



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL FITORREMEDIADOR DEL VETIVER (*Chrysopogon zizanioides*) SOBRE ALUMINIO, CROMO Y COBRE EN LA LAGUNA DE OXIDACIÓN DEL MUNICIPIO DE JERUSALÉN (CUNDINAMARCA).

Ingrith Patricia Rivera Páez

**Universidad El Bosque
Facultad de ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
Bogotá 28 de noviembre de 2018**

Evaluación del potencial fitorremediador de metales pesados del vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la laguna de oxidación del municipio de Jerusalén (Cundinamarca).

Ingrith Patricia Rivera Páez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director (a):

Möritz Velásquez Riaño

Codirector (a):

Diana María Delgado Londoño

Línea de investigación:

Salud Ambiental

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Ambiental

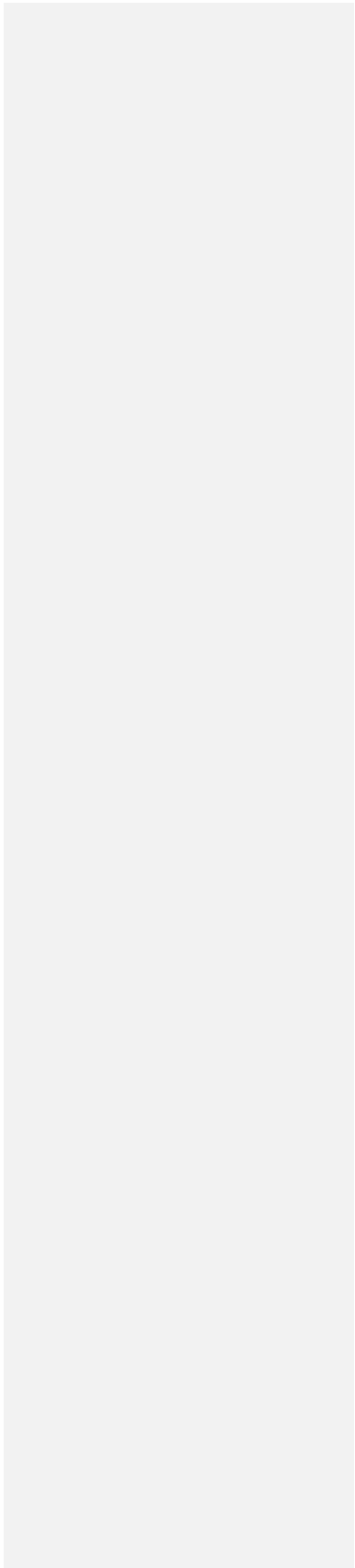
Bogotá, Colombia

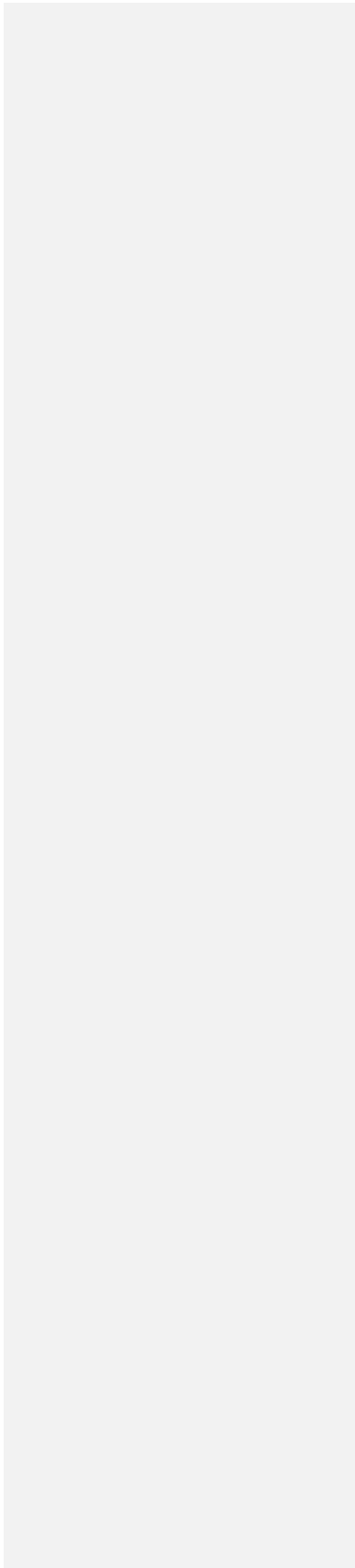
2018

Comentario [DMDL1]: Debe haber un codirector de la CAR como se había estipulado al inicio

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.





(Dedicatoria)

Contenido	
1. Introducción	9
2. Justificación	10
3. Objetivos	12
3.1 <i>Objetivo general</i>	12
3.2 <i>Objetivos específicos</i>	12
4. Marco referencia	13
4.1 <i>Descripción del territorio</i>	13
4.2 <i>Población total y distribución rural y urbana</i>	14
4.3 <i>Marco legal</i>	15
4.4 <i>Marco teórico</i>	16
4.4.1 <i>Estado del arte</i>	16
4.5 <i>Marco conceptual</i>	18
4.5.1 <i>Biotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales</i>	18
4.5.2 <i>Fitorremediación</i>	19
4.5.3 <i>Pasto Vetiver (Chrysopogon zizanioides)</i>	20
4.5.4 <i>Metales pesados</i>	21
5. Metodología	24
5.1 <i>Enfoque, alcance y método de investigación</i>	24
5.2 <i>Método para el Objetivo específico 1: Identificar la tasa de supervivencia de siembra de Vetiver (Chrysopogon zizanioides) en la laguna de oxidación.</i>	24
5.3 <i>Método para el Objetivo específico 2: Determinar la acumulación de metales pesados (Al, Cr, Cu) en raíces y hojas del Vetiver (Chrysopogon zizanioides).</i>	27
5.4.1 <i>Alcance del objetivo</i>	28
5.4.2 <i>Delimitación de la investigación</i>	28
5.4.3 <i>Recolección de información</i>	28
5.4.4 <i>Análisis de datos</i>	29
5.4.5 <i>Evaluación de resultados</i>	29
6. Resultados	30
6.1 <i>Resultados Objetivo específico 1: Identificar la tasa de supervivencia de siembra de Vetiver (Chrysopogon zizanioides) en la laguna de oxidación.</i>	30

6.2	Resultados Objetivo específico 2: Determinar la acumulación de metales pesados (Al, Cr, Cu) en raíces y hojas del Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>).	30
6.2.1	Aluminio	31
6.2.2	Cromo	34
6.2.3	Cobre	36
6.3	Resultados Objetivo específico 3: Comparar sistemas de tratamiento de aguas residuales y su eficiencia para la remoción de metales pesados.	38
7.	Discusión de resultados	40
8.	Conclusiones	42
9.	Recomendaciones	43
10.	Bibliografía	43

Listado de figuras

Figura 1. Ubicación del municipio de Jerusalén y sus veredas en el Departamento de Cundinamarca	13
Figura 2. Distribución de las plantas control en el estanque de agua limpia.	25
Figura 3. Distribución de las plantas expuestas en la canastilla.	26
Figura 4. Metodología para la determinación de tasa de supervivencia.	27
Figura 5. Metodología para la determinación de la acumulación de metales pesados.	28
Figura 6. Concentración de Al (ppm) en la raíz control vs. la raíz tratada.	32
Figura 7. Concentración de Al (ppm) en las hojas control vs. las hojas tratadas.	32
Figura 8. Concentración de Al (ppm) en la raíz control vs. las hojas control.	33
Figura 9. Concentración de Al (ppm) en la raíz tratada vs. las hojas tratadas.	34
Figura 10. Concentración de Cr (ppm) en la raíz control vs. la raíz tratada.	34
Figura 11. Concentración de Cr (ppm) en las hojas control vs. las hojas tratadas.	35
Figura 12. Concentración de Cr (ppm) en la raíz control vs. las hojas control.	35
Figura 13. Concentración de Cr (ppm) en la raíz tratada vs. las hojas tratadas.	36
Figura 14. Concentración de Cu (ppm) en la raíz control vs. la raíz tratada.	36
Figura 15. Concentración de Cu (ppm) en las hojas control vs. las hojas tratadas.	37
Figura 16. Concentración de Cu (ppm) en la raíz control vs. las hojas control.	37
Figura 17. Concentración de Cu (ppm) en la raíz tratada vs. las hojas tratadas.	38

Listado de tablas

Tabla 1. Población del municipio de Jerusalén (Cundinamarca) 1993.	14
Tabla 2. Población del municipio de Jerusalén (Cundinamarca) 2005.	14
Tabla 3. Límites permisibles de metales pesados en aguas residuales domésticas en Colombia	16
Tabla 4. Comparación de las variables control vs. tratamiento en T_0 y T_f	31
Tabla 5. Comparación entre las alternativas de Fitorremediación y PTAR.	39

Resumen

En la actualidad la contaminación de las fuentes hídricas es una de las problemáticas más abordadas en las agendas gubernamentales nacionales e internacionales ya que es un recurso de gran importancia para el correcto funcionamiento de los ecosistemas. El objetivo de este trabajo consistió en evaluar el potencial fitorremediador de metales pesados (Al, Cu y Cr) del Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la laguna de oxidación del municipio de Jerusalén (Cundinamarca). Teniendo en cuenta lo anterior se evaluó la tasa de supervivencia de las macrófitas, la acumulación de los metales pesados por medio de ICP –MS y la comparación de varios métodos para la remoción de este tipo de sustancias. Se encontró que la tasa de supervivencia de las plantas fue del 100% luego de 3 meses de tratamiento y los dos órganos vegetales (hojas y raíces) evaluados, se comportaron de manera diferente con respecto a la acumulación de cada metal, el Cr presentó mayores concentraciones en la raíz y las hojas, mientras que Al y Cu únicamente en las hojas. Finalmente, se concluye que el Vetiver podría ser una buena alternativa para la remoción de ciertos metales pesados cuando son utilizados en sistemas como las lagunas de oxidación.

Palabras clave: metales pesados, Vetiver, fitorremediación, laguna de oxidación, Jerusalén.

Abstract

Keywords: heavy metals, Vetiver, phytoremediation, oxidation lagoon, Jerusalem

The contamination of water sources is one of the most addressed issues in the national and international government agendas since it is a resource of great importance for the proper functioning of ecosystems. The objective of this work was to evaluate the phytoremediation potential of heavy metals (Al, Cu and Cr) of Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) in the oxidation lagoon of the municipality of Jerusalem (Cundinamarca). Taking into account the above, the survival rate of the macrophytes, the accumulation of heavy metals by means of ICP-MS and the comparison of several methods for the removal of this type of substances were evaluated. It was found that the survival rate of the plants was 100% after 3 months of treatment and the two plants organs (leaves and roots) evaluated, behaved differently with respect to the accumulation of each metal, the Cr presented higher concentrations in the root and leaves, while Al and Cu in only the leaves. Finally, it is concluded that Vetiver could be a good alternative for the removal of certain heavy metals when they are used in systems such as oxidation lagoon.

1. Introducción

La contaminación de las fuentes hídricas es una de las problemáticas más abordadas en las agendas gubernamentales nacionales e internacionales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 2010) ya que es el recurso de gran importancia para el desarrollo de la vida en el planeta (Aliseda, 2016). En Colombia más del 50% del recurso hídrico tiene problemas de calidad y no es apropiada para consumo, ni para riego, a esto se le suma que la oferta hídrica no se distribuye de forma equitativa (Beleño, 2011).

La contaminación del recurso hídrico se debe a las actividades asociadas a desarrollo económico como lo son: agricultura, la industria, el uso doméstico, entre otras. Los vertimientos asociados a las actividades humanas representan una amenaza para los seres vivos, ya sea a corto o largo plazo dependiendo de su concentración; siendo las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) el método más utilizado para mitigar esta problemática. Los métodos convencionales suelen ser costosos, con limitada eficiencia y pueden generar cambios en las propiedades del suelo y agua, afectando a su vez a los seres vivos que viven y dependen de ella. Debido a lo anterior, se plantean nuevas tecnologías como la fitorremediación, la cual, es una alternativa de bajo costo y sustentable, que utiliza plantas para remover, reducir, transformar, degradar, volatilizar o estabilizar los contaminantes (Delgadillo et al., 2011).

En el presente trabajo se presenta la evaluación del Vetiver como un potencial fitorremediador de aguas residuales contaminadas con metales pesados; tomando como caso de estudio la laguna de oxidación del municipio de Jerusalén (Cundinamarca). El proceso se llevó a cabo en tres fases: la primera fue la evaluación de la tasa de supervivencia de las plantas, luego se realizó la cuantificación de la concentración de los metales pesados en el Vetiver y finalmente, se realiza una comparación desde los aspectos social, económico y ecológico entre dos procesos que son utilizados para la depuración de este tipo de aguas, uno convencional con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y uno con un sistema alternativo empleando la fitorremediación.

Planteamiento del problema

La preocupación por la protección del ambiente es un fenómeno común en las culturas del mundo, que a partir de la década del 70 se manifestó en diversos foros internacionales. Uno de los más importantes fue la denominada Cumbre de la Tierra, celebrada en Rio de Janeiro en 1992, donde quedaron establecidos los principios universales que deben regir el desarrollo armónico de los países para mantener la sostenibilidad del planeta (Guía técnica de producción más limpia, 2005).

El agua es uno de los recursos vitales que se ve cada vez más amenazado debido a la contaminación ambiental y deterioro de su calidad en Colombia. Las razones de dicha contaminación son numerosas, tales como desarrollo industrial, agricultura intensiva, crecimiento exponencial de la población humana y la producción y uso de decenas de miles de sustancias químicas sintéticas entre las principales causas de deterioro (Hespanhol & Helmer, 2001). La contaminación del agua con metales pesados, es un problema tanto para la salud humana como para los ecosistemas, por lo que existe la necesidad de disminuir dichas sustancias en cuerpos hídricos (Reyes & Vergara, 2016).

A nivel global, aquellos países que utilizan las lagunas de oxidación como tratamiento de aguas residuales, lo han estado implementando debido a que han presentado un aumento en las concentraciones de metales pesados presentes en las fuentes hídricas que alimentan las lagunas de oxidación. Este hecho se ha convertido en un riesgo latente para la salud humana debido a sus efectos tóxicos (Tokar et al., 2015). Debido a esto se ha hecho necesaria la implementación de diferentes estrategias que permitan disminuir las concentraciones de estos metales en las fuentes de agua contaminada. Una de las alternativas más utilizadas para mitigar esta problemática es la construcción de PTARs que representan altos costos de construcción, ejecución y mantenimiento y que en principio no están diseñadas para la remoción de metales pesados (Lizarazo & Orjuela, 2013).

En el municipio de Jerusalén (Cundinamarca) se presentan problemas de contaminación en la laguna de oxidación, la cual, está en constante monitoreo por parte de la Corporación Autónoma Regional (CAR) donde se ha encontrado presencia de cadmio, cobre, cromo, hierro, mercurio, níquel, plata, vanadio, y aluminio. Cuando los niveles de estos metales sobrepasan los límites permisibles por la normativa, pueden acarrear consecuencias irreversibles para las aguas superficiales, suelos y biota que se encuentran en el sector. Es por ello que se busca un método viable, económico que contribuya al manejo de los metales pesados en la laguna de oxidación.

2. Justificación

Para disminuir costos en la remoción de metales pesados de las aguas residuales domésticas, se ha buscado otro tipo de sistemas como la fitorremediación, puesto que son sistemas más accesibles y de baja operatividad por parte de pequeñas comunidades. Estos sistemas también son importantes porque pueden contribuir a que los niveles de dichos contaminantes no excedan los límites permisibles establecidos en la normativa nacional para su disposición en fuentes de agua, que busca proteger los ecosistemas en general.

En diferentes países se ha evidenciado la alta tolerancia que tiene el pasto vetiver a condiciones extremas, ya que se puede desarrollar bajo niveles tóxicos de salinidad, acidez, alcalinidad, metales pesados y productos agroquímicos. Por lo anterior, el vetiver podría ser adecuado para el tratamiento de aguas contaminadas con efluentes domésticos. En la actualidad, en Colombia no existen registros de cuantificación de absorción de metales pesados con vetiver en aguas contaminadas con estas sustancias. Así mismo, los estudios sobre fitorremediación con este tipo de plantas en su mayoría han sido enfocado a suelos erosionados, por esta razón es necesario profundizar sobre esta temática en aguas residuales tratadas en lagunas de oxidación, como ocurre en el municipio de Jerusalén.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el potencial fitorremediador del Vetiver sobre Al, Cu y Cr en la laguna de oxidación del municipio de Jerusalén (Cundinamarca).

3.2 Objetivos específicos

- Identificar la tasa de supervivencia de siembra de Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la laguna de oxidación.
- Determinar la acumulación de metales pesados (aluminio, cobre y cromo) en raíces y hojas del Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).
- Comparar sistemas de tratamiento de aguas residuales y su eficiencia para la remoción de metales pesados.

4.2 Población total y distribución rural y urbana

De acuerdo con el censo DANE del año 1993 (tabla 1) y 2005 (tabla 2) se realiza la proyección de la población para el 2018 del municipio de Jerusalén (tabla 3).

Tabla 1. Población del municipio de Jerusalén (Cundinamarca) 1993.

Departamentos y municipios	Total			Cabecera			Resto		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres
Jerusalén	3030	1692	1338	643	301	342	2387	1391	996

Fuente: DANE (1993).

Tabla 2. Población del municipio de Jerusalén (Cundinamarca) 2005.

Departamentos y municipios	Total			Cabecera			Resto		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres
Jerusalén	2.632	1.449	1.183	589	288	301	2.043	1.161	882

Fuente: DANE (2005).

Para la proyección se aplica un método de estimación de población sugeridos por el RAS 2000. El método aritmético supone un crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad y la emigración, la ecuación para calcular la población proyectada es la siguiente:

$$P_f = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} \times (T_f - T_{uc})$$

Donde:

P_f = Población correspondiente al año para el que se requiere realizar la proyección (habitantes).

P_{uc} =Población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes).

P_{ci} = Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes).

T_{uc} = Año correspondiente al último año proyectado por el DANE.

T_{ci} = Año correspondiente al censo inicial con información.

T_f = Año al cual se requiere proyectar la información.

$$Pf = 2632 + \frac{2632 - 3030}{2005 - 1993} * (2018 - 2005)$$

$$Pf(2018) = 2201 \text{ habitantes.}$$

4.3 Marco legal

Este marco consiste en una recapitulación de la normativa vigente, relacionada con el uso y protección del ambiente, más específicamente sobre el uso de plantas en procesos de investigación, calidad del agua y límites permisibles de metales pasados en agua en Colombia, empezando por la Constitución Política de Colombia.

En principio, el contexto ambiental en Colombia se plasma en la Constitución de 1991 (Asamblea Nacional Constituyente, 1991) ya que relaciona en sus artículos el derecho de gozar de un ambiente sano y que la protección de su biodiversidad y su integridad es deber del Estado. La importancia del cuidado del medio ambiente para la población y el uso del recurso hídrico, donde este primará para el consumo humano por encima de cualquier actividad. En el artículo 80, se menciona que el Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Así mismo, en los artículos 79, 80, 88 y 95, se recopila la importancia del medio ambiente, en donde se estipula la obligación de los colombianos de proteger y velar por los recursos culturales y naturales, para conservar un ambiente sano.

En 1992 se lleva a cabo la Cumbre de la Tierra, donde gracias a este encuentro se plantearon los lineamientos que orientaron de manera definitiva uno de los acontecimientos más importantes en Colombia, en materia ambiental, la creación de la Ley 99 de 1993 (Ley N° 99, 1993). Por medio de esta Ley se crea el entonces Ministerio de Ambiente y se ordena el sector público, jerarquizando los diferentes entes encargados de llevar a cabo el cumplimiento de los derechos del ambiente. Es por esto que se crea el Sistema Nacional Ambiental y entidades como las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), con el fin de cumplir los nuevos retos del siglo XXI. En 1996, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible formula el Decreto 1791, en donde se establece el régimen de aprovechamiento forestal. En el capítulo IX se encuentra lo referente al aprovechamiento de productos de la flora silvestre con fines comerciales.

Nueve años después se lleva a cabo la Cumbre Mundial de Johannesburgo, donde se renueva el compromiso político en pro del desarrollo sostenible, mediante el acceso a tecnología moderna, recursos financieros, salud pública, educación, seguridad alimentaria, desarrollo de los recursos humanos y protección de la biodiversidad. Sumado a esto, en 2012 en la Cumbre de la Sostenibilidad o Rio +20 se postulan los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). Como resultado de esta cumbre, se tuvo la Agenda 2030, donde se trató el tema de agua limpia y saneamiento y se establece como objetivo

(número 6) el garantizar el acceso universal al agua potable, segura y asequible para todos en 2030, realizando inversiones adecuadas en infraestructura, proporcionando instalaciones sanitarias y fomentando prácticas de higiene en todos los niveles (PNUD, 2016).

Por esta razón, el país tiene la necesidad de acoplarse a cada uno de esos acuerdos y modificaciones que se van generando y es por esto que se crea la resolución 631 de 2015 (MADS, 2015), donde se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones (Tabla 3).

Tabla 3. Límites permisibles de metales pesados en aguas residuales domésticas en Colombia

Metales	Unidades	Aguas residuales domésticas
Aluminio	mg/L	Análisis y reporte
Cadmio	mg/L	0,10
Zinc	mg/L	3,00
Cobre	mg/L	1,00
Cromo	mg/L	0,50
Hierro	mg/L	Análisis y reporte
Mercurio	mg/L	0,02
Níquel	mg/L	0,50
Plata	mg/L	Análisis reporte
Plomo	mg/L	0,50

Fuente: Resolución 631 (MADS, 2015).

4.4 Marco teórico

4.4.1 Estado del arte

A nivel mundial se han planteado investigaciones para el uso y beneficios del vetiver en diferentes matrices en los que se puede desarrollar.

En el 2018 Panja (India), Sarkar y Datta llevaron a cabo un estudio en el que evaluaron el potencial de fitorremediación del vetiver para eliminar compuestos explosivos y N de efluentes de aguas residuales generados en una instalación de municiones industriales. Los tratamientos sucesivos de vetiver eliminaron DNAN, monóxido de nitrógeno (NQ) y ciclotrimetilentrinitramina (RDX) por 96, 79 y 100%, respectivamente. Más del 95% de N se eliminó por cuatro lotes sucesivos de esta macrófita. Una gran parte de NQ y RDX se translocaron de la raíz al brote. El análisis LC-MS mostró la presencia de productos de transformación de RDX, ciclotetrametilentrinitramina(HMX)(1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetrazocano). Demostrando que la eficiencia de eliminación del vetiver fue mayor con respeto de la concentración inicial.

Roongtanakiat y Akharawutchayanon (2017), determinaron la posibilidad de utilizar el Vetiver para la descontaminación de Cs con respecto a su capacidad de absorción y la distribución en dos tratamientos diferentes. Después de los períodos de cultivo de Vetiver de 3, 6, 9, 12, 15 y 18 d, la actividad del Cs en las soluciones cultivadas disminuyó a 98,0%, 93,2%, 88,6%, 78,1%, 70,7% y 65,5% respectivamente. Estos valores indicaron que el vetiver podría remediar Cs en la solución cultivada en un 2,0%, 6,8%, 11,4%, 21,9%, 29,3% y 34,5% para diferentes periodos de cultivo. Por medio de la señal de luminiscencia foto estimulada (PSL), se observó que el vetiver acumuló más metal en las raíces que en los brotes, por lo tanto, el vetiver podría ser adecuado para la fitoestabilización del suelo contaminado con este elemento absorbiendo una mayor cantidad de Cs cuando el período de cultivo fue más prolongado.

Teniendo en cuenta que el Vetiver es una hierba perenne con raíz profunda y con una alta concentración de biomasa, se realizó una investigación del uso de esta macrófita para el tratamiento de aguas residuales generadas a partir de una cocina institucional. Los investigadores demostraron que el pasto Vetiver tiene una capacidad extraordinaria para soportar condiciones ambientales extremas tales como niveles elevados de sal, acidez, alcalinidad y sodicidad, así como una amplia gama de metales pesados y nutrientes como el nitrógeno (N) y fósforo (P). El diseño experimental piloto incluyó 5 tambores de 130 L de capacidad conectados entre ellos, los cuales fueron llenados con tierra el vetiver fue plantado en cada uno de ellos. Cada tanque tenía una salida en la parte inferior y una entrada en la parte superior. El agua residual se suministró a través de la entrada del primer tanque y se permitió que pasara a través del segundo, tercero, cuarto y quinto tanque y el agua tratada fue recogida a la salida del quinto tanque. Diversos parámetros de calidad del agua como pH, turbidez, acidez, alcalinidad, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de oxígeno (DQO), Oxígeno Disuelto (DO) y *Escherichia coli* se analizaron para las aguas residuales y el agua tratada. Se observó que el tratamiento tuvo un potencial significativo para recuperar las aguas residuales, puesto que fue capaz de eliminar del 80 al 85% de la DBO, del 85 al 90% de la DQO y del 85% del total de *E. coli*. La mayoría de los parámetros de calidad del agua estuvieron dentro de los límites permisibles según ISO 10550-2012 e ISO 2292-1992 (Mathew et al., 2016).

En 2016 Santana y Santos, realizaron una investigación en las aguas del río muerto del cantón Manta (Ecuador) para evaluar la eficiencia del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) ex - situ en la remoción de contaminantes orgánicos, para lo cual se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos utilizando 30, 12 y 2 esquejes de este pasto bajo condiciones hidropónicas y un control; además se utilizó un volumen de trabajo de 20 L de agua del río Muerto (cada ensayo tuvo tres repeticiones). Se monitoreó cada ocho días el OD, la DBO, la turbidez el pH, la salinidad y la remoción de N y P durante cuatro semanas. Como resultados, se confirmó que el agua de este río tienen una alta concentración de materia orgánica en términos de DBO (1975 mg/L), lo cual originó un bajo nivel de OD de 0,51 mg/L. Los esquejes del pasto utilizados en el experimento removieron los contaminantes y aumentaron el OD en todas las unidades experimentales desde la primera semana reflejando su adaptabilidad y desarrollo. Así mismo, tanto el tratamiento A2 (2 esquejes + 20 L), y A3 (12 esquejes + 20 L), mostraron diferencias estadísticamente significativas frente al control para la remoción de DBO a los 15 días. Para la turbidez, se encontraron diferencias significativas a los 8 días. Sin embargo, el tercer tratamiento, A3 resultó muy eficiente en la remoción final de la DBO (72,92%), N (84,09%), P (65,04%) y turbidez (76,76%), y se observó un aumento del nivel de OD alcanzando los 5,04 mg/L.

Jiménez y Vargas (2015) desarrollaron una investigación encaminada a demostrar la eficiencia que puede tener un sistema de fitorremediación de aguas superficiales, para poder disminuir la carga de contaminantes de las aguas provenientes del “Caño Cola de Paro” ubicada en el sector rural del Municipio de Acacias (Meta). Utilizaron Vetiver y para la ejecución del proyecto, se adecuó la zona a trabajar y se realizaron análisis físicos, químicos y microbiológicos periódicamente para determinar el grado de eficiencia del tratamiento propuesto. Según los resultados, esta macrófita trató el agua. Además, se determinó, que la carga orgánica es mayor cuando se presenta precipitación, esto puede ser producto de los vertimientos que se producen a este cuerpo de agua. Adicionalmente, si se tiene en cuenta que aguas arriba del Caño Cola de Pato se presenta actividades ganaderas, agrícolas y las urbanas. Con la implementación del Sistema Vetiver, se obtuvo variaciones en los parámetros medidos. El color, los cloruros, los fosfatos, el hierro, la DQO, y DBO presentaron aumentos entre el 30 y 90%. Por su parte, la turbidez, conductividad, alcalinidad, dureza total, dureza cálcica, Ca, pH, sulfatos, y los Coliformes Totales presentaron un porcentaje de remoción entre el 18 y el 99%. El pasto vetiver no mostró efectividad para la eliminación del aluminio en aguas, pues no hubo variaciones en este parámetro.

En Manizales (Caldas), Aldana (2014) desarrolló un estudio enfocado en verificar cuantitativamente la capacidad de adsorción de Al, contenido en una muestra de agua residual industrial provenientes de una industria metalmeccánica empleando diversas macrófitas (Enea, junco y Pasto Vetiver). Se planteó un diseño experimental por bloques utilizando como variable de respuesta la concentración de Al y como factores, el tipo de planta y la concentración inicial del metal, para realizar comparaciones múltiples entre las diferentes especies e identificar cual presenta una mejor remoción del compuesto de interés. Los resultados obtenidos mostraron que con una concentración de Al al 20% para las especies Vetiver y Junco, se alcanzan las mejores eficiencias de remoción (99 % y 98 %). Al trabajar con concentraciones de Al del 70%, el Vetiver presentó el mejor desempeño, alcanzando remociones del 94%. La máxima adsorción del metal durante el proceso de fitorremediación para todas las especies ocurrió en las primeras 24 h. Basado en el análisis estadístico se concluyó que el pH inicial del agua es un factor relevante en el desempeño del proceso. Finalmente, se presentan algunas recomendaciones donde se destaca que, aunque los procesos de fitorremediación no son soluciones definitivas y completas, son una alternativa económica que puede ser usada de forma sinérgica con otras tecnologías que se emplean para la disminución de los impactos ambientales negativos y el cumplimiento de la legislación colombiana respecto a los objetivos de calidad del recurso hídrico.

4.5 Marco conceptual

4.5.1 Biotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales

A nivel internacional, la primera organización que escribió sobre biotecnología y la definió fue la Organización para la Cooperación y el desarrollo Económico (OECD) en 1982. Para la misma, la biotecnología es la aplicación de principios de la ciencia y la ingeniería mediada por agentes biológicos en la producción de bienes y servicios. Dos décadas después, la Organización de la Industria Biotecnológica (BIO) da a conocer un nuevo concepto y percepción donde indica que es el uso de

procesos biológicos para resolver problemas o hacer productos útiles. Sin embargo, la definición a emplear en el presente este trabajo es la de la (EPA) Environmental Protection Agency (por su sigla en inglés) de los Estados Unidos, que indica que son las técnicas en donde se utilizan organismos vivos, o partes de organismos, para producir una variedad de productos (desde medicinas hasta enzimas industriales) para mejorar plantas o animales, desarrollar microorganismos que pueden remover sustancias tóxicas de cuerpos de agua o servir como insecticidas (EPA, 2016).

La Biotecnología Ambiental es una base importante para el tema relacionado con la conservación del ambiente, es importante tener en cuenta que estos procesos se deben llevar a cabo de una forma multidisciplinar con el fin de tener una visión global de todos los aspectos involucrados incluidas las variables. Como ya se mencionó anteriormente, la biotecnología permite formular soluciones a estas problemáticas implementando sistemas, mecanismos o involucrando los seres vivos en este proceso. El concepto de biotecnología ambiental, debe tenerse en cuenta debido a que parte de materiales biológicos tangibles, así como el conocimiento de los procesos biológicos en el ambiente pueden ser transferidos a otros campos de trabajo como la explotación de la biodiversidad, las aplicaciones industriales de los procesos biológicos y la mitigación y control de la contaminación (Cerón, 2011).

Esto quiere decir que la aplicación de esta disciplina sería útil en la transformación de contaminantes, que en este momento son catalogados como tóxicos, a un estado en el que se reduzca su impacto ambiental convirtiéndolos en una sustancia no tóxica o generando materiales que sean biodegradables y de esta forma implementar una producción más limpia (al generar menos desechos) (Cerón, 2011).

Algunos sectores en los que se han utilizado los seres vivos son (Sepúlveda, 2013):

En la industria, se emplean las levaduras para los procesos de fabricación de cerveza, vino, sake, pan y alcoholes industriales. Por último, las bacterias que producen el ácido nítrico, los géneros como *Gluconacetobacter* y *Acetobacter* que convierten el etanol en ácido acético y el género *Bacillus* que es productor de antibióticos (gramicidina, bacitracina, polimixina), proteasas e insecticidas.

En la agricultura se reconocen las funciones que pueden desarrollar los microorganismos del suelo como formadores de humus y fijadores de nitrógeno, también son usados como control biológico en las granjas cultivadoras. Así mismo, se conoce que se emplean plantas modificadas genéticamente para la absorción de sustancias tóxicas generando menor impacto ambiental, y también se ha utilizado la biotecnología ambiental para depurar el agua, recuperar los suelos y purificar el aire por medio de técnicas como la biorremediación, la biolixiviación, el compostaje entre otras.

4.5.2 Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica que hace parte de la biorremediación, la cual consiste en el uso de especies vegetales que tienen la capacidad de tolerar, adsorber, absorber y/o volatilizar altas concentraciones de contaminantes. Las principales características son: su facilidad al ejecutar, el bajo costo a diferencia de otras técnicas, es ecoeficiente, y para su puesta en marcha, operación y mantenimiento no se utilizan sustancias químicas nocivas. La aplicación de esta técnica está basada en

las prácticas comunes agroquímicas que buscan llegar al estado óptimo que debe tener el recurso hídrico y suelo (Cordero, 2015).

La explotación masiva, sin discriminación de los recursos naturales y la producción de desperdicios urbanos han aportado la presencia de metales pesados en cantidades importantes al ambiente, que han incitado numerosos efectos sobre el equilibrio de los ecosistemas y la salud de las especies. Los metales pesados presentan mayor complejidad con respecto a los contaminantes orgánicos ya que no son biodegradables, para controlar estos impactos es recomendable la fitorremediación que facilita la absorción y el metabolismo de los contaminantes, ya sea de forma directa (en las plantas) o por microorganismos asociados a la rizósfera (Merld, et al., 2004).

La mayoría de los vegetales no tienen la capacidad de acumular metales, esto es resultado de una respuesta evolutiva de algunas plantas, a ambientes extremos. Entre las plantas acumuladoras de metales, hay especies que poseen mayor capacidad de acumulación. A estas plantas se les denomina hiper-acumuladoras (Sepúlveda, 2013).

4.5.3 *Pasto Vetiver (Chrysopogon zizanioides)*

Esta planta proviene de la India específicamente de los pantanos. Se puede categorizar tanto en hidrófita, como xerófita, una vez establecida puede resistir sequías, inundaciones y prolongados períodos de anegamiento, para su cultivo es necesario realizarlo cuando el sol está más presente ya que requiere altos requerimientos de la luz solar y en sombra superior a 40% crece más rápido o muere. Debido a su lugar de origen tropical, se desarrolla de forma óptima a temperaturas de 20-30°C. Aunque puede tolerar temperaturas aéreas de -15°C a 40°C. *C. zizanioides*, se caracteriza por tener atributos particulares en su morfología, es una planta herbácea, gramínea, perenne que se desarrolla en grandes macollos a partir de una masa radicular muy ramificada y esponjosa. Se conoce que la manera más usual de propagar esta planta es por medio de la separación de brotes maduros de la macolla de Vetiver, obteniendo los esquejes a raíz desnuda para luego ser plantados en forma inmediata en el campo o en contenedores, desarrollando los tallos bien erguidos y rectos de 0,5 a 1,5 m (Orihuela, 2007). Por otra parte, no es una planta invasiva ni tampoco se considera una “mala hierba” principalmente por el hecho de que es poco frecuente el florecimiento de la misma; incluso cuando lo hace sus semillas son estériles. Además, no es una planta estaloniforme, gracias a esto las raíces no invaden las áreas adyacentes de otras plantas, como si lo hacen otras de tiempo gramíneas como la bermuda y los kikuyu (Grimshaw, 2003)

El crecimiento del vetiver es muy rápido una vez plantado, puede llegar a 2 m de altura y con raíces de 1 m de largo en 6 meses, la madurez se presenta a los 18-24 meses con raíces hasta de 4 m; puede llegar a vivir más de 50 años. El sistema radicular es poderoso, profundo y muy resistente por esto tanto la parte aérea como subcutánea crea una barrera eficaz brindando firmeza que atrapa sedimentos, disminuye la velocidad del agua, distribuye el escurrimiento del agua en un rango más amplio. El sistema radicular es muy fuerte desarrollándose verticalmente hasta una profundidad de 4 m, aunque es importante resaltar que lo más frecuente es de 2 m o 3 m, se extienden alrededor de la planta solo 0,5 m aproximadamente. Las hojas son sencillas, largas y rígidas con una medida de 0.3 m – 1 m de largo y 4-10 mm de ancho, el vetiver puede alcanzar una altura de 2 m (Wildschut, 2013).

En Colombia se ha logrado adaptar a temperaturas bajas que llegan hasta -4°C , como en el caso de cultivos de agentes propagadores en Aguadas Caldas y Balboa (Risaralda) (Muñoz, 2016). El vetiver al ser una especie propia de pantano muestra un elevado nivel de evapotranspiración que puede llegar a 30 mm/día y además un umbral de salinidad de 8 dS/m (Truong, 2004).

Las raíces se desarrollan menos en medio acuático, sin embargo, presentan una masa densa de raíces finas con un diámetro promedio de 0.5-1mm. La rizósfera ofrece de esta manera una superficie específica (m^2/m^3) grande para el establecimiento de una masa microbiana activa. Se conocen 12 especies de Vetiver. La única especie que se distribuye mundialmente, son cultivares estériles de la *C. zizanioides*, estos son del sur de la India. Los principales cultivares estériles de desarrollo rápido son: Vallonia (Sudáfrica), Monto (Australia), Sunshine (Estados Unidos) y Guiyang (China). Estos cultivares son genéticamente idénticos, por lo que pueden considerarse nombres comerciales o nombres que indican su procedencia (Wildschut, 2013).

Para el proceso de propagación de esta planta es importante tener en cuenta las características mencionadas anteriormente, la mejor forma es por esquejes que aseguran tener la planta con las mismas características genéticas. Un esqueje es definido como un material de propagación asexual de pedazos de tallos y hojas (20 cm de alto) con una pequeña cantidad de raíces es importante que no exceda los 5 cm. En el caso que no se disponga de esquejes. Se tiene como principales propósitos de la propagación: tener plantas proveedoras de esquejes en parcelas planas y uniformes y la conservación del suelo y agua y contrarrestar la contaminación y otros usos múltiples (Orihuela, 2007).

Durante décadas el vetiver se ha aplicado a las áreas agrícolas en todo el mundo con el fin de reducir la escorrentía y la erosión, así como estabilizar las pendientes. En los últimos años considerables investigaciones y numerosos proyectos han demostrado el éxito de la utilización de vetiver para tratar diversas formas de aguas residuales incluyendo lixiviados de vertederos, alcantarillado doméstico y aguas residuales industriales (Donaldson & Grimshaw, 2013).

El éxito del tratamiento de las aguas residuales depende de una serie de factores que empiezan con la planta. Truong Van y Pinners, en *The Vetiver System*, categorizan estos factores en tres diferentes tipos de características morfológicas, fisiológicas y ecológicas; características morfológicas de vetiver se presta a utilizar en el tratamiento de aguas residuales. Las características de los tallos y las raíces hacen que esta planta sea extremadamente resistente a la erosión y altamente tolerante a las condiciones de flujo en aplicaciones de tratamiento de aguas residuales donde la planta puede ser parcialmente sumergida; es resistente a las sequías y las inundaciones, así como tolerante a las temperaturas y las condiciones del suelo incluyendo el pH, la alcalinidad y otros factores adicional es resistente a herbicidas. Por último, las características ecológicas de vetiver son importantes a considerar en relación con la aplicación del tratamiento (Donaldson et al., 2013).

4.5.4 Metales pesados

C. Garbisu y Alkorta afirma que un metal pesado se define como un elemento que tiene propiedades metálicas como ductilidad, conductividad, densidad, estabilidad como catión y especificidad a ligando" citado en (Beltrán & Gómez, 2015). Bajo la denominación de metales pesados se incluye a un conjunto de 65 elementos de la tabla periódica con un número atómico mayor a 20 y con una alta densidad

relativa mayor o igual a 5g/cm^3 en su forma elemental. Estos presentan diferentes características fisicoquímicas y biológicas, se encuentran formando complejos como iones libres o participando en reacciones redox que resultan potencialmente tóxicas para los organismos.

Los metales pesados se clasifican en tres clases de acuerdo a sus funciones y efectos biológicos: 1) metales esenciales con funciones biológicas conocidas que son requeridos en cantidades traza como nutrientes para la vida de los organismos (Na, K, Mg, Ca, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo y W); 2) metales tóxicos, los cuales pueden ejercer un efecto nocivo aun en bajas concentraciones (Ag, Cd, Cr, Sn, Au, Hg, Ti, Pb, Al y metaloides como Ge, As, Sb y Se) y 3) los metales no esenciales, que no son tóxicos y sus efectos biológicos son desconocidos (Rb, Cs y Sr) (Roane & Pepper, 2005)

Así mismo, algunos metales pesados son requeridos como micronutrientes para las plantas ciertos metales de transición son esenciales para algunos procesos celulares, ya que ejercen funciones catalíticas en determinadas reacciones bioquímicas o en conversiones metabólicas, actúan como micronutrientes o cofactores enzimáticos y pueden estabilizar estructuras proteicas, facilitar el transporte de nutrientes y la neutralización y control de la presión osmótica (Van Assche et al., 1990).

A continuación, se describen cada uno de los metales pesados analizados en este trabajo: aluminio, cobre, cromo, plomo y zinc.

4.5.4.1 Aluminio (Al)

Este es el metal más abundante en la corteza terrestre, se encuentra en sectores importantes de la industria como producción de alambres (sulfato de aluminio), en el tratamiento de aguas (óxido de aluminio), en abrasivos y revestimiento de hornos. En productos que se utilizan comúnmente como aditivos para alimentos, desodorantes y cosméticos. Es importante mencionar que el aluminio no puede ser degradado en el ambiente y solamente puede cambiar de forma o adherirse o separarse de partículas. Para el caso del agua y suelo la mayoría de los compuestos que contienen aluminio no son muy solubles en agua a menos que el agua sea ácida o muy alcalina. Algunas personas con enfermedades renales almacenan una gran cantidad de aluminio en su cuerpo y, a veces, contraen enfermedades de los huesos o del cerebro que pueden deberse al exceso de aluminio. Algunos estudios muestran que las personas expuestas a niveles altos de aluminio pueden presentar la enfermedad de Alzheimer, pero en otros estudios esto no se ha determinado que sea cierto. No se sabe con certeza si la exposición a este metal esté relacionada con la enfermedad de Alzheimer (ATSDR, 2005).

4.5.4.2 Cobre (Cu)

Este metal es poco soluble en agua, sales o soluciones que sean moderadamente ácidas; sin embargo, se pueden disolver en ácido nítrico, sulfúrico y soluciones básicas en hidróxido de amonio o carbonato. El cobre es esencial para las plantas, animales y seres humanos, lo que quiere decir que es necesario para la vida en concentraciones conocidas; se pueden absorber por medio de los alimentos o bebidas que se

ingieran o por respiración. Se puede obtener cobre de las fuentes naturales en el viento, partículas volcánicas incendios forestales, brisa marina y procesos biogénicos, Así mismo por actividades antropogénicas se encuentra en las fundidoras, industria del hierro, estaciones de energía, en mayor proporción por los jales de las minas de Cu y lodos de drenajes. Para la fabricación de fertilizantes, bactericidas, fungicidas, sistemas de distribución de agua, preservadores de maderas, galvanoplastia entre otros. Por último, en la atmósfera se puede encontrar por las partículas sólidas ya que a través de la sedimentación, deposición seca y lluvia que llega al suelo. En el agua se halla resulta del intemperismo del suelo y las descargas por parte de la industria y plantas de tratamiento de lodos (Marrugo, 2011). 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 (Zevenhoven & Kilpinen, 2001). La exposición aguda por ingestión del sulfato de cobre puede producir necrosis hepática y muerte. La exposición crónica de alimentos conservados en recipientes de cobre genera lesiones hepáticas en niños. Puede generar diversas alteraciones como: anemia hipocrómica, disminuye la tasa de crecimiento, diarreas, cambios de coloración del pelo o de lana, ataxia neonatal, alteración del crecimiento, infertilidad temporal e insuficiencia cardiaca (Londoño et al., 2016)

4.5.4.3 Cromo (Cr)

El cromo es un elemento que normalmente se encuentra en las rocas, animales, plantas y en el suelo; en estos medios se puede encontrar después de ser liberado por industrias involucradas en galvanoplastia, curtido de cuero, producción de textiles y procesos de manufactura o en casos de quema de gas natural, petróleo o carbón. Es importante mencionar que el cromo no permanece en la atmósfera, este se deposita en el suelo y agua. Como consecuencia de la presencia de este elemento en el agua y suelo puede generar cambios en su estructura principal (ATSDR, 2005). Los efectos adversos del cromo para la salud dependen, especialmente, del grado de valencia de este elemento en el momento de la exposición y de la solubilidad del compuesto. Las únicas formas de importancia en toxicología son el cromo VI y el cromo III. Una exposición de corta duración al cromo III puede causar irritación en los ojos y en el tracto respiratorio, pero si se presenta inhalación se puede presentar tos. El cromo (VI) es un peligro para la salud de los humanos, sobre todo para la gente que trabaja en la industria del acero y textil. La gente que fuma tabaco también puede tener un alto grado de exposición a este elemento. El cromo (VI) es conocido porque causa varios efectos sobre la salud: cuando se encuentra como compuesto en los productos de la piel, puede causar reacciones alérgicas, por ejemplo, erupciones cutáneas; después de ser respirado el cromo (VI) puede causar irritación de la nariz y sangrado de la misma (Molina et al. 2010). El cromo VI se reduce en cromo III intracelularmente en las mitocondrias y el núcleo, reductores intracelulares lo degradan en el citoplasma. La reducción intracelular genera intermediarios reactivos como cromo V, cromo IV y cromo III, así como radicales libres hidroxilo y oxígeno; estas formas reactivas del cromo son susceptibles de alterar el ADN. Se elimina por vía renal el 60%, en menor grado por heces (vía biliar), cabello, uñas, leche y sudor. En la orina encontramos fundamentalmente cromo III formando un complejo con el glutatión, pues el cromo VI es reducido en gran parte a cromo III (Cuberos, Rodríguez & Prieto, 2009; ATSDR, 2006; EPA, 1998).

5. Metodología

Este capítulo inicia con la explicación de la forma de identificar la tasa de supervivencia de la siembra de plantas y la metodología para la determinación de metales pesados por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) que es aplicado en la Dirección de Laboratorio e Innovación Ambiental (DLIA) de la Corporación Autónoma Regional (CAR). Por otra parte, al ser una investigación, esta posee un “conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema” (Sampieri et al., 2014), y por lo tanto es necesario definir un enfoque, un alcance y un método de investigación.

Se plantearon tres etapas para el desarrollo del proyecto, cada una posee actividades que en conjunto y de manera continua llevaron a concluir el objetivo general. En cada uno de los objetivos, se mostrará un cuadro metodológico en el cual se plantea cada etapa con sus respectivas actividades.

5.1 Enfoque, alcance y método de investigación

Esta investigación cuenta con un enfoque mixto, donde se presentan características del enfoque cuantitativo y cualitativo. En primera medida, la determinación de metales pesados por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) requiere de una fase de recolección de datos y de esta manera, obtener mediciones numéricas de las concentraciones en la planta. Sin embargo, en la comparación de alternativas ambientales también cuenta con un enfoque cualitativo debido a que los resultados requieren interpretación del autor, cuando los resultados son utilizados para determinar la mejor opción de remediación de aguas residuales para los municipios.

Adicionalmente, esta monografía cuenta con un alcance investigativo, en el estudio de caso ya que se desarrolla con la práctica empresarial y el tiempo está sujeto a la fecha de inicio laboral y fecha de entrega final de la monografía.

5.2 Método para el Objetivo específico 1: Identificar la tasa de supervivencia de siembra de Vetiver (*Chrysopogon zizanoide*) en la laguna de oxidación.

El trabajo experimental se realizó en las instalaciones de la PTAR, ubicada dentro de la Vereda El Hatillo del municipio de Jerusalén, el seguimiento y control del trabajo en general se desarrolló en el Laboratorio Ambiental de la CAR de Cundinamarca.

Para este objetivo, fue necesario el desarrollo de un **conteo por cuadrantes**. Esta etapa se realizó en dos fases, en primer lugar, la definición del proceso para el conteo de las plantas que estaban expuestas en la laguna de oxidación y en segundo lugar, la aplicación de una fórmula para determinar la tasa de supervivencia de las plantas, teniendo en cuenta el color (las plantas amarillas se consideraron muertas y las verdes vivas) (Ecuación 1):

Comentario [DMDL2]: Vereda el Hatillo

$$\text{Tasa de supervivencia (\%)} = \frac{(\text{número de plantados} - \text{número de individuos no sobrevivientes})}{(\text{número de plantados})} * 100$$

Fuente: (Moula & Rahman, 2008)

Para medir la tasa de supervivencia del pasto Vetiver se tuvo en cuenta la cantidad de plantas sembradas: en un estanque dividido en 12 secciones se sembraron las plantas control en agua limpia proveniente de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) y en una canastilla dividida en 18 secciones se sembraron las plantas que fueron expuestas en la laguna de oxidación. Cada una de las secciones tenía triples macollos (DLIA, 2018) (Figuras 2 y 3). En la figura 4 se puede apreciar la metodología resumen para el objetivo específico No. 1.

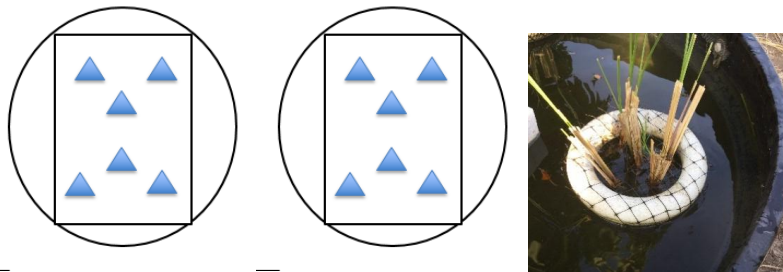


Figura 2. Distribución de las plantas control en el estanque de agua limpia.

Fuente: Autor, 2018

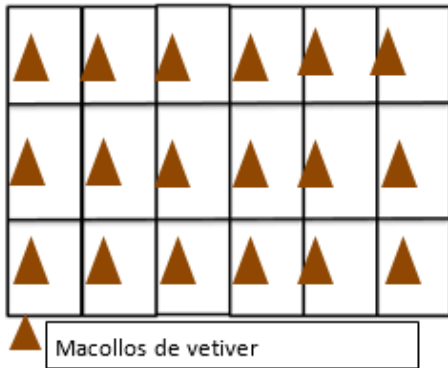


Figura 3. Distribución de las plantas expuestas en la canastilla.

Fuente: Autor, 2018

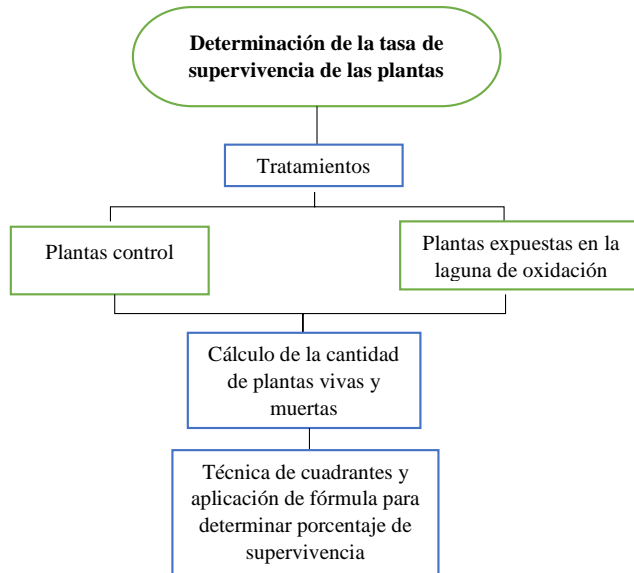
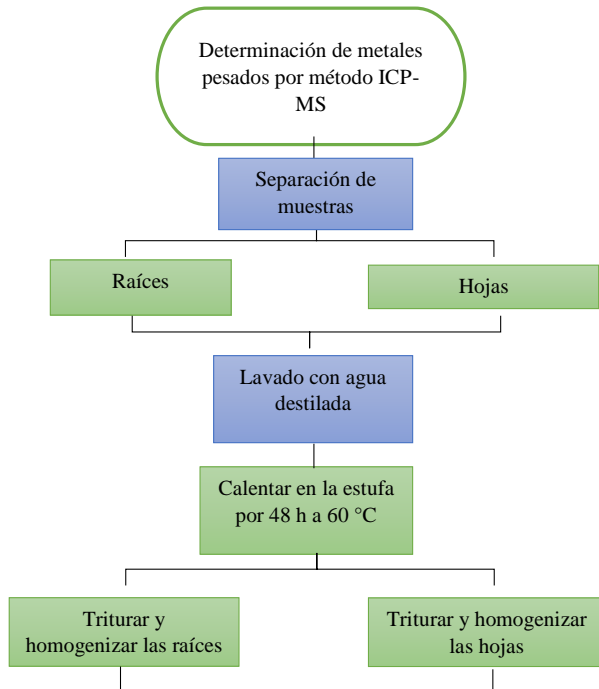


Figura 4. Metodología para la determinación de tasa de supervivencia.

5.3 Método para el Objetivo específico 2: Determinar la acumulación de metales pesados (Al, Cr, Cu) en raíces y hojas del Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).

Este método consiste en determinar la acumulación de metales pesados (Al, Cr, Cu) en raíces y hojas del Vetiver (*C. zizanioides*) mediante la medición y cuantificación de los analitos por ICP-MS. Esta técnica, tiene como objetivo determinar la concentración de metales pesados en aguas potables, superficiales y residuales. Se compone por dos partes principales, el tratamiento de las muestras y su posterior medición, estas deben ser complementarias para obtener los resultados de calidad.

En la etapa de la preparación de las muestras se debe realizar una digestión en horno microondas, esta se inicia realizando la división del tejido vegetal en raíces y hojas luego se lava con agua destilada y posteriormente se lleva a la estufa por 48 h a 60 °C. El tejido vegetal ya seco se tritura y homogeniza, para luego en un balón aforado de 50 mL adicionar 5 mL de HNO₃ más 0,5 g de muestra (raíz u hoja) y se completa a volumen con agua destilada. La digestión en el horno microondas se lleva a cabo por 25 min a 200 °C para luego ser filtrada para su posterior lectura (DLIA, 2018) (Figura 5).



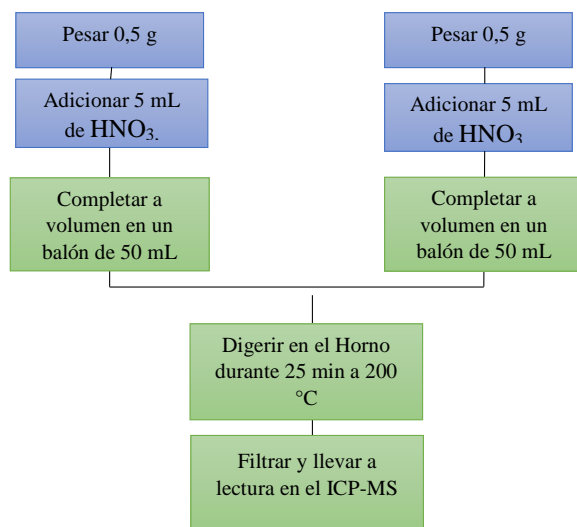


Figura 5. Metodología para la determinación de la acumulación de metales pesados.

5.4 Método para el objetivo específico 3: Comparar sistemas de tratamiento de aguas residuales y su eficiencia para la remoción de metales pesados.

5.4.1 Alcance del objetivo

El estudio de alternativas de manejo de aguas residuales de Jerusalén pretende comparar dos opciones de tratamiento que estén enmarcadas en los objetivos de calidad esperados para las fuentes hídricas del sector, concentrados en el documento CAR, Acuerdo 0043 del 17 de octubre de 2006, objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá para el año 2020.

5.4.2 Delimitación de la investigación

Se toma en comparación la alternativa de fitorremediación propuesta en el presente estudio y el sistema de tratamiento PTAR como tratamiento convencional. Esta comparación de sistemas se realiza para localizar las ventajas y desventajas, en cuatro aspectos: ecológico, económico, social y técnico.

5.4.3 Recolección de información

Se realizó una visita a la zona de estudio para realizar el reconocimiento y registros fotográficos. Adicionalmente se obtuvo información bibliográfica actualizada.

5.4.4 Análisis de datos

Conocida la información preliminar, el análisis de datos inicia con la configuración de los antecedentes en una matriz en donde se consignaron las variables que se evaluaron en cada aspecto: ecológico, económico, social y técnico. Luego se exponen las consideraciones teóricas de algunos autores, sobre fitorremediación y PTAR para finalmente comparar los sistemas.

5.4.5 Evaluación de resultados

Para el presente estudio se tomaron como parámetros los metales pesados (Al, Cu y Cr). La eficiencia está soportada en los resultados aportados por cada uno de los autores y por sus recomendaciones.

5.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los ensayos de determinación de la concentración de metales pesados se obtuvo el valor neto, obtenidos al restar el valor inicial y final. El valor neto de los metales pesados en la planta vetiver se introdujeron en el programa InfoStat, usando el análisis de varianza ANOVA de un factor incluyendo el Test no paramétrico para comparaciones múltiples. Se usó la Test de Wilcoxon para muestras dependientes para el análisis estadístico de los tratamientos y sus respectivos controles. Por otro lado, se estableció el nivel de confianza del 95% ($P \leq 0,05$).

6. Resultados

6.1 Resultados Objetivo específico 1: Identificar la tasa de supervivencia de siembra de Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la laguna de oxidación.

Recolección de material vegetal: en esta etapa se recolectó el material vegetal presente en una canastilla en la laguna de oxidación y dos canastillas en el estanque que contenía agua limpia, se realizó la limpieza del material para su disposición en el laboratorio. Cualitativamente se observó si las plantas estaban vivas o muertas (se observó la coloración, si las hojas estaban marchitas, si no aumentó el tamaño, etc.). Luego aplicando la ecuación 1, se obtuvo que la tasa de supervivencia tanto de las plantas control como de las plantas tratadas fue similar (100%).

Plantas control

Número de plantados: 12

Número de individuos muertos: 0

$$Tasa\ de\ supervivencia\ (\%) = \frac{(12 - 0)}{12} * 100$$

$$Tasa\ de\ supervivencia\ (\%) = 100$$

Plantas expuestas

Número de plantados: 18

Número de individuos muertos: 0

$$Tasa\ de\ supervivencia\ (\%) = \frac{(18 - 0)}{18} * 100$$

$$Tasa\ de\ supervivencia\ (\%) = 100$$

6.2 Resultados Objetivo específico 2: Determinar la acumulación de metales pesados (Al, Cr, Cu) en raíces y hojas del Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).

Los valores obtenidos luego de realizar el análisis de laboratorio se presentan en la Tabla 4, en donde se encuentra la comparación entre la concentración de metales pesados en el T0 (tiempo inicial) frente a la concentración del Tf (tiempo final) de los grupos control y expuestos (tratamiento) en las raíces y hojas del Vetiver. Como se puede observar, en el grupo control en raíz disminuyó la concentración de Cu; sin embargo, todos los metales presentaron una disminución en la concentración en las hojas. En el grupo de plantas expuestas, solo el Cr aumento tanto en la raíz como en las hojas. El Al y el Cu se comportaron de forma similar, con un aumento en la concentración en la raíz y una disminución de la concentración en las hojas

Tabla 4. Comparación de las variables control vs. tratamiento en T₀ y T_f.

	Control (T ₀ vs T _f)		Tratamiento (T ₀ vs T _f)	
	Raíz	Hoja	Raíz	Hoja
Aluminio	↑	↓	↑	↓
Cromo	=	↓	↑	↑
Cobre	↓	↓	↑	↓

Convenciones: (=) no se presentaron diferencias, ↑ aumento en la concentración y ↓ disminución de la concentración.

A continuación, se presentan las figuras de los datos netos que se obtuvieron de la resta del dato de la concentración final y el dato de la concentración inicial de cada metal. Es importante mencionar que cuando el dato final es menor que el dato inicial, el dato representado tendrá un valor negativo. Lo cual podría deberse a un fenómeno de liberación del metal.

6.2.1 Aluminio

En la Figura 6, se observa que la concentración de Al de las raíces del grupo control frente al de las plantas expuestas fue mayor en este último grupo, presentando diferencias significativas ($P \leq 0,05$).

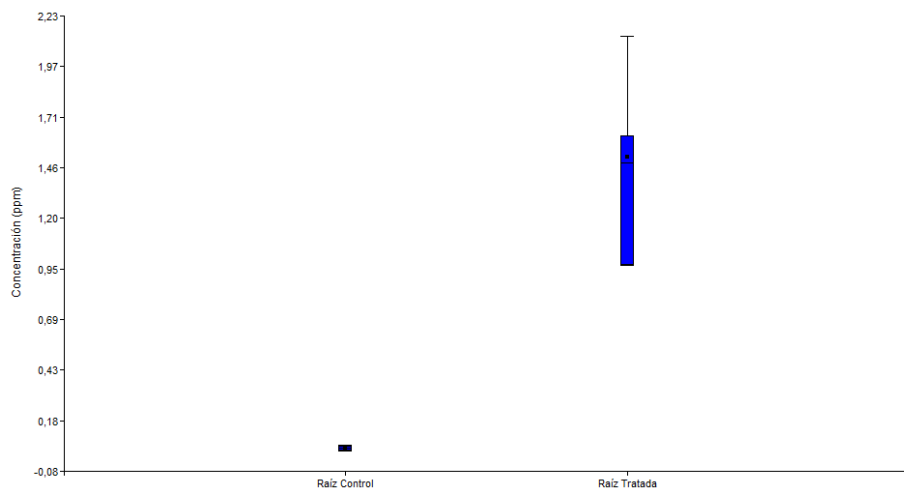


Figura 6. Concentración de Al (ppm) en la raíz control vs. la raíz tratada.

La concentración de aluminio en las hojas control frente a las hojas tratadas se muestra en la figura 7. Se evidencia, que se presentó una diferencia significativa entre estos dos grupos ($P \leq 0,05$), con una mayor concentración en las hojas expuestas.

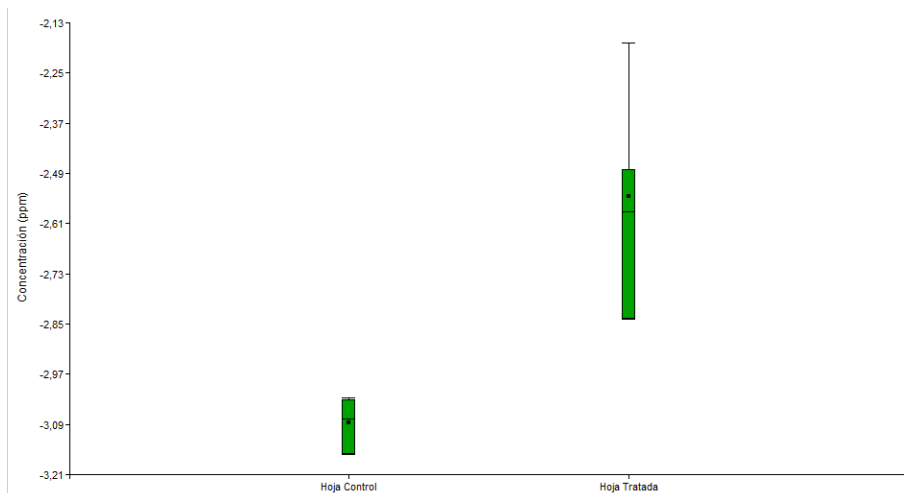


Figura 7. Concentración de Al (ppm) en las hojas control vs. las hojas tratadas.

La concentración de Al de las raíces y hojas del grupo control se presenta en la figura 8, resaltando la mayor concentración presente en la raíz del grupo control ($P \leq 0,05$).

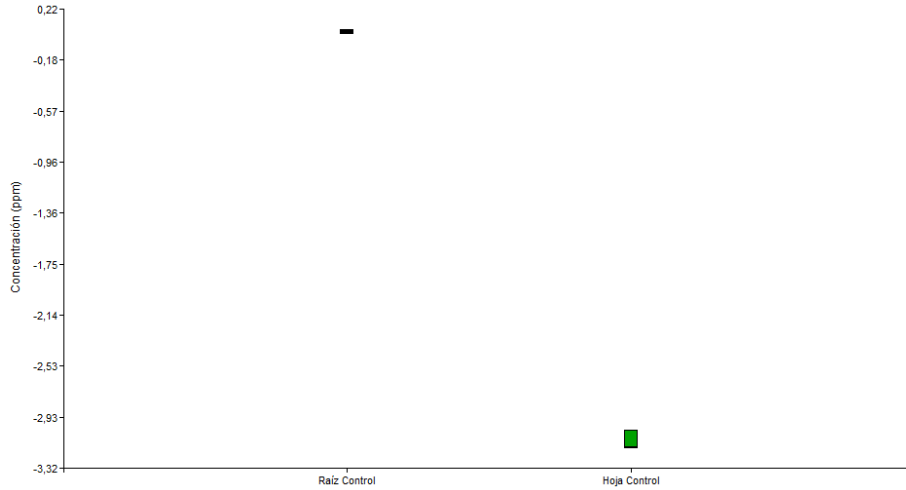


Figura 8. Concentración de Al (ppm) en la raíz control vs. las hojas control.

En la Figura 9, se puede apreciar la concentración de Al en las raíces y hojas del grupo expuesto a este metal, observando una mayor concentración en la raíz ($P \leq 0,05$).

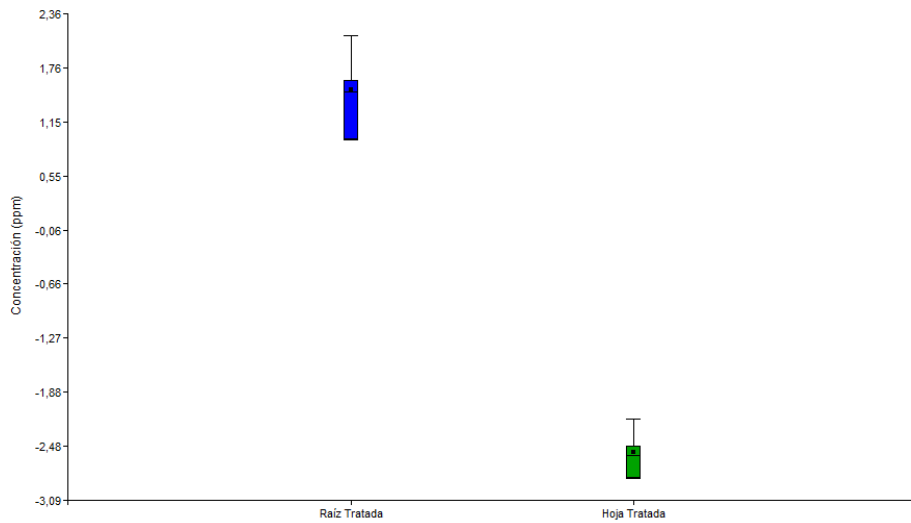


Figura 9. Concentración de Al (ppm) en la raíz tratada vs. las hojas tratadas.

6.2.2 Cromo

La concentración de Cr en la raíz de los grupos expuestos presentó una mayor concentración comparado con la raíz del grupo control (Figura 10) presentando diferencias significativas ($P \leq 0,05$).

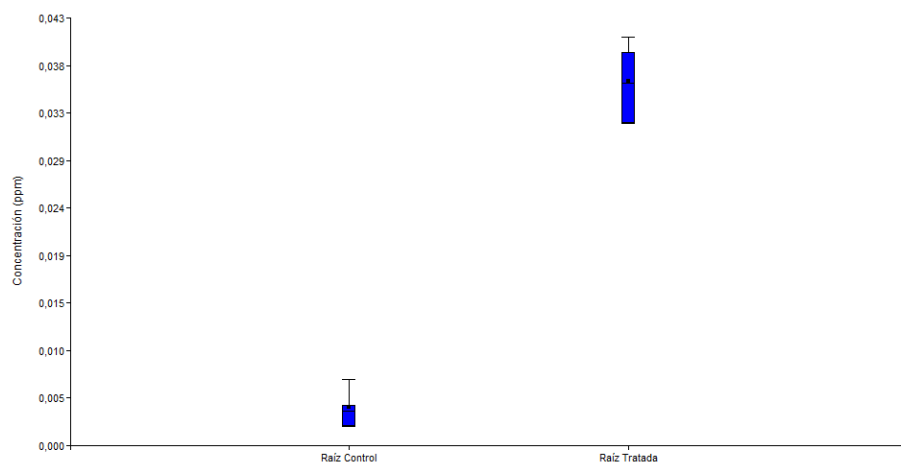


Figura 10. Concentración de Cr (ppm) en la raíz control vs. la raíz tratada.

En la Figura 11, se presentan los resultados obtenidos de la concentración de Cr de las hojas del grupo control frente a las hojas del grupo expuesto a este metal, evidenciando que es mayor la concentración en este último grupo ($P \leq 0,05$).

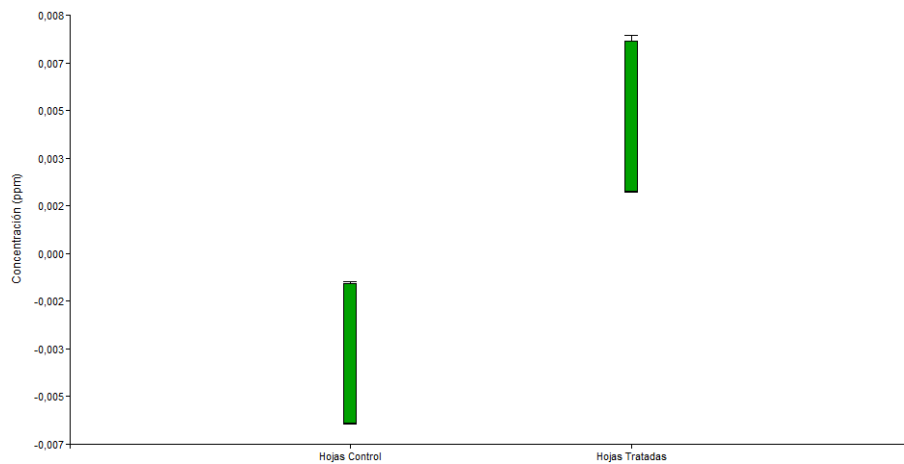


Figura 11. Concentración de Cr (ppm) en las hojas control vs. las hojas tratadas.

En cuanto a las raíces y hojas del grupo control se observa una mayor concentración de Cr en las raíces ($P \leq 0,05$) (Figura 12).

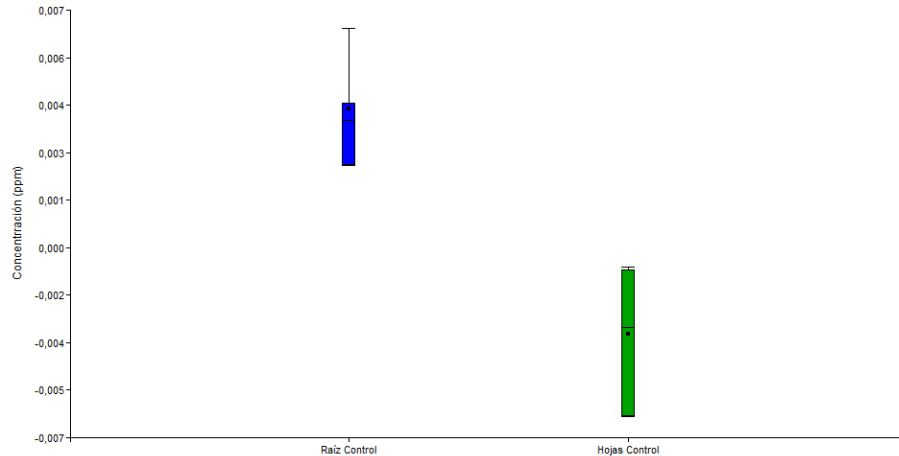


Figura 12. Concentración de Cr (ppm) en la raíz control vs. las hojas control.

En la Figura 13 se presenta la concentración de Cr en la raíz y hojas de las plantas expuestas y hojas, en las que se presentó una diferencia significativa ($P \leq 0,05$) entre estos dos órganos con una mayor concentración en la raíz.

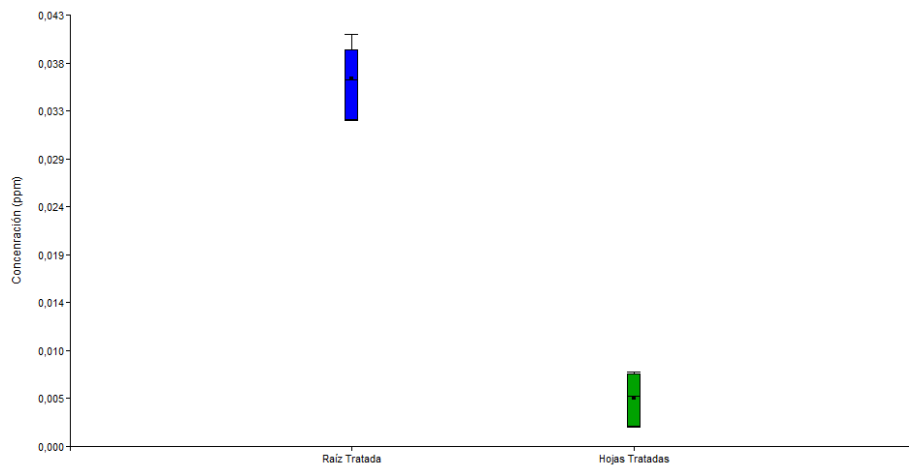


Figura 13. Concentración de Cr (ppm) en la raíz tratada vs. las hojas tratadas.

6.2.3 Cobre

En cuanto a la variación de la concentración de Cu entre las raíces del grupo control y las raíces del grupo expuesto a este metal, se encontró una diferencia significativa ($P \leq 0,05$), con una mayor concentración en las raíces expuestas (Figura 14).

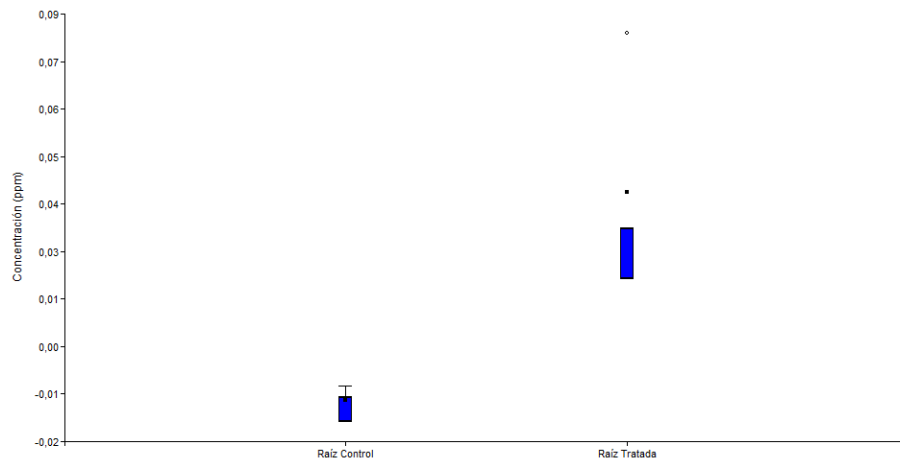


Figura 14. Concentración de Cu (ppm) en la raíz control vs. la raíz tratada.

La concentración de Cu de las hojas del grupo control frente a las hojas del grupo de plantas expuestas a este metal se presenta en la Figura 15. Se observó una mayor concentración en las hojas expuestas ($P \leq 0,05$).

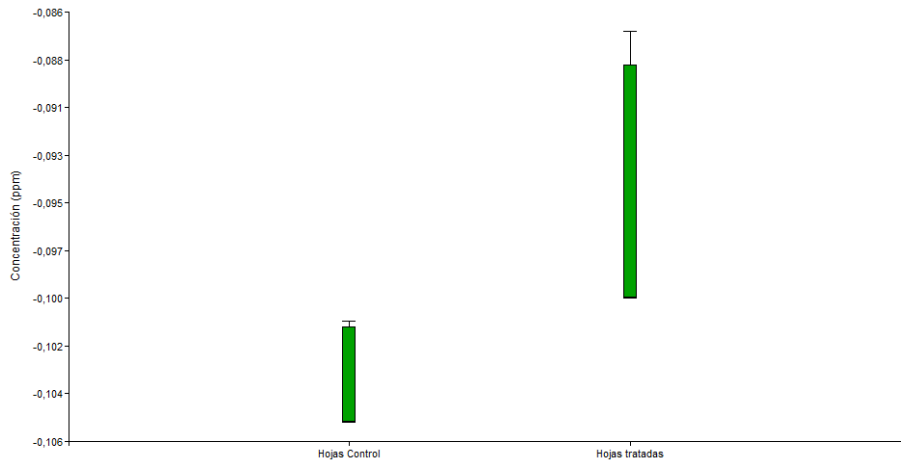


Figura 15. Concentración de Cu (ppm) en las hojas control vs. las hojas tratadas.

En la Figura 16, se muestra la concentración de Cu en la raíz y hojas del grupo control, en este caso no se observó diferencias significativas en la concentración del metal entre estos dos órganos del mismo grupo ($P \geq 0,05$).

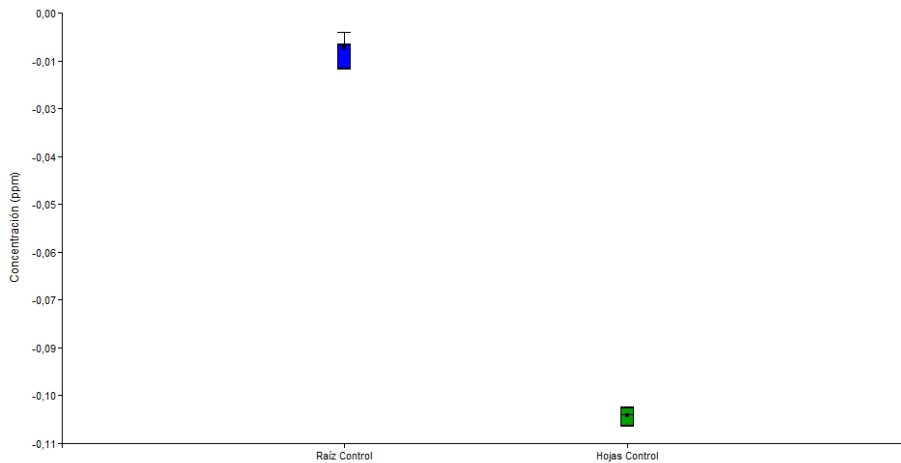


Figura 16. Concentración de Cu (ppm) en la raíz control vs. las hojas control.

La concentración de Cu de las raíces y de las hojas de las plantas expuestas fue mayor en este último grupo, presentado diferencias significativas ($P \leq 0,05$) (Figura 17).

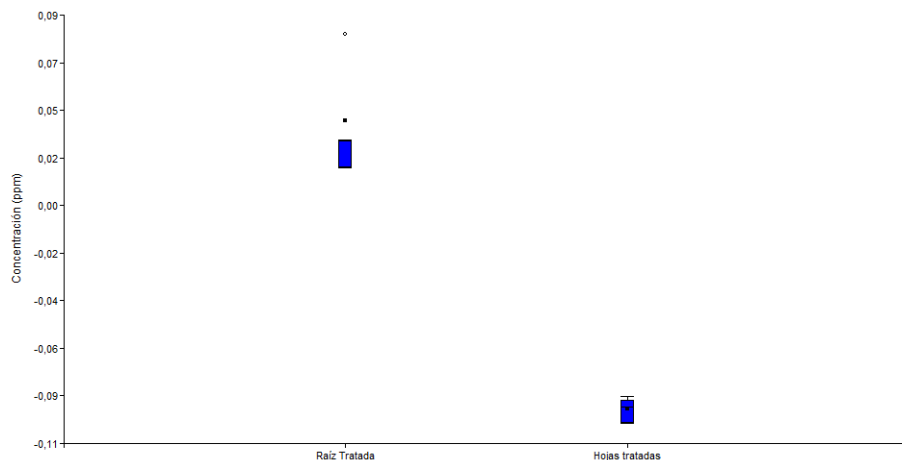


Figura 17. Concentración de Cu (ppm) en la raíz tratada vs. las hojas tratadas.

6.3 Resultados Objetivo específico 3: Comparar sistemas de tratamiento de aguas residuales y su eficiencia para la remoción de metales pesados.

En la tabla 5, se presenta una comparación teniendo en cuenta aspectos sociales, económicos y ecológicos entre un sistema de tratamiento alternativo para las aguas residuales como lo es la fitorremediación frente a un sistema convencional (PTAR).

Tabla 5. Comparación entre las alternativas de Fitorremediación y PTAR

	SISTEMA	
	Fitorremediación / Humedal artificial	PTAR
Social	La operación y mantenimiento no requiere un trabajo permanente en la instalación (Lara, 1999)	Se requiere capacitación del personal para el manejo y mantenimiento de las unidades (Arévalo y Roncancio, 2015).
	Sistemas óptimos para poblaciones pequeñas (Ramos, 2015).	Estos sistemas son utilizados generalmente en Hoteles, Centros turísticos, campamentos mineros y petroleros, municipios, etc. (Maberic, 2016)
Económico	Los gastos de operación y mantenimiento son bajos (energía y suministros). Son sistemas de depuración que no necesitan energía eléctrica (Ramos, 2015).	Consumo constante de energía eléctrica (Romero, 2013)
	El uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas es de desarrollo reciente y no existe un consenso sobre el diseño óptimo del sistema y no se cuenta con suficiente información sobre el rendimiento a largo plazo (Ramos, 2015).	Es una de las alternativas más comunes para la depuración de aguas residuales en municipios y empresas (Castro, 2014)
	La remoción de SST puede ser de 88,4%, y la reducción de DBO de 81% (CINARA, 2002).	Se han obtenido promedios de 86,5 % de remoción en DBO y 94,3 en SST (E.S.P., 2012)
	El rendimiento del sistema puede ser menos constante que el de un proceso convencional, debido a las condiciones ambientales aunque humedales soportan bien las variaciones de caudal (Ramos, 2015).	Las instalaciones permiten que la operación sea constante (Romero, 2013)
	Necesitan de mucha superficie para su instalación (Ramos, 2015).	Se requiere menor área para el proceso de tratamiento de agua (Ramos, 2015).
	Se requiere una mínima cantidad de agua para que sobrevivan, pero no soportan estar completamente secos (Ramos, 2015).	En épocas de sequía se continúa con la operación de las aguas residuales (Castro, 2014).
	Mantenimiento muy simple y a bajo costo (Otálora, 2011).	Se requiere mantenimiento constante para su óptimo proceso (Castro, 2014).
La remoción de metales pesados se puede realizar con diferentes tipos de macrofitas hiperacumuladoras. En el caso del Vetiver se encuentra mayor afinidad para la absorción de As, Cd, Cu, Cr, Pb, Hg, Ni, Se y Zn (Vargas et al. 2016; Truong et al. 2010; Danh et al. 2009; Chomchalow 2003; Shu 2003; Truong 2002)	Las PTARs tienen la capacidad de eliminar metales pesados por medio de las diferentes técnicas que se utilizan como precipitación química, intercambio iónico (osmosis inversa), oxidación- reducción entre otras (Candela, 2016).	
Ecológico	Los visuales son escasos, siendo incluso favorables en el caso de los humedales superficiales que añaden un ecosistema fluvial a la zona aprovechado por la fauna (Otálora, 2011)	Si por motivo estético ocultar la estructura, puede hacerlo rodeándola con diversas plantaciones de arbustos propios de la zona (Castro, 2014).
	La proliferación de mosquitos es otro factor a tener en cuenta dentro de estas alternativas, pero con un buen mantenimiento debería ser casi inexistente (Castro, 2014)	La proliferación de mosquitos es otro factor a tener en cuenta dentro de estas alternativas, pero con un buen mantenimiento debería ser casi inexistente (Castro, 2014)
	El impacto más apreciable es la generación de olores, aunque serían de poca importancia e inapreciables para la población más cercana (Castro, 2014)	

Los impactos sonoros son nulos (Ramos, 2015).	Los equipos son de impacto sonoro nulo.
Facilitan el reciclaje y la reutilización del agua (Naranjo, 2010).	Permiten la recirculación del agua en industrias y municipios.
Pueden construirse en armonía con el paisaje. Por sus beneficios adicionales sobre la vida silvestre y el embellecimiento de áreas (Naranjo, 2010).	
Proporcionan muchos beneficios adicionales a la mejora de la calidad del agua (Ramos, 2015).	Permiten tratar el agua de diferente procedencia.
Proporcionan un hábitat para muchos organismos (Naranjo, 2010)	

7. Discusión de resultados

En el presente estudio, la tasa de supervivencia de las plantas Vetiver tanto en el grupo control como expuesto fue del 100%. Esto indica que el total de las plantas sembradas en este ambiente extremo, sobrevivieron. Este resultado es similar al obtenido por Moula et al. (2008), los cuales alcanzaron un valor de 91,67% con dicha especie, al estudiar su rendimiento en un vivero. Este hallazgo también corroboraría lo observado por Xia (2000), quien afirma que estas macrófitas tienen una buena capacidad de sobrevivir bajo altas concentraciones de metales pesados.

En diferentes estudios que se han realizado con esta planta, se ha logrado determinar que el vetiver tiene una alta tolerancia hacia concentraciones elevadas de metales pesados tales como As, Cd, Cu, Cr, Pb, Hg, Ni, Se y Zn, lo que indica características fisiológicas únicas (Vargas et al. 2016; Truong et al. 2010; Danh et al. 2009; Chomchalow 2003; Shu 2003; Truong 2002), pero es fundamental conocer en estudios puntuales cuáles de estos metales pueden ser bioacumulados y en qué parte de la planta se realiza con mayor frecuencia este proceso.

En cuanto a la concentración puntual de los metales pesados evaluados entre diferentes órganos (raíz y hoja) de las plantas control frente a las expuestas, y entre los órganos de los mismos grupos los resultados mostraron diferencias dependiendo de cada uno de los metales pesados analizados.

El Al presentó acumulación en las raíces, de igual forma que en los resultados obtenidos en un estudio sobre este metal en aguas residuales usando diferentes especies de macrófitas como enea (*Typha latifolia*), junco (*Juncus*) y pasto Vetiver (*C. zizanioides*) (Aldana, 2014). En el caso del Vetiver, este autor evidenció que esta especie mostró una de las mejores eficiencias de remoción de Al, afirmando que estas plantas pueden ser empleadas para trabajar en la absorción de este metal.

En cuanto al Cr, hubo una acumulación tanto en las raíces como en las hojas del Vetiver, aunque se presentó una mayor concentración en las raíces (0,0378 mg/L) que en las hojas (0,0049mg/L). Una serie de ensayos llevados a cabo por Danh et al. (2009), demostraron que esta macrófita podía acumular grandes cantidades de metales pesados en raíces y hojas. También evidenciaron que sólo pequeñas cantidades de As, Cd, Cr y Hg se podían translocar a las hojas (1-6%). Por otro lado, Sing et al. (2014) afirman que *C. zizanioides* puede reducir la concentración de Cr aproximadamente 77-78% de Cr (e incluso alcanzar valores superiores) de las muestras de aguas residuales sintéticos con concentraciones de 5-20mg / L de Cr, así como también Rodríguez (2010) observó que el tratamiento de lodos contaminados podría absorber 30% de Cr, que es menos que el resultado del estudio realizado por Tambunan et al. (2017) con un valor de absorción de 40,29%.

El Cu, solo se acumuló en las raíces de las plantas expuestas. Los antecedentes de investigaciones sobre la absorción de este metal por el pasto Vetiver, confirman los resultados del presente trabajo. Sin embargo, en la literatura se reporta que puede haber acumulación de este metal tanto en raíces como en hojas, aunque es más notable en las raíces. La acumulación de Cu en las raíces y hojas de Vetiver es bastante baja, se inicia con la medición después de 20 semanas de cultivo mostró captaciones de Cu en las raíces y hojas iguales a 58,7 y 3,7 mg/kg respectivamente, las raíces siempre acumularon metales pesados significativamente más altos que las raíces y se restringió la translocación de los metales a las hojas (Yang et al., 2003). Después de nueve meses de crecimiento, acumuló 820,6 y 39,3 mg/kg de Cu en raíces y hojas respectivamente (Wilde et al., 2005).

Como se comentó anteriormente, para el Al, Cr y Cu se presentaron las mayores concentraciones de estos metales en la raíz, debido a que esta zona de la planta es el órgano que se encuentra más expuesto y esta es la zona en donde se inicia el proceso de absorción y de almacenamiento tanto de nutrientes como de metales pesados (Banerjee et al. 2016; Kabata-Pendias, 2010; Guevara et al., 2009; Roongtanakiat y Chairroj, 2001). La raíz suele ser un órgano bioacumulador de estas sustancias, y se ha observado que la tasa de fitoextracción depende de la profundidad de este órgano (Kidney 1997).) El Vetiver tiene un sistema de raíces complejas y de encaje, por lo que la raíz puede penetrar mucho más profundo tanto en el suelo como en el agua y crecer entre 3 y 4 metros en un año (Danh et al. 2009; Truong 2000). Además, la raíz también juega un papel en la rizofiltración debido a su capacidad para absorber contaminantes tanto en procesos bióticos como abióticos. Por lo tanto, una planta como el Vetiver podría ser una buena herramienta para el tratamiento de estos metales pesados que se presentan en concentraciones apreciables en aguas residuales domésticas.

Es importante conocer las fuentes de estos tres metales pesados mencionados anteriormente (Al, Cr y Cu). En primer lugar, el Al, se encuentra de manera general en los alimentos, el agua, el aire y el suelo (ATSDR,2016). Por otro lado, la población tiene mayor probabilidad de exposición a niveles muy bajos de Cr en los alimentos que consumen ya que niveles bajos de Cr (III) ocurren naturalmente en una variedad de alimentos tales como frutas, hortalizas, nueces, bebidas y carnes (ATSDR,2016). El Cr (VI) es biotransformado a Cr (III) en el cuerpo. La mayor parte de este metal abandona el cuerpo en la orina dentro de una semana (ATSDR,2016). Por último, el Cu es muy común en el medio ambiente, y las personas pueden estar expuestos a este metal al respirar el aire, tomar agua, comer alimentos o cuando su piel entra en contacto con tierra, agua u otras sustancias que contienen este metal. La mayoría de los compuestos de Cu que se encuentran en el aire, el agua, el sedimento, el suelo y las rocas están fuertemente adheridos al polvo u otras partículas o están incrustados en minerales. Cierta cantidad de Cu en el ambiente está unida con menos fuerza al suelo o a partículas en el agua y puede ser suficientemente soluble en el agua como para ser incorporada por plantas y animales. Para la población en general, los compuestos de Cu solubles en agua, usados principalmente en la agricultura, representan un riesgo mayor para la salud. Cuando se liberan compuestos de esta sustancia solubles en lagos y ríos, generalmente pueden adherirse a partículas en el agua en aproximadamente 1 d (ATSDR, 2016).

Al comparar un tratamiento convencional para tratar el agua residual frente a una alternativo empleando la fitorremediación teniendo en cuenta aspectos sociales, económicos y ecológicos, se encontraron grandes diferencias. En el aspecto social, el funcionamiento del sistema de fitorremediación, su operación y mantenimiento, no requieren de un trabajo permanente, y, por lo tanto, no es necesaria la formación del personal especializado, a diferencia de la PTAR, la cual, sí requiere de

personal capacitado, tanto para el manejo, como el mantenimiento de las unidades (Arévalo y Roncancio, 2015). En el aspecto económico, según las comparaciones, se evidencian gastos de energía eléctrica muy altos en la PTAR, en comparación con el sistema de fitorremediación, donde la operación y el mantenimiento presentan un consumo casi nulo de este tipo de energía (Ramos, 2015). En los estudios consultados, se encontraron datos específicos de remoción de la DBO y SST entre la PTAR y el humedal: para el parámetro de DBO es más efectiva la remoción con primer sistema con un 86,5% y 94,3% en el caso de los SST (E.S.P., 2012) comparado con el humedal con porcentajes de 88,4% y 81% respectivamente (CINARA, 2002).

Es importante tener en cuenta que, en la actualidad no se cuenta con un consenso sobre el diseño óptimo del sistema de fitorremediación y no se cuenta con suficiente información sobre su rendimiento a largo plazo, por lo que resulta ser un factor importante para poder establecer la vida útil de este sistema. En cambio, las PTARs son una de los métodos más comunes en los municipios, empresas y ciudades como es el caso de Bogotá ya que se basa en un proceso que se puede estandarizar y controlar de una mejor manera.

En cuanto al impacto ecológico, la fitorremediación resulta ser un tratamiento que abarca grandes extensiones de territorio, comparado con los tratamientos convencionales (Ramos, 2015). Sin embargo, este aspecto generaría un impacto positivo al armonizarse con el paisaje, aportando beneficios sobre la vida silvestre, fauna y embellecimiento los lugares donde pudieran ubicarse este tipo de sistemas (Naranjo, 2010). Además, es estética y naturalmente amigable con el ambiente, por lo que se presenta como una forma de descontaminación socialmente aceptable para las comunidades circundantes y para los organismos de control respectivos. Por lo anterior, se podría considerar a la fitorremediación como una tecnología limpia, simple, rentable, no perjudicial para el medio ambiente (Wei y Zhou, 2004; Zhou y Song, 2004), y lo más importante, sus subproductos podrían encontrar una amplia gama de usos (Truong, 2003). Dentro de los usos y propiedades en las raíces se encuentra como principal la extracción de la esencia como antipolilla, tal como la lavanda; las hojas para la fabricación de sombreros o para techar viviendas (Jimenez & Vargas, 2015).

8. Conclusiones

A partir de los resultados de la tasa de supervivencia se encontró que el Vetiver es una planta viable y de fácil manejo la cual podría ser utilizada como método de fitorremediación en la laguna de oxidación del municipio de Jerusalén (Cundinamarca).

Los dos órganos vegetales (hojas y raíces) evaluados, se comportaron de manera diferente con respecto a la acumulación de cada metal, el Cr presentó mayores concentraciones en la raíz y las hojas, mientras que Al y Cu únicamente en las hojas.

La fitorremediación se presenta como una nueva estrategia contra la contaminación por metales pesados, encontrando entre sus principales ventajas que la única energía que necesita para su desarrollo proviene del sol, adicional es una tecnología barata comparada con otras metodologías modernas utilizadas con mayor frecuencia como las PTARs.

Las lagunas de oxidación para el tratamiento de aguas en Colombia han sido objeto de poca investigación y en la región este campo ha sido poco explorado, a pesar de que ellos son un sistema ecológico, de bajo coste y poco complicado que se podría considerar como una buena alternativa para la fitorremediación de metales pesados en aguas residuales para municipios con una pequeña población.

9. Recomendaciones

Se recomienda realizar los procesos de fitorremediación, donde esté involucrado el Vetiver ya que se determina que es aplicable a la recuperación de agua 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. Sin embargo, es importante continuar con estudios relacionados con la medición de la tasa de supervivencia del Vetiver en la laguna de oxidación de Jerusalén (Cundinamarca) en diferentes periodos del año.

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

Se propone realizar un estudio en el que se mida el crecimiento y se evalúen parámetros físicos y químicos tanto para la biomasa (para evaluar la acumulación) como para el agua a tratar (para evaluar la remoción) para poder tener una visión más amplia del proceso de fitorremediación.

10. Bibliografía

Aldana Arcila, E. J. (2014). Remoción de aluminio en aguas residuales industriales usando especies macrófitas. *Remoción de aluminio en aguas residuales industriales usando especies macrófitas*. Manizales, Manizales, Colombia: Universidad Católica de Manizales.

Aliseda, J. M. (2016). La importancia de los recursos hídricos en los usos del suelo en la Península Ibérica .

ARÉVALO CASTILLO, W. S., & RONCANCIO VALBUENA, L. X. (2015). Evaluación de alternativas de tratamiento de agua residual doméstica para reuso en irrigación en una hospedería en el municipio de villa de leyva- boyacá. *Evaluación de alternativas de tratamiento de agua residual doméstica para reuso en irrigación en una hospedería en el municipio de villa de leyva- boyacá*. Bogotá d.c., bogotá d.c., colombia: universidad de la salle.

Banerjee, R., Goswami, P., Pathak, K., & Mukherjee, A. (2016). Vetiver grass: an environment clean-up tool for heavy metal contaminated iron ore mine-soil. *Ecological Engineering*, 90, 25–34.

CASTRO, H. (Julio de 2014). ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES DEL SECTOR NORTE, DEL CASCO URBANO Y MONTECILLO, DEL MUNICIPIO DE GUATAVITA. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada

Cerón, L. E. (2011). *Implementación e innovación en biotecnología ambiental e industrial en el contexto empresarial colombiano*. Bogotá D.C: Universidad EAN.

Chomchalow, N. (2003). The role of vetiver in controlling water quantity and treating water quality: an overview with special reference to Thailand. *AU J T*, 6(3), 145–116.

CINARA, U. D. (2002). *cinara.univalle.edu.co*. Recuperado el 16 de Enero de 2014, de <http://cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/41.pdf>

Cordero, J. (2015). Fitorremediación in Situ Para La Recuperación De Suelos Contaminados Por Metales Pesados (Plomo Y Cadmio) Y Evaluación De Selenio En La Finca Furatena Alta En El Municipio De Útica (Cundinamarca), 13–43.

CONSTITUCION POLITICA, D. C. (1991). Constitución política de Colombia. *Constitucion politica de colombia*. Colombia: constitucion política de Colombia.

Cuberos, E., Rodríguez, A. & Prieto, E. (2009). Niveles de cromo y alteraciones de salud en una población expuesta a las actividades de curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de salud pública*, 11 (2), 278-289.

Danh LT, Truong P, Mammucari R, Tran T, Foster N (2009) Vetiver grass, Vetiveria zizanioides: a choice plant for phytoremediation of heavy metals and organic wastes. *Int J Phytoremediat* 11:664–691

Delgadillo, A; González, C; Prieto, F; Villagómez, J; Acevedo, O; (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14 (2), 597-612.

Donaldson, A. (2013). Treating Wastewater with Vetiver Grass. *Treating Wastewater with Vetiver Grass*. UNIVERSITY OF WASHINGTON.

E.S.P., C. S. (2012). *Eficiencias PTAR*. Bogotá D.C.

Guevara, A., De la Torre, E., Villegas, A., & Criollo, E. (2009). USO DE LA RIZOFILTRACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES LIQUIDOS DE CIANURACION QUE CONTIENEN CROMO, COBRE Y CADMIO. Ecuador : X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET Cartagena de Indias (Colombia),.

Guía técnica general de producción más limpia, Capítulo2, legislación ambiental, Centro de promoción de tecnologías sostenibles, agosto 2005.

Grimshaw, R. (2003). Ecological impact of vetiver in foreign environments. *Ecological impact of vetiver in foreign environments*. Duncan hay.

Hespanhol, I. y Helmer, R. 2001. Hespanhol, I. y Helmer, R. (2001). Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo: Riesgos ambientales para la salud. Contaminación del agua. Editorial Ministerio de

Trabajo y Asuntos Sociales 4 ed. Cap 53. Madrid. ES. p 18. (En línea). Consultado, 05 de mayo, 2015. Formato PDF. Disponible. <http://www.empleo.gob.es/>

JIMENEZ GALLO, E. T., & VARGAS TORRES, S. M. (2015). Evaluación de la eficiencia del pasto vetiver para la fitorremediación de las aguas superficiales del caño cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de acacias departamento del meta. *Evaluación de la eficiencia del pasto vetiver para la fitorremediación de las aguas superficiales del caño cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de acacias departamento del meta*. Acacias, acacias, colombia: universidad nacional abierta y a distancia - unad.

Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. 1989. Trace Elements in Soil and Plants, p. 315. Boca Raton, FL, CRC Press.

Kidney S. (1997). Phytoremediation may take root in Brownfields. *The Brownfields Report*, No. 2(14), 1–6.

Lara, J. (1999). Máster en ingeniería y gestión ambiental. Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales [tesis de maestría] . Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Londoño, L., Londoño, P., & Muñoz, F. (Diciembre de 2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL. Medellín, Colombia : Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial.

Marrugo, J. (2011). Evaluación de la Contaminación por metales pesados en la Ciénaga de la Soledad y Bahía de Cispatá, Cuenca del Bajo Sinú, Departamento de Córdoba. *Grupo de Investigación En Aguas, Química Aplicada y Ambiental - GAQAA*, 153. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Mathew, M., Rosary, S. C., Sebastian, M., & Cherian, S. M. (2016). Effectiveness of Vetiver System for the Treatment of Wastewater from an Institutional Kitchen. *Procedia Technology*, 24, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.028>

Merld, N., Schultzc-Kraft, R., & Infante, C. (2004). Phytoremediation of petroleum-contaminated soils in the tropics-pre-selection of plant species from eastern Venezuela. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/279567170%0APhytoremediation>

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, M. (1996). Decreto 1791 de 1996. *Decreto 1791 de 1996*. Colombia: ministerio de ambiente.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, m. (17 de 03 de 2015). Resolución 0631. *Resolucion 0631*. Bogota, colombia: ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

Molina, N., Aguilar, P., & Cordovez, C. (08 de Abril de 2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*.

Moula, M. G., & Rahman, M. S. (2008). Tiller Effects of Vetiver Grass (*Vetiveria zizanioides* (L .) Nash), *11*(3), 191–194.

Naciones Unidas, C. d. (1972). Declaración de estocolmo sobre el medio ambiente humano. *Declaración de estocolmo sobre el medio ambiente humano*.

Naranjo Aguilar, F. (2010). Alternativas ecológicas para el manejo. *Alternativas ecológicas para el manejo*. CEGESTI.

Orihuela Alegre, J. (2007). MANUAL SOBRE EL USO Y MANEJO DEL PASTOVETIVER (*Chrysopogon zizanioides*). *MANUAL SOBRE EL USO Y MANEJO DEL PASTOVETIVER (Chrysopogon zizanioides)* . MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCION Y SANEACION .

OTÁLORA RODRIGUEZ, A. P. (2011). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de caño Gandúl. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química

PANJA, S., SARKA, D., & RUPALI, D. (2018). Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) is capable of removing insensitive high explosives from munition industry wastewater . *Vetiver grass (Chrysopogon zizanioides) is capable of removing insensitive high explosives from munition industry wastewater* . Hoboken, usa: el seiver.

Ramos Velarde, A. (2014). Estudio de alternativas de depuración de aguas residuales para la población de pozoamargo (cuenca). *Estudio de alternativas de depuración de aguas residuales para la población de pozoamargo (cuenca)*. Madrid, Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

RAS 2000. (Noviembre de 2000). Ministro de desarrollo económico. *Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales y pluviales*. Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia: Ministro de desarrollo económico.

Rodríguez-Vila A, Asensio V, Forján R, Covelo EF (2010) Remediation of a copper mine soil with organic amendments: compost and biochar versus technosol and biochar. *Spanish J Soil Sci* 5:130–143

ROMERO ROJAS, J. A. (2013). Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principio de Diseño. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Roongtanakiat, N., & Akharawutcyanon, T. (2017). Evaluation of vetiver grass for radiocesium absorption ability. *Evaluation of vetiver grass for radiocesium absorption ability*. Bangkok, Thailand: Anres.

Roongtanakiat, N., & Chairaj, P. (2001). Uptake potential of some heavy metals by vetiver grass. *Kasertart J (Nat Sci)*, 3, 46–50.

Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta). México D.F.: Mc Graw Hill Education.

Santana, X., & Santos, J. (2016). Eficiencia del pasto vetiver (*chrysopogon zizanioides*) ex – situ en la remoción de contaminantes orgánicos, caso de estudio río Muerto, Cantón Manta.

SEPÚLVEDA ASPRILLA, N. I. (2013). Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver. *Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver*. Manizales, Manizales, Colombia: Universidad de Manizales.

Shu, W. S. (2003). Exploring the potential utilization of vetiver in treating acid mine drainage (AMD). Third international vetiver conference 2003. University of Guangzhou, China. Oct 6.

Singh, V., Thakur, L., & Mondal, P. (2015). Removal of lead and chromium from synthetic wastewater using *Vetiveria zizanioides*. *Clean-Soil, Air, Water*, 43(4), 538–543.

Tambunan, J., Effendi, H., & Krisanti, M. (30 de Agosto de 2017). Phytoremediating Batik Wastewater Using *Vetiver Chrysopogon zizanioides*. Indonesia : Department of Aquatic Resources Management, Bogor Agricultural University, Indonesia

Truong, P. (2000). The global impact of vetiver grass technology on the environment. Presented in proceedings of the second international vetiver conference 2000. Thailand. Jan 18.

TROUNG, P. (2003). Geotropism in vetiver. *Geotropism in vetiver*. TVNI.

Truong, P. (2002). Vetiver system for wastewater treatment. *Vetiver system for wastewater treatment*. Queensland, Queensland, Australia: The Vetiver Network and Queensland Department of Natural Resources and Mines.

Truong, P. (2004). Vetiver system for erosion and sediment control and Slope Stabilisation. *Science Publishers Inc. NH, USA*, (247), 1–6

Truong, P. N. V., Foong, Y. K., Guthrie, M., & Hung, Y. T. (2010). Phytoremediation of heavy metal contaminated soils and water using vetiver grass. *Environmental Bioengineering*, 11, 223–275. doi:10.1007/978-1-60327-031-1_8.

Tokar, E.; Boyd, W., Freedman, J.; Waalkes, M. Toxic effects of metals. Casarett and Doull's Toxicology. 8th ed. McGraw-Hill. 2015. 93p.

Wei, S.H. and Zhou, Q.X. 2004. Discussion on basic principles and strengthening measures for phytoremediation of soils contaminated by heavy metals. *Chinese J. Ecol.*, **23**, 65–72 (in Chinese).

Wilde, E.W., Brigmon, R.L., and Dunn, D.L. 2005. Phytoextraction of lead from firing range soil by *Vetiver* grass. *Chemosph.*, **61**, 1451–1457.

WILDSCHUT, L. (2013). Mercados potenciales de tecnologías de biorremediación de vetiver. *Mercados potenciales de tecnologías de biorremediación de vetiver*. Madrid, Madrid, España: escuela de organización industrial.

Xia, H.P. (2003). Observations and experiments on the multiplication, cultivation and management of vetiver grass conducted in China in the 1950's. Retrieved on 22 September 2007 from http://www.vetiver.com/CHN_propagation.htm

Yang B, Shu WS, Ye ZH, Lan CY, Wong MH (2003) Growth and metal accumulation in *Vetiver* and two *Sesbania* species on lead/zinc mine tailings. *Chemosphere* 52:1593–1600

