. Trujillo y L. Navarro, *Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Mercurio Producto de la Minería Aurífera (artesanal y pequeña escala)*, Manizales, 2016.
- [5] Y. Reyes, I. Vergara, O. Torres, M. D. Díaz y E. González, «CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA,» *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 16, nº 2, pp. 66-77, 2016.
- [6] A. Madero y J. Marrugo, «Detección de metales pesados en bovinos, en los valles de los ríos Sinú y San Jorge, departamento de Córdoba, Colombia,» *Rev.MVZ Córdoba*, vol. 16, nº 1, pp. 2391-2401, 2011.
- [7] J. Guirao-Goris, A. Olmedo y E. Ferrer, «El artículo de revisión,» *Revista Iberoamericana de Enfermería Comunitaria*, vol. 1, nº 1, pp. 1-25, 2008.
- [8] C. P. E. Revilla, Interviewee, *Contaminación por metales pesados*. [Entrevista]. 2009.
- [9] L. Londoño, P. Londoño y F. Muñoz, «LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL,» *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 14, nº 2, pp. 145-153, 2016.
- [10] M. d. A. y. D. Sostenible, «Diagnostico Nacional de Salud Ambiental,» Bogotá, 2012.
- [11] P. Pérez y M. Azcona, «Los efectos del cadmio en la salud,» *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, vol. 17, nº 3, pp. 199-205, 2012.
- [12] A. Vives, L. Zulaica y H. Vives, Impacto Ambiental de los Metales Pesados en Sitios de Juego Infantil, EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL (UTN).

- [13] A. Ramírez, «Intoxicación ocupacional por mercurio,» *An Fac med*, vol. 69, nº 1, pp. 46-51, 2008.
- [14] J. Olivero, B. Johnson y E. Arguello, «Human exposure to mercury in San Jorge river basin, Colombia ž South America,» *The Science of the Total Environment*, vol. 289, pp. 41-47, 2002.
- [15] A. f. t. s. a. d. registry, «Arsénico,» División de toxicología, 2003.
- [16] C. Doria, «Metales pesados ãCd, Cu, V, Pbô en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en La Guajira, Colombia,» vol. 46, nº 2, pp. 37-44, 2017.
- [17] D. Piamba, *Disponibilidad, cantidad y calidad del recurso hídrico en La Guajira en el siglo XXI*, Bogotá, 2014.
- [18] C. Doria y H. Deluque, «Niveles y distribución de metales pesados en el agua de la zona de playa de Riohacha, La Guajira, Colombia,» *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 6, nº 1, pp. 123-131, 2015.
- [19] L. Quintero, E. Agudelo, Y. Quintana, S. GALLO y A. Osorio, « Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos,» *Gestión y ambiente*, vol. 13, nº 3, pp. 51-64, 2010.
- [20] F. Sánchez y S. Corredor, «Universidad Santo Tomás,» [En línea]. Available: <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2939/CAP%C3%8DTULO%20II%20Metales%20Pesados.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [21] D. Caviedes, R. Muñoz, A. Perdomo, D. Rodríguez y I. Sandoval, «Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión,» *Revista Ingeniería y Región*, vol. 13, nº 1, pp. 73-90, 2015.
- [22] Condorchem, «Microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración,» 2018. [En línea]. Available: <https://condorchem.com/es/microfiltracion-ultrafiltracion-nanofiltracion/#>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [23] E. Mendoza, *REMOCIÓN DE Pb (II) DE SOLUCIONES MEDIANTE CARBÓN ACTIVADO: EXPERIMENTOS EN LOTES*, Bogotá, 2012.
- [24] E. Soto, T. Lozano, J. Barbarín y M. Alcalá, «Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos,» *Ingenierías*, vol. 7, nº 23, pp. 46-51, 2004.
- [25] Instituto de bioingeniería aplicada, «Biorremediación: organismos que limpian el ambiente. el cuaderno de porque biotecnología,» 2006. [En línea]. Available: http://ABIUNSA.edu.pe/wp-content/uploads/2013/09/EI-Cuaderno-36_1.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].

- [26] J. Vinardell, «Tema 22. Biorremediación: aspectos generales. Biorremediación de metales pesados, vertidos de petróleo, xenobióticos. Fitorremediación,» 2007. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/112329161/Tema-22Bt-0708>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [27] K. Torres y T. Zuluaga, *BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS*, Medellín, 2009.
- [28] J. Sánchez y J. Rodríguez, «Fundamentos y aspectos microbiológicos,» 2013. [En línea]. Available: Ingenieros de minas, http://ingenierosdeminas.org/docu/documentos/fundamentos_%20biorremediacion.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [29] E. González, «Concepto y estrategias de biorremediación,» *Inge@UAN*, vol. 1, nº 1, pp. 20-29, 2011.
- [30] Gobierno de Canarias Consejería de Medio Ambiente, «DOCUMENTO Nº 10: BIORREMEDIACIÓN,» 2005. [En línea]. Available: http://www.gobiernodecanarias.org/dgse/descargas/pecmar/anejo_09/Doc_10%20Biorremediacion.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [31] A. Delgadillo, C. González, F. Prieto, J. Villagómez y O. Acevedo, «FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN,» *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 14, pp. 597-612, 2011.
- [32] M. Jaramillo y E. Flores, *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (Lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera.*, Cuenca, 2012.
- [33] P. Thangavel y C. Subbhuraam, «Phytoextraction: Role of Hyperaccumulators in Metal Contaminated Soils,» *Proc. Indian natn. Sci. Acad.*, vol. B70, nº 1, pp. 109-130, 2004.
- [34] A. Guevara, E. De la Torre, A. Villegas y E. Criollo, «USO DE LA RIZOFILTRACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES LIQUIDOS DE CIANURACION QUE CONTIENEN CROMO, COBRE Y CADMIO,» *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. S1, nº 2, pp. 871-878, 2009.
- [35] V. Poma y A. Valderrama, «ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS PARA LA FITORREMEDIACIÓN DE CADMIO (II) Y MERCURIO (II) CON LA ESPECIE *Eichornia crassipes* (JACINTO DE AGUA),» *Rev. Soc. Quím. Perú*, vol. 80, nº 3, pp. 164-173, 2014.
- [36] E. Atehortua y C. Gartner, «ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA BIOMASA SECA DE *EICHORNIA CRASSIPES* COMO ADSORBENTE DE PLOMO Y CROMO EN AGUAS,» *Revista Colombiana de Materiales*, nº 4, pp. 81-92, 2013.

- [37] J. Ballesteros, *Determinación de la eficacia de Azolla caroliniana como matriz de hiperacumulación de metales pesados cuantificados*, Quito, 2011.
- [38] P. Bress, D. Crespo, P. Rizzo y R. La rossa, «Capacidad de las macro tas Lemna minor y Eichhornia crassipes para eliminar el níquel,» *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* , vol. 38, nº 2, pp. 153-158, 2012.
- [39] M. Guevara y L. Ramírez, «Eichhornia crassipes, SU INVASIVIDAD Y POTENCIAL FITORREMIADOR,» *La granja: Revista de las ciencias*, vol. 22, nº 2, pp. 5-11, 2015.