DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL C*HRYSOPOGON ZIZANIOIDES*, PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO (HG) Y CADMIO (CD) EN LA CUENCA BAJA DEL RIO BOGOTÁ

JHONATAN STEVEN ARIAS MENESES

CÓDIGO: 363212146

JUAN PABLO CORRECHA BRIÑEZ

CÓDIGO: 363212106

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

GIRARDOT

2016

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL C*hrysopogon zizanioides*, PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO (Hg) Y CADMIO (Cd) EN LA CUENCA BAJA DEL RIO BOGOTÁ

JHONATAN STEVEN ARIAS MENESES

CÓDIGO: 363212146

JUAN PABLO CORRECHA BRIÑEZ

CÓDIGO: 363212106

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director Trabajo de Grado

Juan Carlos Tapias Duarte

Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

GIRARDOT

2016

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Presidente del Jurado

_____

Jurado

_____

Jurado

Girardot – Cundinamarca 21 de Octubre del 2016

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedicamos en primera instancia a Dios, que nos ha permitido las capacidades intelectuales y físicas para llevar a buen término este arduo proyecto. A nuestros padres que mediante su apoyo, que va más allá de lo económico, pudimos escalar este primer peldaño de nuestra vida profesional, que consideramos muy importante para nuestro futuro.

También es dedicado este trabajo al mérito intelectual y espíritu investigativo de los docentes de la Universidad de Cundinamarca que apoyaron nuestro proyecto con sus muy valiosas opiniones y posturas, mediante las cuales nos formamos cada día en una posición más científica de la realidad.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto nos genera agradecimientos profundos a nuestros padres, pilares de nuestra educación y promotores de la motivación que hasta el día de hoy Dios nos ha permitido tener.

Le agradecemos al profesor **JUAN CARLOS TAPIAS**, por su entera colaboración intelectual y en gestión para que todo esto fuese posible.

Le agradecemos a la profesora **JUANITA ANDRADE LÓPEZ,** por apoyarnos en la interpretación estadística sacando parte de su tiempo valioso en este proceso investigativo.

También Agradecemos al Docente **JACK FRAN ARMENGOT GARCÍA PÉREZ**, cuyo espíritu investigativo, con un amor claro hacia la generación de nuevos investigadores, nos brindó la mano en muchas dificultades.

Y por último y no menos importante debemos agradecer al Docente **DANI DANIEL CUBILLOS**, quien nos apoyó desde un inicio con la idea, su entrega y colaboración fue completa. Muchas gracias a todos por poner un ladrillo para lo que mañana será una gran edificación de conocimientos para ayudar a la humanidad.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN..... 21
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 23
2. JUSTIFICACIÓN 25
3. OBJETIVOS 27
3.1. OBJETIVO GENERAL..... 27
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 27
4. MARCO REFERENCIAL..... 28
4.1. MARCO TEÓRICO 28
4.1.1. Contaminación ambiental. 28
4.1.2. Contaminación por metales pesados. 29
4.1.3. Características del pasto vetiver. 38
4.1.4. Fitoremediación con Vetiver. 39
4.1.5. Umbrales de tolerancia del pasto vetiver a Hg y Cd. 42
4.1.6. Posible acumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio en el pasto vetiver. 43
4.1.7. Estudios bioacumulación en macrofítas. 47
5. MARCO CONCEPTUAL 48
6. MARCO GEOGRÁFICO..... 52
6.1. Ubicación geográfica del rio Bogotá 52
6.2. Ubicación y características agroclimatológicas de la hacienda el Silencio 54
7. MARCO LEGAL..... 55
8. METODOLOGÍA..... 59
8.1. Universo, población y muestra. 59
8.2 Fase 1 59
8.2.1 Evaporímetros artesanales. 59
8.2.2 Adaptación hidropónica. 62
8.3 Fase 2 66
8.3.1Establecimiento de los tratamientos. 66
8.4 Técnicas o instrumentos para la recolección de datos. 70
8.5 Análisis de Evaporímetros Artesanales. 71
8.6 Análisis Físico Químicos 71
8.7 Análisis estadístico 72

9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 73
9.2 Análisis de la evaporación. 73
9.3 Eficiencia de la Adaptación Hidropónica. 74
9.4 Análisis de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) Inicial..... 74
9.5 Reducción en la concentración de mercurio y cadmio en los tratamientos. 75
9.6 Densidad de siembra. 81
9.6.1 Variación de la concentración de Cd en los cuatro tratamientos durante los tres meses. 81
9.6.2 Variación de la concentración de Hg en los cuatro tratamientos durante los tres meses. 82
9.7 Relación entre reducción en la concentración de los metales y las covariables. 84
9.7.1 Mediciones Conductividad 84
9.7.2 Mediciones de Temperatura 85
9.73. Mediciones de pH 86
10 Conclusiones 88
11 Recomendaciones 90
12 Anexos 92
13 Bibliografía..... 97

LISTADOS DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades químicas del Mercurio. 32
Tabla 2. Umbrales de tolerancia del pasto vetiver a Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) 42
Tabla 3. Acumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en el pasto vetiver. 43
Tabla 4. Temperaturas de desorción de algunas especies de Hg. 47
Tabla 5. Acumulación de los metales pesados en las plantas acuáticas. 47
Tabla 6. Normatividad Colombiana 55
Tabla 7. Normatividad para la cuenca del río Bogotá. 58
Tabla 8. Normas Técnicas. 58
Tabla 9.Tratamientos del experimento 69
Tabla 10. Mediciones de altura del agua en los evaporímetros durante (3) semanas. 73
Tabla 11. Características físico- químicas del canal de riego del día 4 de abril del 2016. . 75
Tabla 12. Registro de reducción de las concentración de Mercurio y Cadmio en los tratamiento. 77
Tabla 13. Tasa de reducción de metales respecto al tiempo. 80
Tabla 14. Test: LSD Fisher para Cd, respecto a la densidad. 81
Tabla 15. Test: LSD Fisher para Cd, respecto al mes. 82
Tabla 17. Test: LSD Fisher para Hg, respecto a la densidad. 83
Tabla 18. Test: LSD Fisher para Hg, respecto al mes. 83
Tabla 15. Mediciones de covariables. 96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Metilación aerobia del mercurio. 33
Figura 2. Ciclo del Mercurio en la biosfera. 34
Figura 3. Ciclo biogeoquímico del cadmio. 38
Figura 4. Absorción y transporte de agua, nutrientes y metales pesados por las células especializadas, llamadas pelos absorbentes. 44
Figura 5. Corte transversal de una raíz 45
Figura 6.Bioacumulación de los metales en la biomasa viva. 46
Figura 7. Bioadsorción de los metales en la biomasa viva. 46
Figura 8. Mapa del río Bogotá. 53
Figura 9. Las tres cuencas a lo largo de la trayectoria del rio Bogotá. 53
Figura 10. Ubicación de la hacienda el Silencio 54
Figura 11. Establecimiento de evaporímetros artesanales. 60
Figura 12. Procedimiento para el establecimiento de los evaporímetros artesanales. 61
Figura 13. Multiparámetro EC500.. 61
Figura 14. Macollas del Pasto Vetiver.. 62
Figura 15. Procedimiento para el establecimiento de la adaptación hidropónica. 63
Figura 16. Desinfección de las macollas. 64
Figura 17. Corte de raíz y parte foliar del pasto vetiver 64
Figura 18. Botellas plásticas de 3L. 65
Figura 19. Exposición directa a la luz solar. 65
Figura 20. Procedimiento para el establecimiento de los tratamientos. 67
Figura 21. Infraestructura de protección contra la lluvia. 68
Figura 22. Sistema de flotamiento..... 68
Figura 23. Motobomba de 1.5 Hp con rejilla. 69
Figura 24. Muestras de agua enviadas a CORPOICA. 70
Figura 25. Variación en la concentración de Cadmio a diferentes densidades de siembra durante el experimento. 76
Figura 26. Variación en la concentración de Mercurio a diferentes densidades de siembra durante el experimento.. 76
Figura.27. Reducción en la concentración de Mercurio (mg/mes) en los tratamientos experimentales.. 78
Figura 28. Reducción en la concentración de Cadmio (mg/mes) en los tratamientos experimentales 78
Figura 29**.** Registro de la conductividad durante los tres meses de la investigación.. 85
Figura 30. Comportamiento de la temperatura en los tres meses de la investigación.. 86
Figura 31. Comportamiento del pH durante los tres meses de la investigación.. 87

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Análisis de laboratorio Inicial. 92
Anexo 2. Análisis de laboratorio primer mes. 93
Anexo 3. Análisis de laboratorio segundo mes. 94
Anexo 4. Análisis de laboratorio tercer mes. 95
Anexo 5. Registro de mediciones de covariables. 96

RESUMEN

La CAR diferencia tres zonas que subdividen la cuenca del rio Bogotá a lo largo de su trayectoria: cuenca Alta, Media y Bajo, según el Acuerdo 58 de 1987. La zona de mayor interés es la cuenca baja puesto que se evidencia un deterioro en la calidad del recurso hídrico con concentraciones altas de metales pesados que son bioacumulados por pastos y bovinos. Por esta razón se realizó una investigación para determinar la eficiencia del pasto vetiver (Poaceae: *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) en la remoción de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) mediante fitorremediación; usando bandejas suspendidas con 12 agujeros a las densidades de siembra (tratamientos): 0%, 25%, 50%, 75% y 100% con tres repeticiones, que fueron analizadas en un diseño de bloque completo al azar. El proceso se dividió en tres fases: la primera consistió en determinar la evaporación en la finca el Silencio, ubicada en la vereda la Salada, del Municipio de Tocaima (Cundinamarca) sitio para el establecimiento de los tratamientos. Este proceso duro 21 días, tiempo en el cual se realizaron dos mediciones por semana de las variables: temperatura (°C), salinidad (µs/cm), pH y altura del agua (Cm), en evaporímetros artesanales de diferentes condiciones, de los cuales se implementó el proceso que presento menos evaporación. En la fase dos se usaron 13 canecas de 55 galones de color azul enterradas a la mitad, para montar los cuatro tratamientos con tres repeticiones, donde se realizaron tres mediciones de Hg y Cd, una por mes, mediante absorción atómica. En conjunto con la medición de pH, Conductividad y Temperatura (covariables). La tercera fase fue el análisis de los resultados obtenidos, mediante el programa estadístico INFOSTAT (versión libre), del cual se determinó que la covariable conductividad es significativa para el proceso de fitorremediación del Cd.

Palabras clave: Adaptación, Hidroponía, Densidad, Siembra, Evaporímetros, Fitorremediación.

ABSTRACT

The CAR differentiates three zones that subdivide the basin of the river Bogota along his path: High, Average basin and Down, according to the Agreement 58 of 1987. The zone of major interest is the low basin since a deterioration is demonstrated in the quality of the water resource by high concentrations of heavy metals that are bioacumulados for pastures and bovine. For this reason an investigation was realized to determine the efficiency of the pasture vetiver (Poaceae: Chrysopogon zizanioides (L) .Roberty) in the removal of Mercury (Hg) and Cadmium (Cd) by means of fitorremediación; using trays suspended with 12 holes to the densities of sowing (treatments):0 %, 25 %, 50 %, 75 % and 100 % with three repetitions, which were analyzed in a design of complete block at random.The process divided in three phases:The first one consisted of determining the evaporation in the estate the Silence, located in the path the Salty one, of Tocaima's Municipality (Cundinamarca) I surround for the establishment of the treatments.This hard process 21 days, time in which two measurements were realized for week of the variables: temperature (°C), salinity (µs/cm), pH and height of the water (Cm), in evaporímetros handcrafted of different conditions, of which I implement the process that I present less evaporation. This hard process 21 days, time in which two measurements were realized for week of the variables: temperature (°C), salinity (µs/cm), pH and height of the water (Cm), in evaporímetros handcrafted of different conditions, of which I implement the process that I present less evaporation. In the phase two used 13 refuse bins of 55 gallons of blue color buried to the half, to mount four treatments with three repetitions, where there were realized three measurements Hg and Cd, one for month, by means of atomic absorption. As a whole with the measurement of pH, Conductivity and Temperature (covariables).The third phase was the analysis of the obtained results, by means of the statistical program INFOSTAT (free version), of which I determine the covariable conductivity is significant for the process of fitorremediación of the Cd.

Keywords: Adjustment, Hydroponic, Density, Sowing, Evaporímetros, Phytoremediation.

INTRODUCCIÓN

El rio Bogotá, por su alto grado de contaminación ha sido llamado "*La mayor alcantarilla de Colombia*"[1], recibiendo diferentes tipos de vertimientos como lo dice la revista Dinero[2], vertimientos de curtiembres, residuos de productos fertilizantes, aguas negras de las poblaciones cercanas y residuos industriales de minería ilegal, pero más preocupante aún, las cargas vertidas por los ciudadanos de la capital que representan un 80% de la contaminación. Estos vertimientos traen consigo el Mercurio (Hg) y el Cadmio (Cd).

Investigaciones anteriores demuestran que a medida que van pasado los años la carga contaminante del rio Bogotá se ha aumentado más de lo que ha establecido la normatividad colombiana y la bioacumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en bovinos, pastos y en los seres humanos, se indica que nueve de cada 10 bogotanos tienen Mercurio en su organismo[3].

Calderón y otros, determinan la concentración de Mercurio y Cadmio, junto con la de otros metales pesados, que es bioacumulada por pastos regados con el agua de rio Bogotá, y bovinos que beben directamente del rio Bogotá[4]. Los resultados muestran concentraciones de Cadmio en el agua, elevadas hasta 1.3 veces más que lo establecido por el Ministerio de Salud en ese momento mediante la resolución 4547 de 1998. En cuanto al Mercurio, los bovinos presentaron en el análisis de su riñón, una concentración promedio bioacumulada 1.7 veces mayor a lo establecido por los límites de tolerancia (µg / kg) de tejido renal.

Debido a esta problemática dada por la bioacumulación de estos metales, se inició este trabajo de investigación que muestra la eficiencia del pasto vetiver (Poaceae:

[1] Preciado, a. p. el problema del rio bogotá. En: Fundación al Verde Vivo.2012.

[2] Dinero. Rio Bogotá le pasa factura al gobierno. 2014.

[3] Agencia de Noticias de la Universidad Nacional. El Espectador, pág. 1.2012.

[4] Rubiano Calderón, J. A., Montealegre Ramos, O., & García Barros, E. J. Contaminación del agua, los pastos, la leche y las carnes bovinas por arsenico, mercurio, plomo y cadmio en la planicie aluvial baja del rio Bogotá.1997.

Chrysopogon zizanioides (L) Roberty) para el tratamiento de descontaminación por Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en aguas de la cuenca baja del rio Bogotá, en un tramo de este río, desviado para uso de riego en la agricultura, ubicado en el kilómetro 25 vía Girardot – Tocaima, utilizando el método de fitorremediación sobre el agua del rio Bogotá, disminuyendo la contaminación y sus efectos nocivos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día existe una problemática que ha generado daños en la salud humana, animal y vegetal, causando un desequilibrio ecológico. Por actividades mineras e industriales que vierten grandes cantidades de contaminantes a ríos y cuerpos hídricos en general, el agua empieza a ser nociva para casi cualquier ser viviente con excepción de unos pocos que han desarrollado resistencia ante estos gradientes. La escasez del agua por la contaminación de su fuente, además de reducir la disponibilidad del recurso para las generaciones futuras, limita el desarrollo económico, cultural y social de los estados, las regiones y el país en general. También esta contaminación excesiva de los recursos hídricos afecta la integridad de los ecosistemas, poniendo en riesgo la riqueza de la biodiversidad Colombiana.

Hay una gran cantidad de contaminantes que están siendo vertidos a los ríos y quebradas afectando la calidad de las aguas y al ecosistema en general; como es el caso del Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd), metales altamente tóxicos, que presentan la capacidad de bioacumularse en organismos que circulan en la cadena trófica y posteriormente; según la concentración de metales que posea la biomasa de los organismos, se pueden generar mutaciones, enfermedades crónicas, alergias y en los casos más avanzados un cáncer. El rio Bogotá es uno de los más contaminados de Colombia, el cual posee los metales antes mencionados[5].

Según Gónima “El pez Capitán, único bagre de las altas regiones colombianas, podría llegar a desaparecer de la cuenca Alta del Río Bogotá por los altos niveles de metales pesados que hay en sus aguas”[6], con el paso de los años la peligrosidad para otras especies avanzara mucho más, como lo afirma en 1983 la

[5] CAR. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. Pag.2,3,4,5.2006
[6] Gónima, N. El Espectador.2015.

OMS: “al año, dos millones de personas se intoxican por exposición directa o indirecta a estos tóxicos y tres cuartas partes son personas en países subdesarrollados donde se utiliza el 25% de la producción mundial de plaguicidas. Una de las actividades en donde más se usan este tipo de químicos en Colombia es en la floricultura que abarca el 28% de actividad socioeconómica alrededor de la cuenca del Río Bogotá”[7].

[7] OMS. 1983

2. JUSTIFICACIÓN

El rio Bogotá tiene reportes de contaminación por metales pesados de hace varias décadas, como lo demuestra Mejía y Panizzo[8], en los análisis de composición del rio Bogotá en diferentes puntos de la cuenca, en 1982 donde se encontró mercurio en concentraciones mayores a 0,067 $mg.L^{-1}$ y de igual manera Cadmio con concentraciones mayores a 0,01 $mg.L^{-1}$, datos que sobrepasan los límites permisibles, incluso actualmente, como lo estipula la Resolución 1207 del 2014. La CAR[9], en el año 2009 publico que el rio Bogotá recibe por vertimientos de industrias una descarga total de 51,62 Toneladas por mes de metales pesados, lo cual lo deja en un estado crítico de toxicidad. La Agencia Estadounidense para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades, afirma que "cuatro de los metales más tóxicos son: Arsénico, Cadmio, Plomo y Mercurio"[10].

Debido a los antecedentes que presenta el Río Bogotá, específicamente en la cuenca baja, por altas concentraciones de metales pesados, se pretendía identificar la eficiencia del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L). Roberty) para la remoción de Hg y Cd, con una muestra de agua tomada de un tramo de la cuenca baja del río Bogotá. Esta investigación se centró en obtener información de cuanto lograría retener el pasto vetiver en remover estos metales del agua, para lo cual, por motivos de presupuesto se realizaron análisis físico – químicos sobre la muestra de agua, monitoreando las variaciones en las concentraciones de Hg y Cd durante todo el proceso, en conjunto con los cambios sufridos en unas posibles covariables del proceso y, de este manera determinar una tasa probable de disminución de los metales mencionados que puede ser atribuida al vetiver, pasto que ha sido muy útil en la descontaminación de suelos y amarra de este; pero de

[8] Galeano, S. G. Contaminacion por Cadmio y Arsenico en suelos y hortalizas en un sector de la cuenta del rio Bogotá. 1994.
[9] Corporación Autonoma Raginal (CAR). Evaluación ambiental y plan de gestión ambiental.2009
[10] Agencia Estadounidense para el Registro de Sustancias Tóxicas. Módulo IV - Estudio de sustancias tóxicas.2009.

la cual existe poca información e investigación en descontaminación de cuerpos hídricos. Este pasto puede convertirse en una herramienta de bajo presupuesto siendo útil en la salud de la población y el ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL.

Determinar la eficiencia que presenta el pasto Vetiver (Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty), para retener Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) a partir de cuatro diferentes densidades de siembra, en una muestra de agua tomada de un tramo de la cuenca baja del rio Bogotá.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la tasa de disminución de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd), en una muestra de agua tomada de un tramo de la cuenca baja del rio Bogotá, sometida a cuatro densidades de siembra con pasto Vetiver (Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty).

2. Identificar cual es la densidad de siembra optima, que permite establecer altos porcentajes de retención y largos periodos de vida útil del material vegetal.

3. Conocer la relación entre el pasto Vetiver y las variables que serán monitoreadas (Conductividad, Temperatura, pH y Salinidad), para evaluar el proceso de fitorremediación.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. MARCO TEÓRICO

4.1.1. Contaminación ambiental.

Para contextualizar un poco en el tema a tratar, es de suma importancia tener presentes y claros algunos conceptos básicos, como qué es en si la contaminación ambiental y específicamente entender como es esta cuando es causada por metales pesados y que tipo de implicaciones tiene en el ambiente.

Inicialmente es importante tener claro que "La contaminación es un cambio perjudicial en las características físicas, químicas o biológicas del aire, la tierra o el agua, que puede afectar nocivamente la vida humana o la de especies beneficiosas, los procesos industriales, las condiciones de vida del ser humano y puede malgastar y deteriorar los recursos naturales renovables"[11].

Algunas veces la contaminación puede darse por causas naturales, pero por lo general está relacionada con la actividad humana[12]. Para el caso de este documento se contextualizan estas actividades humanas especialmente al sector industrial, del cual el decreto 3930 de 2010, en su artículo 16 titulado "usos industriales del agua", incluye la minería como actividad industrial. También se tienen presentes las demás actividades que generen vertimientos con metales pesados.

[11] Atilio de la orden, Eduardo. Contaminación. Tomado de: Universidad Nacional de Catamarca, Área Ecológica ISSN: 1852-3013, Catamarca, S.f.

[12] Bautista Zúñiga, Francisco. Introducción al Estudio de la Contaminación del Suelo por Metales Pesados. Universidad Autónoma de Yucatán, ISBN: 968-7556-81-1. Yucatán, México. 1999.

4.1.2. Contaminación por metales pesados.

A causa de los daños severos que ocasionan por estos, los metales pesados se han vuelto un tema de mucha importancia actualmente, tanto en el tema ambiental como en salud pública. Los daños ocasionados por los metales pesados son tan severos que las autoridades ambientales y de salud han prestado más importancia y cuidado a la minimización en la exposición a estos elementos de gran toxicidad[13].

La contaminación por metales pesados en suelos ocasiona que estos tiendan a ser accesibles para ser consumidos por las plantas mediante sus raíces[14]. Esta contaminación es atribuida generalmente a la minería, pero la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales[15] define algunas actividades como las principales generadoras de cada metal pesado. Para el presente documento se tomó la información de las actividades industriales en derramar Mercurio y Cadmio:

Mercurio

- Actividades mineras de extracción de oro, plata y cobre.
- Fundición primaria y secundaria de metales.
- Producción de carbón y coque.
- Combustión de combustóleo y carbón en la generación de electricidad.
- Industria de cloro-sosa.
- Incineración de residuos peligrosos y biológicos infecciosos.

[13]Valdés Perezgasga, Francisco. Contaminación por metales pesados en Terreon, Coahuila, México. México. 1999.

[14]Citado por Puga, Soraya; Sosa, Manuel; Lebgue, Toutcha; Quintana, Cesar & Campos, Alfredo. En: Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. Ecología Aplicada, ISSN 1726-2216. Lima. 2006.

[15]Secretaria de Media Ambiente y Recursos Naturales. Metales Pesados. México. 2009 (Naturales, 2009)

Cadmio

- Baterías Recargables de Níquel/Cadmio (Ni/Cd):
- Fertilizantes.
- Pigmentos y Estabilizadores en Plástico y PVC.
- Pigmentos en Pinturas.
- Galvanización.
- Catalizadores y Conservadores en la Industria del Plástico.
- Elaboración de Pinturas.
- Aleaciones.

Mediante los vertimientos de cualquier actividad de estas puede ingresar el Mercurio o el Cadmio a procesos vitales para el hombre y/o el medio ambiente, bien sea mediante el ingreso de estos vertimientos a cultivos[16], fuentes de abastecimiento para plantas de tratamiento de agua potable[17] e incluso ecosistemas terrestres y marinos[18].

4.1.2.1. El Mercurio (Hg).

Este metal se ha utilizado desde la antigüedad por sus varias aplicaciones. En los antiguos imperios egipcios y chinos donde se encontró la utilidad como pintura para la piel del cinabrio (HgS)[19]. Este metal ya se hacía presente en el uso para la minería desde el año 700 a.C, donde los fenicios lo utilizaban para la recuperación de oro.

---

[16]Citado por Puga, Soraya; Sosa, Manuel; Lebgue, Toutcha; Quintana, Cesar & Campos, Alfredo. En: Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. Ecología Aplicada, ISSN 1726-2216. Lima. 2006.

[17]Méndez Prieto, Judith; Gonzales Ramírez, Cesar A.; Gutiérrez Román, Alma D. & Prieto García, Francisco. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Tropical and subtropical agroecosystems. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. México. 2009.

[18]Ablanedo, Nora; Gonzales, Humberto; Ramírez, Marta & Ibis, Torres. Evaluación del erizo de mar *Echinometra lucunter* como indicador de contaminación por metales pesados, Cuba. La Habana, Cuba. 1990.

[19]AKSOY, A. Y ÖZTÜRK, M.A. Nerium oleander L. as a biomonitor of lead and other metal pollution in Mediterranean environments. The science of the total enviroments 205: 145 – 150. 1997.

Además de esto, Lominchar, M.A.; Sierra, M.J.; Rodríguez, J. & Millán, R. afirman que "el mercurio fue utilizado con fines médicos, tanto en la época griega y romana como posteriormente en el siglo XV, donde se comenzó a emplear para el tratamiento de la sífilis continuándose su aplicación incluso hasta principios del siglo XX, aunque en esa misma época ya existían estudios donde se mencionaban los efectos perjudiciales del mercurio en la salud humana" [20].

El Mercurio en general ha tenido muchas otras aplicaciones en la elaboración de diferentes objetos de uso cotidiano como: "tacómetros, termostatos, enchufes, luminarias, electrodos de referencia de medición de potenciales, pigmentos, o pesticidas, como amalgamas de plata para empastes de dientes. Todo ello gracias a la tendencia del mercurio a formar aleaciones con muchos otros metales, tener carácter líquido a temperatura ambiente y una conductividad del calor pobre pero buena conductividad eléctrica"[21].

Químicamente el Mercurio es conocido con el símbolo Hg y se encuentra en el grupo IIB de la tabla periódica. A continuación se presenta en la tabla 1. Propiedades químicas expuesta por Adriano:

[20]Lominchar, M.A.; Sierra, M.J.; Rodriguez, J. & Millan, R. Estudio del comportamiento y distribución del Mercurio presente en muestras de suelo recogidas en la ribera del rio valdeazoguez. Madrid. 2010.

[21]Adriano, D.C. Mercury. Trace elements in the territorial environments. 2nd Edition. Springer. New York, EEUU. Citado en: Lominchar, M.A, *et al.* Estudio del comportamiento y distribución del Mercurio presente en muestras de suelo recogidas en la ribera del rio valdeazoguez. Madrid. 2010.

Tabla 1. Propiedades químicas del Mercurio.

PROPIEDADES DEL MERCURIO			
Nº Atómico	80	Formas en la naturaleza	Estado nativo Complejos inorgánicos Complejos orgánicos Sulfuros mercúricos y Sulfosales mercúricas estables
Peso Atómico	200,59		
Punto de fusión	-38,9ºC		
Punto de ebullición	356,6ºC		
Densidad	13,55 g/cm^3 a 25ºC		
Solubilidad	6*10^{-5} g/l a 25ºC	Minerales principales	Cinabrio Livigstonia Metacinabrio
Presión de vapor	1,22*10^{-5} mm a 20ºC 2,8*10^{-5} mm a 30ºC		
Estado de oxidación	0, I y II		

Fuente: Adriano, D.C.; 2010

4.1.2.2. El Metilmercurio, toxicidad y la cadena Alimenticia.

El metilmercurio (CH_3Hg) es una de las formas orgánicas del mercurio de mayor toxicidad, en conjunto con el dimetilmercurio (CH_3HgCH_3). Este compuesto metálico nace inicialmente por una biotransformación que tiene lugar en los ríos y cuerpos de agua y, los microorganismos son los autores. Estos microorganismos transforman el Hg en metilmercurio y de esta manera lo incorporan en la cadena trófica[22].

Según Figueroa: "El proceso de la metilación del Hg puede llevarse a cabo por dos vías: aeróbica y anaeróbica, como se muestra en la figura 1. La metilación anaerobia se lleva a cabo por compuestos derivados de la metilcobalamina que son producidos por bacterias metanogénicas en un ambiente moderadamente reductor"[23]. Mientras que "en la vía aeróbica, el mercurio que está unido a la homocisteína se metila por los procesos celulares que normalmente dan lugar a la formación de la metionina. En este caso el complejo homocisteína-Hg se metila "por error". Esto ocurre en muchos microorganismos y bacterias"[24].

[22]Doadrio Villarejo, Antonio L. Ecotoxicología y acción toxicológica del Mercurio. Real academia de nacional de farmacia. s.f.
[23]Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Curso básico de toxicología ambiental. Metepec, Eco. 1985. P183 – 204. Citado en Figueroa Navarrete, Adela. Mercurio y Metilmercurio. s.f.
[24]Ibíd., p. 11

El metilmercurio es un compuesto muy toxico que gracias a los grupos tioles presentes en los residuos de la cisteína presente en las proteínas, es capaz de actuar en los tejidos[25]. León & Peñuela aseguran que aunque el pescado es la principal fuente de ingreso del metilmercurio en la alimentación humana, existen múltiples registros de este compuesto sumamente toxico en otros elementos alimenticios como la carne de animales y el arroz producido en china[26].

Debido a la presencia de este compuesto en especies como el pescado, se hace inminente la biomagnificación del metilmercurio en algunas poblaciones, que culturalmente consumen estas especies como parte de su dieta ordinaria o por simplemente ser el único recurso disponible.

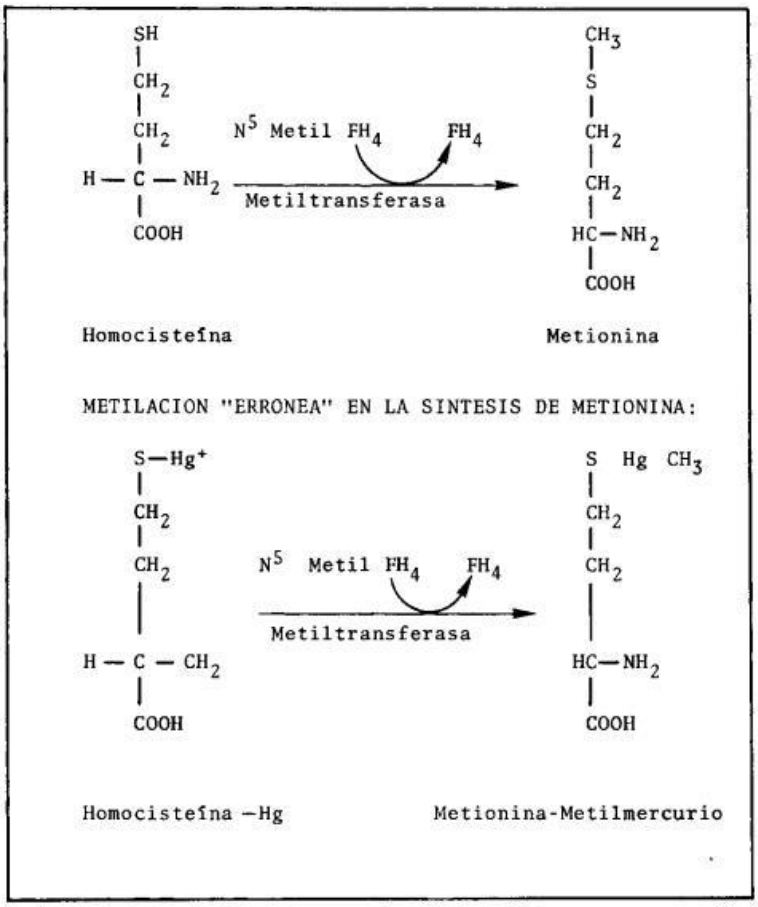

Figura 1.Metilación aerobia del mercurio. ; Fuente: Figueroa Navarrete, Adela; 1985

[25] León Pérez, Daniel Esteban & Peñuela Mesa, Gustavo Antonio. Universidad de Antioquia. 2011.
[26] Ibíd.

4.1.2.3. Ciclo biogeoquímico del Mercurio (Hg).

Lominchar *et al.* Describen el inicio de este ciclo con la liberación de este metal mediante la erosión de rocas que contienen minerales de mercurio, luego este al agua: superficial y subterránea, donde finalmente llegara al mar, allí sufre procesos de desgasificación y volatilización, pasando así a la atmosfera.[27] En este punto del ciclo los autores hacen énfasis en que la fase atmosférica del Hg es dominante, puesto que la naturaleza en sus procesos gaseosos libera casi 1/3 de la concentración total de Hg[28].

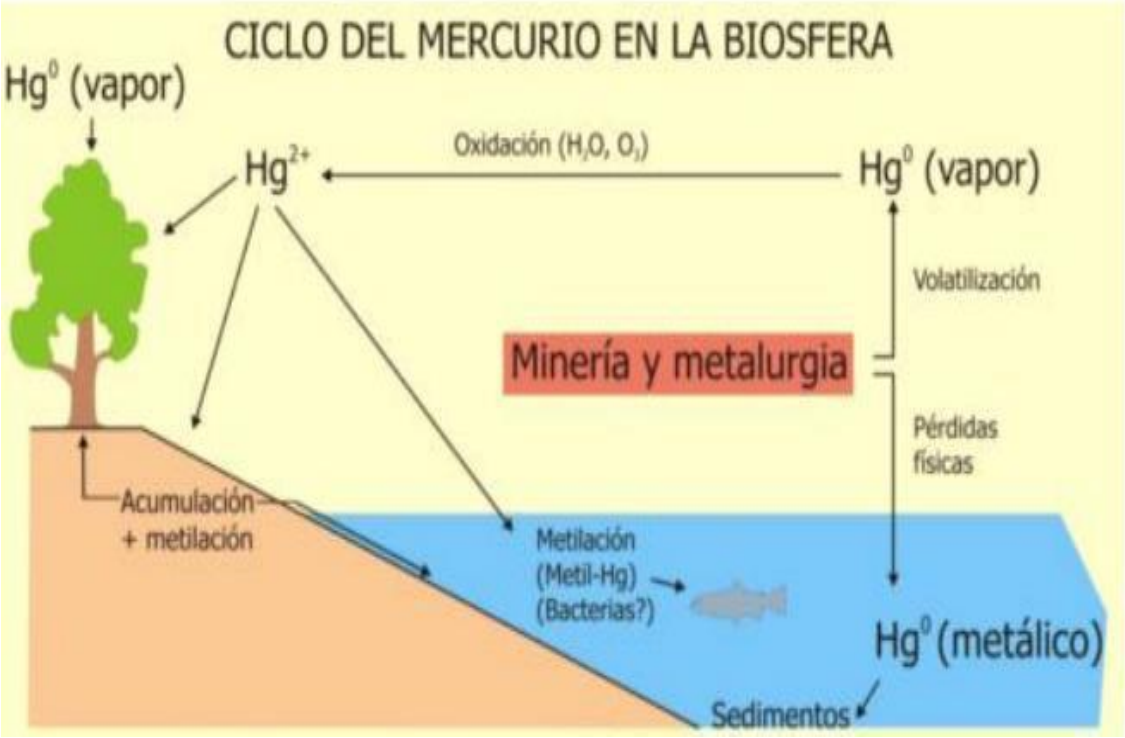

Figura 2. Ciclo del Mercurio en la biosfera. ; Fuente: Estudio del Comportamiento y Distribución del Mercurio Presente en Muestras de Suelo Recogidas en la Ribera del Río Valdeazogues, 2010.

[27] Lominchar, M.A.; Sierra, M.J.; Rodríguez, J. & Millan, R. Estudio del comportamiento y distribución del Mercurio presente en muestras de suelo recogidas en la ribera del rio valdeazoguez. Madrid. 2010

[28] Martínez Gaona, X. El mercurio como contamínate global. Universidad Autónoma de Barcelona. 2004.

4.1.2.4. El Cadmio (Cd).

El Cadmio es un metal pesado de símbolo Cd y se encuentra ubicado en el grupo de transición IIB en la tabla periódica, junto con el Hg y su estado natural es sólido, de color gris metálico. El numero atómico del Cd es 48 y su punto de fusión se da a los 549,22 grados Kelvin o a 322,07 grados Celsius o centígrados[29].

Este metal se encuentra clasificado entre los más peligrosos para la vida acuática, en conjunto con el Zn, Pb y el Cu, debido a que son muy tóxicos aun en concentraciones muy bajas, por ser metales pesados (sin función biológica significativa) tienden a bioacumularse y biomagnificarse a lo largo de la cadena trófica[30].

En la naturaleza se puede encontrar asociado a muchos minerales, pero en el agua este metal se encuentra como ion libre y, rápidamente se une al material particulado. Pero cuando llegan al mar, por lo general el ion Cd^{+2} al igual que los iones de otros metales pesados, tiende a sedimentarse en la costa, afectando el directamente a los estuarios[31].

Ramírez Augusto[32] indica que los principales usos y aplicaciones antrópicas del cadmio o sus compuestos son:

- Como pigmento en pinturas, esmaltes, plásticos, textiles, vidrios, tintas de impresión, caucho, lacas, etc.
- En aleación con cobre, aluminio y plata.

[29] Pino, Fernando. Características del cadmio. s.f.

[30] Lima Cazorla, Lázaro; Olivares-Rieutmon, Susana; Columbie, Isaida; de la Rosa Mederos, Daniel; Gil Castillo, Reynaldo. Niveles de plomo, zinc, cadmio y cobre en el rio Almendares ciudad Habana, Cuba. Cuba. 2005.

[31] Badillo German, Francisco. Toxicología ambiental. 1985.

[32] Ramírez, Augusto. Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Anales de la facultad de medicina, ISSN 1025 – 5583. 2002.

- En la producción de pilas de cadmio-níquel.
- Como estabilizador de termoplásticos, como el PVC.
- En fotografía, litografía y procesos de grabado.
- Como "endurecedor" de ruedas y llantas de automóvil.
- En fabricación de foto - conductores y células solares fotoeléctricas.
- El electroplatinado.
- En fabricación de "controles" de reactores nucleares.

4.1.2.5. Toxicidad del Cadmio (Cd).

El cadmio es un metal que sin saberlo, el hombre empezó a liberar desde los inicios del proceso de fundición y refinación de metales como el zinc, plomo y cobre[33]. Ramírez[34] declara que el cadmio actualmente es considerado uno de los mayores agentes tóxicos por contar con todas las características de peligrosidad más temidas en un toxico:

1) Efectos adversos para el hombre y el medioambiente.
2) Bioacumulación.
3) Persistencia en el medio ambiente.
4) "Viaja" grandes distancias con el viento y en los cursos de agua.

Este metal tiene como principal vía de ingreso en el hombre mediante la alimentación, partiendo del ingreso en los vegetales y productos animales. Ramírez también indica que el cadmio "se fija a las plantas más rápidamente que el plomo" pero que su mayor concentración se encuentra en las hojas, por encima de las semillas y frutos[35].

[33] Badillo German, Francisco. Toxicología ambiental. 1985.
[34] Ramírez, Augusto. Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Anales de la facultad de medicina, ISSN 1025 – 5583. 2002.
[35] Ibíd., p. 3

Después de su ingreso en las células, el cadmio se une a la metalotioneína que contiene 26 grupos SH, gracias a los residuos de cisteína[36]. Esta molécula de proteína según la teoría tiene como función la protección del sistema enzimático celular, aunque también se le ha atribuido la función de unirse específicamente a los metales pesados como el cadmio. En este punto, Ramírez[37] advierte que según estudios es más perjudicial el complejo Cd-Metalotioneína que el cadmio en sí, para el caso de los túbulos renales.

Como tal el mecanismo de su toxicidad en las plantas no es claro aun, pero si se ha determinado que el Cd interfiere en el ingreso, transporte y disponibilidad de algunos nutrientes esenciales como el K, Ca, Mg y P y también del agua, generando desequilibrios en la nutrición e hídricos en las plantas[38].

4.1.2.6. Ciclo biogeoquímico del Cadmio (Cd).

El ciclo natural de los metales esta alterado por la acción del hombre, por lo cual no se puede describir el comportamiento del cadmio sin las intervenciones humanas. Inicialmente este metal ingresa al suelo por erosión de la roca madre y la adicion por fertilizante. Luego por ingresa a los cuerpos hídricos superficiales y por filtración a los mantos freaticos, donde finalmente van al mar. De alli es inevitable que el cadmio se evapore, e ingrese a la atmosfera, debido a que es un metal relativamente volatil. Pero este no es el unico medio actual de ingreso: antropicamente las emisiones de gases en actividades industriales previamente descritas, son funte de cadmio para la atmosfera, principalmente en el proceso de

[36] Ibíd., p. 5
[37] Ibíd., p. 5
[38] Poschenrieder C.; Gunsé, B. & Barceló, J. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. Plant Physiology 90:1365-1371. 1989. Citado en: Serrano Rodríguez, M.; Martínez de la casa, N.; Romero Puertas, M.C.; del Rio, L.A. & Sandalio, L.M. Toxicidad del cadmio en plantas. Revista: Ecosistemas, ISSN 1697-2473. 2008.

soldadura. Despues ya en la fase atmosferica, mediante la precipitación el cadmio vuelve al suelo[39].

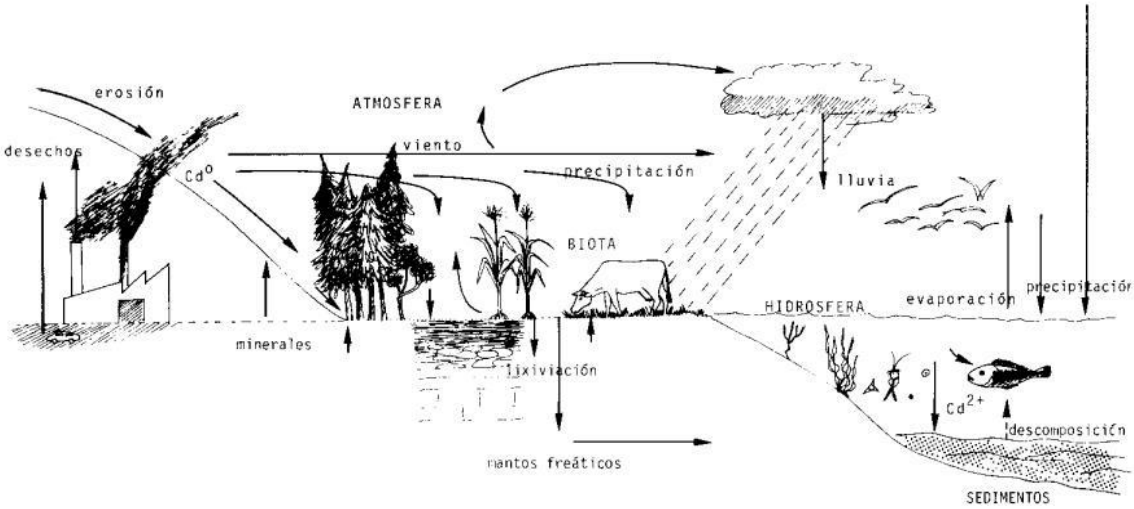

Figura 3. Ciclo biogeoquímico del cadmio. ; **Fuente:** Toxicología ambiental, capitulo doce: Cadmio; 1985

4.1.3. Características del pasto vetiver.

El pasto vetiver es una planta tropical, originaria del norte de la India y del sur de China[40], que pertenece a la familia gramíneas (Poaceae), subfamilia Panicoideae. El vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L). Roberty) es una planta perenne que posee un sistema radicular masivo, profundo (2 a 3 m de crecimiento en un año); fuerte, su resistencia a la tracción es de 75 MPa, equivalente a 1/6 del acero blando, ello amarra el suelo[41]. La red de sus raíces aumenta la resistencia del suelo a la erosión porque las raíces aumentan la resistencia al corte del suelo por 30 - 40%. Su follaje es erecto, alto, abundante e igualmente fuerte; siendo capaz, cuando se establecen barreras con él, de soportar láminas de agua de inundación de hasta 80 cm y reducir su velocidad casi a cero; a la vez que retiene los sedimentos. Es una planta asexual, es decir, sus semillas no son fértiles, y por ende no hay riesgo de que se convierta en maleza. Una vez establecido tolera

[39] Badillo German, Francisco. Toxicología ambiental. 1985.
[40] Chaipattana Network Webmaste. 1996.
[41] Mirabal, R. L. Vetiver system for environmental protection of open cut . *CVG Bauxilum*. 2004.

condiciones extremas de: sequías; inundaciones; quema (rebrota a la semana); temperaturas (-14º C a 46º C); altitudes (0 m hasta 2800 msnm); pH (3 a 12.5); se adapta a suelos y aguas con presencia de aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, manganeso, mercurio, níquel, selenio y zinc; suelos sódicos, salinos, alcalinos[42].

4.1.3.1. Características morfológicas y fisiológicas.

Se ha demostrado que por sus características morfológicas y fisiológicas que el vetiver es eficiente para la eliminación de Zinc, Plomo, Mercurio, Cadmio y Cromo, aunque a altas concentraciones la presencia de los mismos inhibe la producción de materia seca y la tasa fotosintética[43], su aplicación es de bajo costo, ecológico y una herramienta de bioremediación.

4.1.4. Fitoremediación con Vetiver.

En el año 2013, Arce, Sandra; Azuaje, Juana; Hernández, Ángela, Marcó, Lué y Sajo-Bohus, Laszlo [44]; estudiantes del Liceo Bolivariano "Simón Bolívar", Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado y la Universidad Simón Bolívar, realizaron un estudio llamado: "Uso de *Chrysopogon zizanioides* para la Fitoremediación de suelos contaminados por As y Hg", llevado a cabo en el vertedero ilegal de lomas de Tabure II y III, ubicado en el municipio Palavecino del estado Lara-Venezuela. Este estudio fue básicamente realizado mediante los datos obtenidos en el crecimiento de dos diferentes tratamientos: Uno control (sin contaminar), y uno experimental (muestra contaminada del sitio mencionado). Los resultados obtenidos fueron simplemente que los dos tratamientos crecieron y

[42] Troung, D. Uso de vetiver para la fitorremediacion de cromo en lodos residuales de una curtiembre .

[43] Truong, P., & Baker, D. Pasto vetiver para la estabilización y la rehabilitación de los suelos sulfatados ácidos. Coffs Harbour, 196-8. .1996.

[44] Arce Sandra, A. J. Universidad Simón Bolívar. En uso de *Chrysopogon zizanioides* para la fitorremediación de suelos contaminados por As y Hg.2013.

resistieron, en el caso de muestra experimental, los altos niveles de contaminación que ésta poseía. Concluyendo ellos, que la presencia de estos metales altamente contaminantes no afecto las características físicas del vetiver como: rigidez, coloración y marchitez.

También en Venezuela, una mujer llamada Carmen Infante, represento en un estudio al Intevet, el cual es el instituto de tecnología de la compañía venezolana de petróleo (PDVSA), en conjunto con 3 alemanes: Regine Brandt, de la Universidad de Münster, Instituto de Ecología del Paisaje; Rainer Schultze-Kraft [45], de la Universidad de Hohenheim, Instituto de Producción Vegetal y Agroecología en los trópicos y subtrópicos; y Gabriele Broll, de la Universidad de Vechta, Departamento de Geo y Ecología Agrícola. El estudio llamado: "Potencial de Vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) para la Fitoremediación de suelos contaminados de hidrocarburos de petróleo en Venezuela", fue llevado a cabo analizando el comportamiento y crecimiento del Vetiver en un suelo altamente contaminado por hidrocarburos y el mismo proceso en un suelo sin contaminar. En primera instancia, el crudo pesado empezó causándole daños al vetiver, pero la planta desarrollo rápidamente la capacidad de reproducirse vegetativamente. En un principio el desarrollo de las plantas en suelos no contaminados era mejor que el del tratamiento de experimentación, Pero cada vez el vetiver iba siendo más eficiente bajo la influencia del petróleo. Como resultado final se concluyó que efectivamente el vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L). Roberty) es resistente y puede desarrollar en este suelo contaminado tan hostil. Realmente la presencia de vetiver no dejo notar una biodegradación del crudo, y su crecimiento y raíces se vieron afectados en el tamaño, que a comparación con el tratamiento sin contaminación, eran más pequeños.

[45] Regine Brandt, R. S.-K. University of Münster, Institute of Landscape Ecology, Germany. En Potential of Vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. (s.f.).

El siguiente estudio realizado también en Venezuela por: Duilio Torres Rodríguez[46], de la Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado. Unidad de Investigación de Suelos y Nutrición Mineral de Plantas; Adriana Cumana, Odalis Torrealba y Diana Posada, de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Programa de Ingeniería Química; llamado "Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería", se realizó a partir de 4 tratamientos: T1= lodo contaminado sin plantas de vetiver; T2= lodo contaminado + plantas de vetiver; T3= lodo contaminado + abono orgánico + plantas de vetiver; T4= abono orgánico + plantas de vetiver. El estado inicial del lodo proveniente de residuos de una industria de curtiembres, era de 21000 $mg.Kg^{-1}$. Durante los análisis se despreció el tratamiento 4, y los resultados obtenidos en cuanto a la concentración de Cr a los 15 días de siembra se tuvieron los siguientes: t1 = 21000 $mg.Kg^{-1}$, T2 = 13529 $mg.Kg^{-1}$ y por último el T3= 14137 $mg.Kg^{-1}$. Una muy notable disminución de las concentraciones, teniendo en cuenta incluso que la mayoría de plantas no soportan más de 0.03 y 0.2 mg.Kg-1.

En el año 2005, Mónica P. Sacavo K.[47], ingeniera agrónoma de la Universidad Central de Venezuela llevo a cabo un estudio investigativo, del cual se produjo un artículo llamado "Estudio de un sistema de tratamiento de aguas residuales complementario, con pasto vetiver (*Vetiveria zizanioides* L.), provenientes de una planta de producción de gaseosas, en villa de cura, estado Aragua". Se aclara que el nombre científico del pasto Vetiver actualmente es "*Chrysopogon zizanioides*", debido a modificaciones taxonómicas por la comunidad científica.

Mediante la comparación de los niveles en los parámetros de calidad de agua, en afluentes y efluentes del sistema de tratamiento de aguas residuales, se plantearon cuatro tratamientos conformados por una exposición de tiempo de

[46]Duilio Torres Rodríguez, A. C. SCIELO "Revista mexicana de ciencias agrícolas". En Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería. 2010.

[47]Mónica Scavo, O. R. Estudio de un sistema de tratamiento de aguas residuales complementario, con pasto vetiver (*Vetiveria zizanioides* l.), provenientes de una planta de producción de gaseosas, en villa de cura, estado aragua". (s.f.).

residencia (20, 15, 10 y 5 días), asociados a diferentes velocidades de flujo (30, 40, 60 y 120 L.dia^{-1}). Paralelo a cada tratamiento, fue llevado un tratamiento testigo (sin pasto Vetiver).

Como resultados de este estudio se obtuvieron datos muy interesantes, como por ejemplo, que el tratamiento 1, en el análisis de DBO y DQO, mostro una eficiencia de remoción del 96,86% y 98,87%; en el tratamiento 2, se presentó la mayor tasa de remoción de ST (solidos totales) con una eficiencia del 78,3%; y finalmente, en el tratamiento 4 se obtuvo la remoción más alta de SS (solidos suspendidos). Pero de manera general, al ser comparado con la PTAR de Pepsicola, el mejor comportamiento se obtuvo en el tratamiento 2.

4.1.5. Umbrales de tolerancia del pasto vetiver a Hg y Cd.

Se han realizo una serie de pruebas en invernadero para establecer la tolerancia del vetiver con Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd), aplicados individualmente (**Tabla 2**). El Vetiver puede sobrevivir y desarrollarse bien en condiciones de invernadero en suelos contaminados con múltiples metales pesados.

Tabla 2. Umbrales de tolerancia del pasto vetiver a Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd)

Metales pesados	**Umbral de crecimiento de las plantas (mg/kg)**		**Umbral de crecimiento del Vetiver (mg/kg)**	**Umbral de crecimiento del Vetiver reportados en la literatura (mg/kg)**	
	Nivel Hidropónico	Nivel en suelos	Nivel en suelos	Nivel en suelos	Niveles en el tallo
Cadmio (Cd)	0.2-9.0	1.5	20-60	60	45-48
Mercurio (Hg)	NA	NA	>6	17	>0.12

NA: No se ah registrado.
Fuente: Danh, P. T. (2015).

4.1.6. Posible acumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio en el pasto vetiver.

El pasto vetiver se ha convertido en una planta excelente para la fitorremediación es su capacidad para tolerar y acumular una gran variedad de metales pesados, pese a que la mayoría de las plantas vasculares son muy sensibles a la toxicidad causada por metales pesados y sus límites de resistencia a metales, se puede evidenciar las posibles partes donde es acumulado los metales por el pasto Vetiver que son sus raíces y hojas en altas cantidades de los metales Mercurio y Cadmio (**Tabla 3**). El hecho de que la mayoría de los metales pesados se acumulan en las raíces y sólo un porcentaje pequeño lo hace en las hojas, hace que el pasto Vetiver sea muy apropiado para la fito- estabilización de suelos contaminados con metales pesados[48].

Tabla 3. Acumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en el pasto vetiver.

Metales pesados	Condición de suelo		Condición hidropónica	
	Raíces (mg/kg)	Hojas (mg/kg)	Raíces (mg/kg)	Hojas (mg/kg)
Mercurio (Hg)	NA	NA	1310	NA
Cadmio (Cd)	396	44	2232	93

NA: No se ah registrado.
Fuente: Danh, P. T. (2015).

Según Cristina Lomote[49] en el 2014 realizo un estudio titulado “El estudio de la distribución espacial de Mercurio en las raíces de vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L). Roberty)) por micro-PIXE Espectrometría” estableciendo un cultivo hidropónico durante 3 semanas en condiciones controladas y luego fue expuesto a Hg durante 10 días con o sin la adición de los quelantes, comprobando que el Hg fue localizada principalmente en la epidermis de la raíz y exodermis del vetiver[50].

[48] Danh, P. T. El sistema vetiver para mejorar la calidad del agua. 2015.

[49] Cristina Lomonte, y. W. Revista Internacional de fitorremediación . En el estudio de la distribución espacial de Mercurio en las raíces de vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) por micro-PIXE Espectrometría:

[50] Cristina Lomonte, y. W. Revista Internacional de fitorremediación.2014.

La absorción de nutrientes y metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso de su entrada en la cadena alimentaria, la cual es realizada por los pelos radiculares **(Figura 4)**. Siendo esta la ruta del agua, nutrientes y metales pesados hasta las raíces; por medio de las rutas de apoplasto ó simplasto; jugando un papel importante de la Endodermis la banda de Caspary[51].

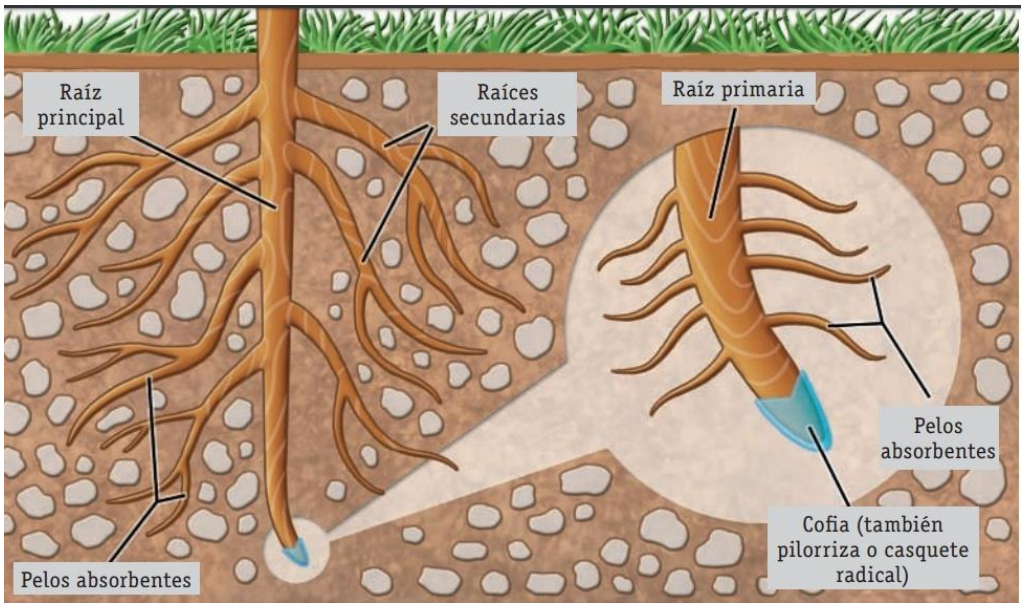

Figura 4. Absorción y transporte de agua, nutrientes y metales pesados por las células especializadas, llamadas pelos absorbentes. ; **Fuente:** El proceso de los nutrientes en las plantas. (s.f).

Después, los nutrientes tienen que atravesar los distintos tejidos de la raíz hasta llegar el xilema que, a su vez, los conducirá hasta el aparato fotosintético de la planta la cual puede seguir dos vías[52].

✓ La **vía transcelular o simplástica**, pasa de célula a célula a través de los plasmodesmos. Se realiza un transporte activo puesto que la concentración de sales minerales en el suelo y agua es menor que la concentración del interior de la planta, penetra en los tejidos de la raíz por osmosis.

[51] Sagan, L. M. El proceso de nutrción de las plantas. (s.f.).
[52] Ibíd.

✓ La **vía extracelular o apoplástica**, esta aprovecha grandes espacios intercelulares existentes entre las células parenquimática del córtex de la raíz; mayor parte del agua y sales minerales aprovechan esta vía (**Figura 5**).

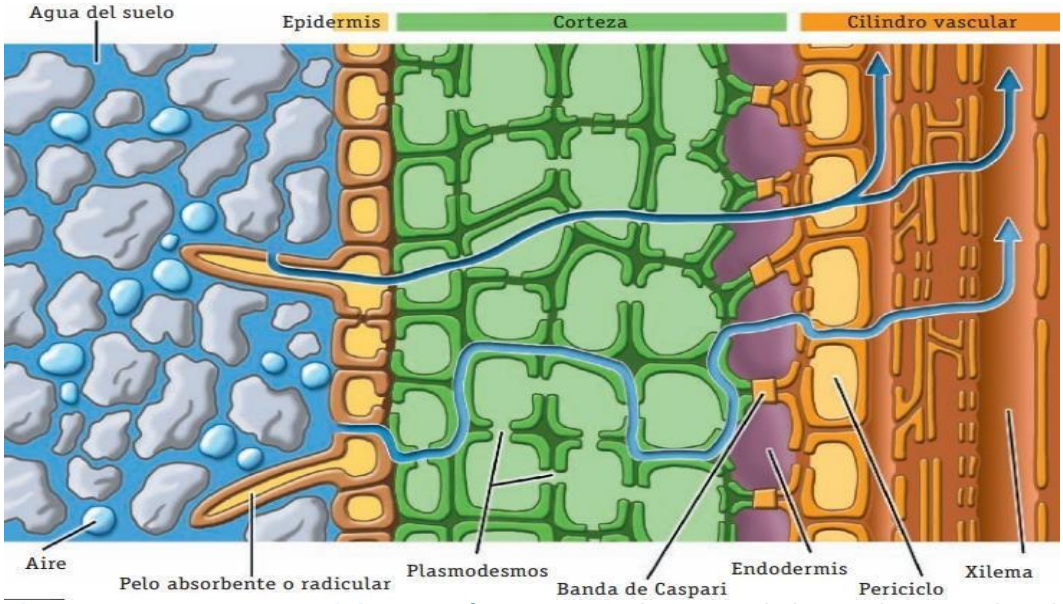

Figura 5. Corte transversal de una raíz. ; **Fuente:** El proceso de los nutrientes en las plantas. (s.f).

Existen tres categorías generales de procesos biotecnológicos en agua:

1. La precipitación extracelular.
2. La captación a través de biopolímeros purificados y de otras moléculas especializadas, derivadas de células microbianas.
3. La biosorción.

En este último "la biomasa viva o muerta, capta los metales a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico"[53].

La biomasa viva utiliza diferentes mecanismos para la captación de los metales pesados entre los cuales se destacan:

[53]Saenz, Laura. Evaluación de un método para la remoción de mercurio y plomo con; *Pseudomona aeruginosa* inmovilizada sobre carbón activado granulado en tres muestras de agua del río magdalena. Universidad de Cundinamarca. Programa de Ingeniería Ambiental. Pág 28. 2016.

1. **La bioacumulación**: Es la bioabsorción de las especies metálicas mediante los mecanismos de bioacumulación a través de las células como se observa en la figura 7.

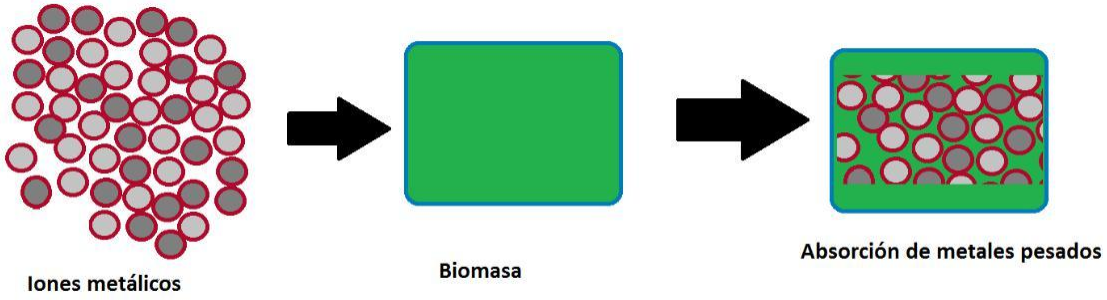

Figura 6.Bioacumulación de los metales en la biomasa viva. ; **Fuente**: Esta investigación**.**

2. **La bioadsorción:** Es la adsorción de los iones en la superficie de la célula, este fenómeno puede ocurrir mediante intercambio iónico, precipitación, complejación o atracción electroestática como se observa en la figura 8.

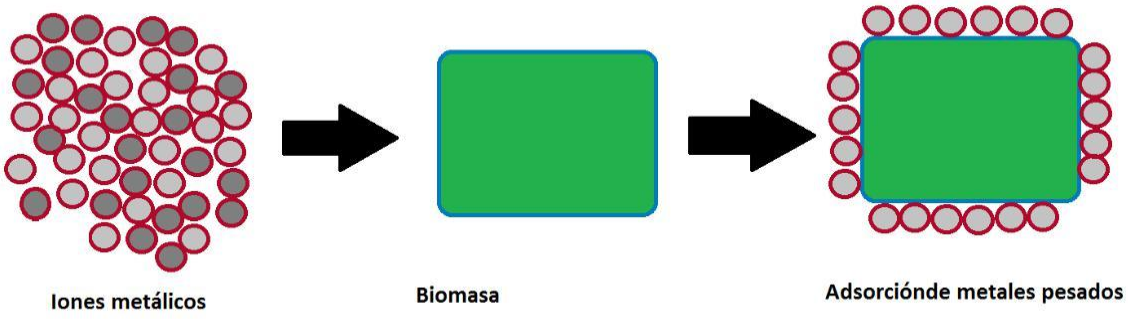

Figura 7. Bioadsorción de los metales en la biomasa viva. ; Fuente: Esta investigación.

En el proceso de esta investigación se descarta una posible desorción, debido a que según el estudio realizado por Mendoza, J.L.; Navarro, A.; Viladevall, M. y Doménech, L.M., llamado "Caracterización y tratamiento térmico de suelos contaminados por mercurio"[54], se comprobó que para el proceso de

[54]Mendoza, J.L.; Navarro, A.; Viladevall, M. & Doménech, L.M. Caracterización y tratamiento terminco de suelos contaminados por mercurio. 2005.

descomposición termal de la mayoría de los compuestos de mercurio presentes en una muestra de suelo contaminada, se requiere la exposición de esta a temperaturas elevadas:

Tabla 4. Temperaturas de desorción de algunas especies de Hg.

Especies de Mercurio	Temp. De liberación de Hg en ºC
Hg^0	< 80, < 150
Hg_2Cl_2	170
$HgCl_2$	< 250, 220
HgO	270-535, 160-435
HgS	300, 280-400, 210-310, 400
Hg en Pirita	450
Hg en Esfarelita	600
Hg – Substancias húmicas	200-300

Fuente: Gaona Martinez, Xavier. 2004.[55]

4.1.7. Estudios bioacumulación en macrofítas.

Tabla 5. Acumulación de los metales pesados en las plantas acuáticas.

ESPECIE	RESULTADO	REFERENCIA
Eichhornia crassipes.	Acumulación máxima de 0,20 ppm en los brotes y 16,0 ppm en las raíces. A 1 ppm de mercurio se alcanzan las concentraciones máximas después de unos16 días.	Riddle et al., 2002
Eichhornia crassipes.	Bioconcentración en los tejidos de las raíces dependiendo del tiempo y la concentración.	Lenka et al.,1990
Eichhornia crassipes.	2,79 mol Hg/g peso seco. Mayor acumulación en raíces que en brotes.	Jana, 1988
Eichhornia crassipes.	Contenidos de mercurio de 110-1.217 g/kg peso seco en invierno; (7,6-16,2) g/kg peso seco en verano. Tendencia del mercurio a permanecer en la raíz.	Ramos et al., 2000
Hydrilla verticillata.	Acumulación de 4,21 mol Hg/g peso seco	Jana (1988)
Ipomoea aquatica.	Mayor proporción de metales en las raíces, las cuales tienen mayor tolerancia que los brotes a las altas concentraciones internas de metal.	Göthberg et al., 2004
Oedogonium areolatum.	Acumulación de 3,35 mol Hg/g peso seco	Jana, 1988

Fuente: Arroyave, M. I, 2006

[55] Gaona Martínez, Xavier. El mercurio como contaminante global.2004

5. MARCO CONCEPTUAL

Absorción: Los organismos vegetales absorben por las raíces a nivel de la zona pilífera, nutrientes que necesitan para sus procesos biológicos. Estos nutrientes son absorbidos a través de unas células especializadas, que son los pelos absorbentes, que se encuentran en la zona pilífera de la raíz[56]. Las raíces y las hojas de las plantas solamente absorben los nutrientes en forma de iones que se encuentran en la solución del suelo[57].

Adaptación Hidropónica: Es una herramienta que permite el cultivo de plantas sin suelo, es decir sin tierra cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos hídriconutricionales, a través del agua y solución nutritiva[58].

Análisis de covarianza: Técnica estadística empleada cuando no se puede controlar una o más variable extrañas; con un experimento de bloques completos al azar[59].

Bioacumulación: Proceso por el cual los organismos vivos, incluyendo a los seres humanos, absorben contaminantes mucho más rápido de los que sus cuerpos pueden eliminar, por lo que el contaminante se acumula todo el tiempo[60].

Biotecnología ambiental: Es la aplicación de procesos biológicos modernos para la protección y restauración de la calidad del ambiente[61].

Conductividad: Da una estimación acerca de la concentración aproximada de las sales minerales presentes lo en el agua[62].

---

[56] El Ministerio de Educación, C. y. La nutrición de las plantas. En Absorción de agua y sales por la raíz. (s.f.)

[57] Infojardin. Absorción de nutrientes.2016.

[58] Gimenez, J. B.CULTIVO EN HIDROPONÍA. En Introducción al cultivo hidropónico (pág. 10). 2015

[59] SCORP. En Análisis de Covarianza.2006.

[60] Serrano, L. B. Ambiente ecologico.En contaminación por Mercurio y sus consecuencias e impactos en la ecología y Población Rural. 2010.

[61] Noguera, N. G. Biotecnología ambiental y Biotecnología vegetal. En BIOTECNOLOGÍA. 2005.

[62] Red, T. d. Estudio de la contaminación por metales pesados de la cuenca Llobregat. En Metales pesados y componentes mayoritarios en aguas. (s.f.).

Covariable: Variables continuas independientes que junto a una o más variables en los tratamientos, ayuda a explicar una variable de respuesta continua[63].

Densidad: Número de individuos de una especie que existe por unidad de área[64] , en nuestro caso es el número de individuos presentes en cada cubeta plástica.

Evaporímetros: Son instrumentos destinados a medir el ritmo a que tiene lugar la evaporación en el seno de la atmósfera; la evaporación se expresa por la altura del agua evaporada, deduciéndola mediante lecturas diarias del nivel, previa corrección por la cantidad de agua caída en forma de precipitación cuando ésta tenga lugar.[65]

Fitorremediación: Consiste en la remoción, transferencia, estabilización y/o degradación y neutralización de compuestos orgánicos, inorgánicos y reactivos que resultan ser tóxicos en el agua y suelo[66].

Higroscopicidad: Es una propiedad que poseen los materiales granulares que depende de la porosidad del material y está definida como la capacidad para absorber o ceder la humedad del ambiente que lo rodea[67].

Homocedasticidad: Hipótesis de igualdad de varianzas poblacionales en distintos grupos[68].

Homogeneidad: Igualdad mayor o menor de los valores de una variable o de una combinación de características en un conjunto geográfico[69].

Isolineas: Son parte de las representaciones graficas de áreas y se definen como líneas que unen puntos de igual valor o valor constante en el terreno, Estas líneas

[63] Glosarios de términos especializados. Términos estadísticos.En Covariable. 2011.

[64] Hernández, F. Asistencia técnica agrícola.En la densidad de siembra de los cultivos. (s.f.).

[65] Navarra, G. d. Meteorología y climatología de Navarra. 2012

[66] Angélica Evelin Delgadillo López1, C. A.-R. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. SCIELO "Tropical and subtropical agroecosystems". 2011.

[67] Rfael Esteban Ortega-Ortega, J. D.-H.-N. Revista Colombiana de Biotecnología. Obtenido de Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (Gynerium sagittatum) (Aubl) Beauv. in vitro. 2005.

[68] Ibid. Términos estadísticos. En Homocedasticidad. 2011.

[69] Hypergéo. En homogeneidad. 2014.

se pueden observar mejor en lo que comúnmente conocemos como curvas de nivel o Isohipsas, que son líneas que unen puntos de igual elevación [70]

Método de comparación de Fisher: Utiliza la tasa de error individual y el número de comparaciones para calcular el nivel de confianza simultáneo para todos los niveles de confianza[71].

Modelo bivariado: Incluye una variable dependiente y al menos una variable independiente[72].

Potencial de hidrogeno (pH): Es una medida de la acidez o basicidad de una solución, determinando la concentración de iones o cationes hidrógeno [H+] presentes en determinada sustancia, la escala de pH se determina con una recta numérica que va desde el 0 hasta el 14; indicando que el número 7 pertenece a las soluciones neutras. El sector izquierdo de la recta numérica indica acidez, que va aumentando en intensidad cuando más lejos se está del 7.[73]

Prueba de normalidad: genera una gráfica de probabilidad normal y realiza una prueba de hipótesis para examinar si las observaciones siguen o no una distribución normal[74].

Prueba de Shapiro-wilks: Esta prueba mide la fuerza del ajuste con una recta. Cuanto mayor sea este estadístico mayor desacuerdo habrá con la recta de normalidad, por lo que podremos rechazar la hipótesis nula. Esta prueba se usa para muestras inferiores a 30 casos[75].

---

[70] Eskakeados", P. E. Obtenido de METEOROLOGÍA - TIPOS DE ISOLÍNEAS Y FUNCIÓN QUE DESARROLLAN CADA UNA. 2016.
[71] Minitab 17. En método de la diferencia significativa mínima de Fisher (LSD). 2016.
[72] Universidad de Tarapacá. Análisis estadístico univariado, bivariado y variables control. (2012).
[73] Broky, M. L. Escuela normal "Juan P. Pringles". Laboratorio: PH. (s.f.)
[74] Quiñones, R. T. Universidad Nacional. En prueba de normalidad. 2011.
[75] Flores, S. E. Apéndice A. Prueba de normalidad de shapiro-wilk. (s.f.)

Rizofiltración: Eliminar del medio hídrico contaminantes a través de la raíz[76].

Salinidad: Es la cantidad total de sales disueltas presentes como cationes y aniones en un volumen determinado de agua[77].

Tasa de disminución: Expresar un cambio en un valor, por medio de un porcentaje[78].

Temperatura: Es un parámetro que nos revela que existe un contraste o gradiente de energía que provoca el transfer miento de calor, este factor es importante puesto que regula procesos vitales para los organismos vivos, así como también afecta las propiedades químicas y física de factores abióticos en un ecosistema. [79]

Toxicidad: Grado de efectividad que poseen las sustancias que, por su composición, se consideran tóxicas[80].

[76] Angélica Evelin Delgadillo López, C. A.-R. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. SCIELO "Tropical and subtropical agroecosystems".2011.
[77] Mayagüez, U. d. Manual parte 2. parametros fisico-quimicos: SALINIDAD. (s.f.)
[78] J. Pérez Carballo, E. V. En Introducción a la gestión financiera de la empresa (pág. 164). Madrid .2013.
[79] Mayagüez, U. d. Manual parte 2. parametros fisico-quimicos: Temperatura. (s.f.)
[80] Bligoo. Toxiambiental. En glosario.(s.f.).

6. MARCO GEOGRÁFICO

6.1. Ubicación geográfica del rio Bogotá

La cuenca del río Bogotá se encuentra localizada en el departamento de Cundinamarca y junto con los ríos Sumapaz, Magdalena, Negro, Minero, Suárez, Blanco, Gacheta y Machetá, conforma el grupo de corrientes de segundo orden del departamento. Tiene una superficie total de 589.143 hectáreas que corresponden a cerca del 32% del total de la superficie departamental.

La Cuenca del río Bogotá limita en su extremo norte con el Departamento de Boyacá, en el extremo sur con el Departamento del Tolima, al occidente con los municipios de Bituima, Guayabal de Síquima, Albán, Sasaima, La Vega, San Francisco, Supatá y Pacho y al oriente, en el área incluida dentro del presente estudio es decir sin incluir la subcuenca del río Tunjuelo, con los municipios de Nilo, Tibacuy, Silvania, Chipaque, Ubaque y Choachi.

El rio Bogotá constituye la corriente principal de la cuenca recorriendo desde su nacimiento a los 3300 m.s.n.m en el municipio de Villa pinzón, subcuenca rio Alto Bogotá, hasta su desembocadura al rio Magdalena a los 280 m.s.n.m en el municipio de Girardot, subcuenca rio bajo Bogotá Apulo – Girardot, un total de 308 kilómetros. Las subcuencas de tercer orden ocupan cerca de la tercera parte 32% del aérea total de la subcuenca[81].

Según el estudio realizado por la CAR[82], determinó la precipitación, temperatura y evapotranspiración por medio de las isolíneas y la distribución temporal de los parámetros más relevantes. La cuenca registra una precipitación entre 400 y 2200 milímetros anuales, la temperatura en la cuenca oscila entre los 6 y 30° C.

[81] CAR. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. Pág. 2, 3, 4,5. 2006
[82] Ibid., Pág. 6.

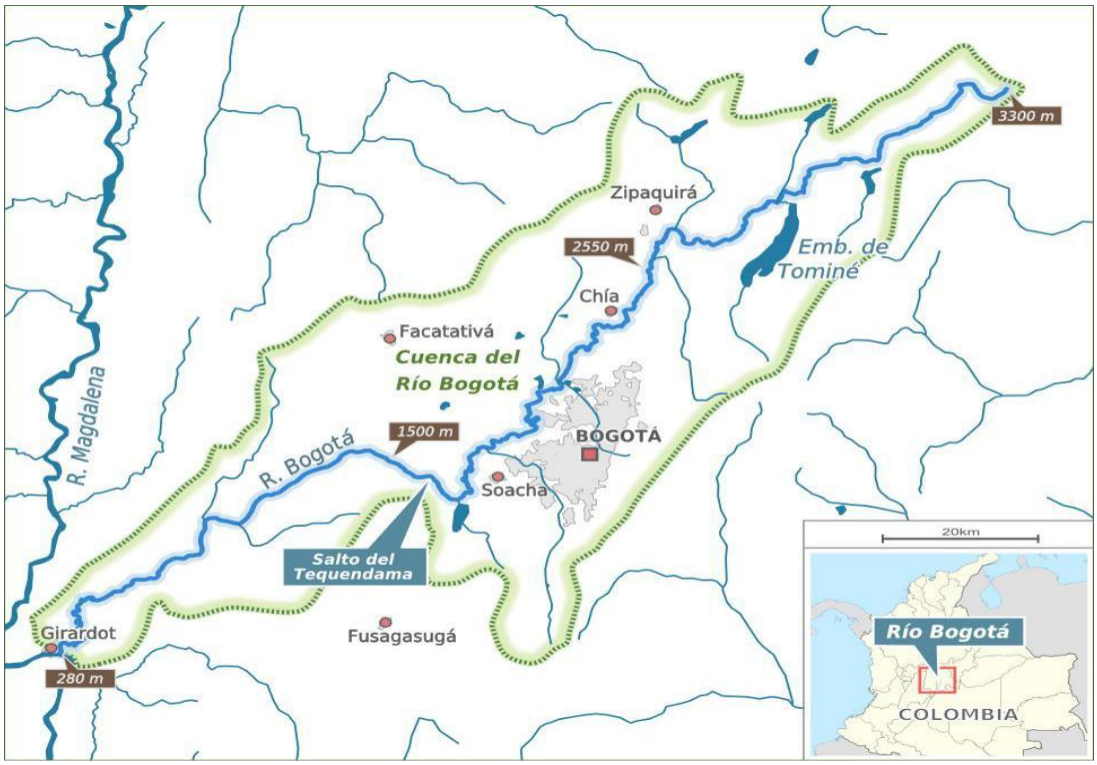

Figura 8. Mapa del río Bogotá. ; **Fuente:** Castro, F. S.; 2016

Figura 9. Las tres cuencas a lo largo de la trayectoria del rio Bogotá. ; **Fuente**: Ramos, E.; 2014

6.2. Ubicación y características agroclimatológicas de la hacienda el Silencio

La hacienda el Silencio, se localiza en el departamento de Cundinamarca; en el kilómetro 25 vía Girardot-Tocaima a 114 kilómetros de Bogotá, las coordenadas geográficas fueron tomadas del programa Pixelis[83] la cual la sitúa a 4º 26' 25.58622702466602'' de latitud norte y a 74º 39' 50.498614311218184'' de longitud oeste, con una altitud de 344.6 m.s.n.m; y según el plan de desarrollo de Tocaima, este sitio cuenta con una temperatura anual de 27° C.[84]

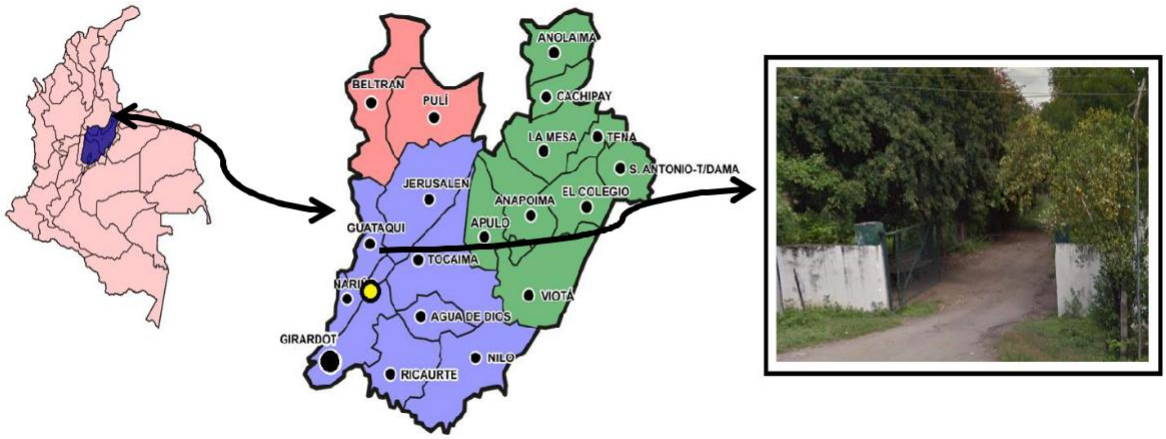

Figura 10. Ubicación de la hacienda el Silencio; **Fuente**: Esta investigación.

[83] Pixelis. En PixelisMaps.2015.

[84] PJRL. PLAN DE DESARROLLO TOCAIMA (2012 – 2015).

7. MARCO LEGAL

La normatividad ambiental que rige Colombia actualmente en la contaminación de los vertimientos al recurso hídrico por Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) son:

Tabla 6. Normatividad Colombiana

Normatividad	Articulo	Contenido
Decreto 2811 de 1974	13	Tasa retributivas de servicios ambientales.
	18,19	EL gobierno Nacional calculara por sectores de usuarios y por regiones que individualizaran, los cotos, correcciones o eliminación de los efectos nocivos al ambiente.
	32	Cualquier actividad que utilice sustancias radioactivas debe cumplir los requisitos necesarios para garantizar la protección del ambiente.
	134	Garantizar la calidad de agua.
	139	Se necesitan planes de desagüe, cañerías y alcantarillados y disposición de aguas residuales, previamente aprobados.
	145	Cuando las aguas servidas no puedan llevarse a sistemas de alcantarillado, su tratamiento deberá hacerse de modo que no perjudique las fuentes receptoras, los suelos, la flora o fauna.
	163	Sanciones, normas que rigen las concesiones de agua.

Decreto 1541 de 1978 (Derogado por el decreto 2858 de 1981)	1 6	Las Corporaciones Regionales de Desarrollo podrán otorgar permisos especiales hasta por el término de un año, para la realización de estudios de factibilidad sobre aprovechamiento de aguas con destino a la formulación de proyectos de riego a nivel de finca o grupos de fincas, cuando el costo de tales estudios y de las obras civiles correspondientes vayan a ser financiados con recursos del Banco de la República en los términos de la Resolución número 28 de 1981 expedida por la Junta Monetaria, o de las disposiciones que se expidan con igual finalidad. Las concesiones de agua en los términos del presente decreto podrán ser otorgadas hasta por veinte años, su vigencia está condicionada al otorgamiento del crédito para financiar las obras de infraestructura física.
Decreto 4728 de 2010 (Modifica parcialmente el decreto 3930 de 2010)	1 2 6	Fijación de la norma de vertimiento Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos en Aguas Superficiales y Subterráneas Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos
Decreto 2667 de 2012	8	Se reglamenta la tasa retributaria por la utilización directa e indirecta de agua como receptor de los vertimientos puntuales.

Ley 9 de 1979		Protección del ambiente, por la cual se dictan Medidas Sanitarias.
Resolución 2115 de 2007	5,7	Características químicas que tienen efectos en la salud humana y consecuencias económicas e indirectas.
Resolución 0631 de 2015	8,9,10,11,12,13,14,15,16. Aplican los mismos valores de vertimiento (según actividad en el decreto 3830/10, del art. 28) a cuerpo de agua superficial.	Establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Fija los valores máximos permisibles de Cadmio en instalaciones existentes 0,04 mg/L y en instalaciones nuevas 0,01 mg/L, para el Mercurio (Hg) en instalaciones existentes o nuevas 0,01 mg/L.
Resolución 1207 de 2014	7	Estable los criterios de calidad para el uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente los siguientes criterios de calidad:

Fuente: Esta investigación.

Para la protección de la cuenca del río Bogotá la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) reglamenta:

Tabla 7. Normatividad para la cuenca del río Bogotá.

Normatividad	Contenido
Decreto 2667 de 2012	La utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones.
Acuerdo 043 de 2006	Establece los objetivos de calidad para el agua para la cuenca del rio Bogotá a lograr en el año 2020.

Fuente: Esta investigación.

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC establece algunas normas:

Tabla 8. Normas Técnicas.

Norma Técnica 813 (segunda actualización)	Norma oficial para la calidad de agua colombiana.

Fuente: Esta investigación.

La red Colombina de Vetiver establece las normas técnicas de la tecnología vetiver para la implementación en control de erosión y protección de infraestructura en la cual nombra la técnica de plantación y mantenimiento. Además da una idea para elaborar la unidad de medida que se necesita en cierto territorio.

8. METODOLOGÍA

Este es un estudio experimental en el que se determinó la eficiencia del pasto vetiver para remover mercurio y cadmio con agua de la cuenca baja del río Bogotá, en el que se manipula como variables independientes la densidad de siembra y el tiempo de exposición, analizando la influencia de tres covariables: Conductividad, pH y Temperatura, en la disminución de Hg y Cd.

Esta investigación se divide en dos fases; la primera fase consistió en cuantificar la evaporación del agua en el sitio que se realizó la investigación, en conjunto con la adaptación hidropónica de las macollas del pasto vetiver. Después de esto, como segunda fase, se instalaron los tratamientos poniendo a prueba el pasto vetiver durante tres meses, tiempo en el que se realizaron mediciones mensuales en el agua de la concentración de mercurio y cadmio, midiendo al mismo tiempo las covariables: Conductividad, pH y Temperatura.

8.1. Universo, población y muestra.

- **Universo:** Rio Bogotá
- **Población:** Cuenca baja
- **Muestra:** Tramo Girardot – Tocaima

8.2 Fase 1

8.2.1 Evaporímetros artesanales.

Se tomó agua cruda de un canal de riego cercano a la zona urbana de Tocaima - Cundinamarca, cuyas aguas son provenientes de la cuenca baja del rio Bogotá, a las cuales no se les realiza ningún tratamiento previo para su distribución. Con esta agua se realizó una simulación con evaporímetros artesanales **(Figura 11)**, con el fin de hallar un método aproximado para evitar la pérdida de agua por evaporación, debido a que en esta zona la evaporación anual es de 1300 mm[85].

[85] Méndez Cárdenas, L. I. Alternativas de abastecimiento del recurso hídrico en la cuenca del río Calandaima en Cundinamarca-Colombia. Bogotá, DC, Colombia.2014.

Los evaporímetros fueron ocho botellas plásticas recicladas de un litro de capacidad, las cuales fueron distribuidas de la siguiente forma:

Figura 11. Establecimiento de evaporímetros artesanales.
Fuente: Esta investigación.

- 2 botellas (una transparente y otra pintada de azul), enterradas en el suelo a la mitad de su altura, bajo polisombra de 50%.
- 2 botellas (una transparente y otra pintada), enterradas en el suelo a la mitad de su altura, a exposición directa del sol.
- 2 botellas (una transparente y otra pintada), sobre la superficie del suelo, bajo polisombra de 50%.
- 2 botellas (una transparente y otra pintada), sobre la superficie del suelo, a exposición directa del sol.

Este proceso se describe en la figura 12, la cual duro veintiún días, en los que se realizaron dos mediciones por semana, principalmente de las variables: Altura del agua (cm) y temperatura (°C); y en segunda instancia de salinidad (ppm) y pH, con el fin de monitorear estas variables relacionadas con los metales pesados, en especial la salinidad. Estas mediciones se realizaron con el equipo multiparámetro EC500 **(figura 13)**

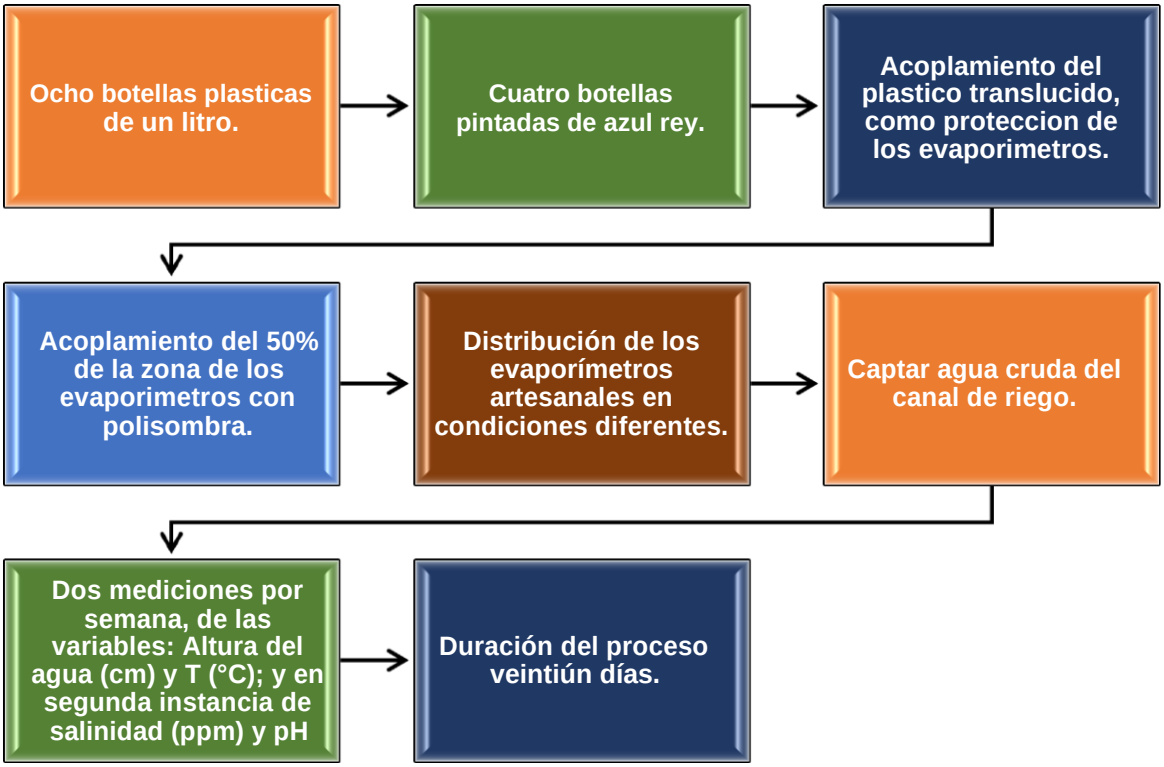

Figura 12. Procedimiento para el establecimiento de los evaporímetros artesanales.
Fuente: Esta investigación.

Figura 13. Multiparámetro EC500.; Fuente: **Esta investigación.**

8.2.2 Adaptación hidropónica.

Paralelamente al proceso anterior, se llevó a cabo la compra de 289 macollas de pasto Vetiver **(Figura 14)**, compuestas cada una por aproximadamente dos plántulas, para un total de 578 plántulas para realizar el proceso de adaptación hidropónica en la zona urbana del municipio de El Espinal – Tolima, lugar escogido para poder realizar un monitoreo constante. De estas plántulas se estimó un 7% de mortalidad basados en las características de resiliencia que posee el pasto Vetiver y asumiendo que debe ser menor al 10%[86].

Figura 14. Macollas del Pasto Vetiver. ; **Fuente:** Esta investigación.

La adaptación hidropónica del pasto vetiver se realizó según el procedimiento sugerido por Asprilla [87]en su "protocolo para rizofiltración de efluentes contaminados con Mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie Vetiver" (Figura 15), donde se desinfectaron las macollas con detergente en polvo, algunas gotas de hipoclorito de sodio y agua (Figura 16). Se realizaron cortes a quince centímetros en el área foliar y a cinco centímetros en el sistema radicular (Figura 17). Para el proceso se usaron 173 botellas plásticas recicladas

[86]Sanchez, S., & Murillo, O. Desarrollo de un método para controlar la calidad de producción de plántulas en viveros forestales: estudio de caso con ciprés. 2004.

[87]Asprilla, N. I. Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver (*Vetiveria zizainodes*). Universidad de Manizales. 2013.

con una capacidad de tres litros (Figura 18), en las cuales fueron depositadas las macollas. Estas botellas fueron aforadas con agua de grifo sin tratamiento y, puestas sobre una plancha de concreto con una exposición directa a la luz solar (Figura 19). El proceso duro cinco meses y las plántulas que se desarrollaron en ese sistema, fueron usadas en sus condiciones finales para establecer los tratamientos.

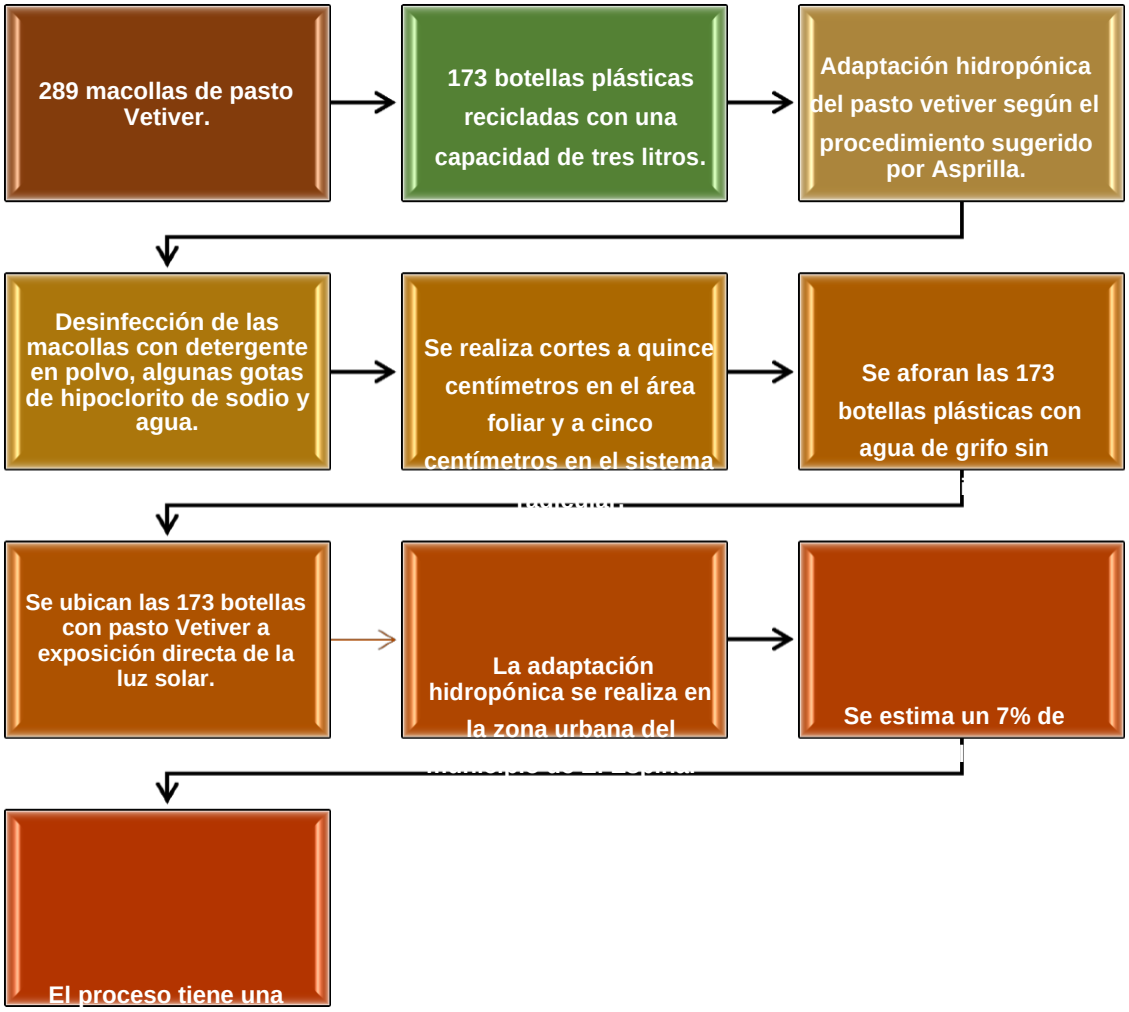

Figura 15. Procedimiento para el establecimiento de la adaptación hidropónica. ; **Fuente:** Esta investigación.

Figura 16. Desinfección de las macollas. ; Fuente: **Esta investigación.**

Figura 17. Corte de raíz y parte foliar del pasto vetiver
Fuente: Esta investigación.

Figura 18. Botellas plásticas de 3L. ; **Fuente:** Esta investigación.

Figura 19. Exposición directa a la luz solar**. ; Fuente:** Esta investigación.

8.3 Fase 2

8.3.1 Establecimiento de los tratamientos.

Para el establecimiento de los tratamientos (Figura 20), se construyó una infraestructura de protección contra la lluvia, que contaba con un techo en plástico translucido y una cerca en alambre de pua para evitar el ingreso de bovinos (Figura 21). En primera instancia se planteó la preparación de una muestra sintética contaminada con los metales de interés (Hg y Cd), para determinar la eficiencia del *Chrysopogon zizanioides* (L. Roberty) para su remoción. Sin embargo esta propuesta se replanteo debido a que el diseño experimental usado requería, por cuestiones morfológicas del pasto (exposición directa al sol) y ambientales (evaporación), el uso de 13 canecas con un volumen de 55 galones cada una, que equivaldrían a 2.706,57 litros de agua que debía ser contaminada con dos de los metales más tóxicos del mundo, y posteriormente, esta agua debía ser tratada y tener una disposición final adecuada, que incrementaría los costos y riesgos.

Por este motivo se optó por usar agua de la cuenca baja del río Bogotá debido a que según sus antecedentes históricos, es una de las cuencas de mayor contaminación en Colombia, que contiene altas concentraciones de Mercurio y Cadmio, según la Corporación Autónoma Regional en el 2009[88], informa que el "Río Bogotá recibe un total de 51,62 Toneladas/mes de metales pesados provenientes de vertimientos industriales". Por estos motivos, además de motivos morales, fue más viable para la presente investigación el uso de un agua ya contaminada.

[88]CAR. Evaluación ambiental y plan de gestión ambiental. Obtenido de Rio Bogotá, adecuación hidráulica y recuperación ambiental. 2009.

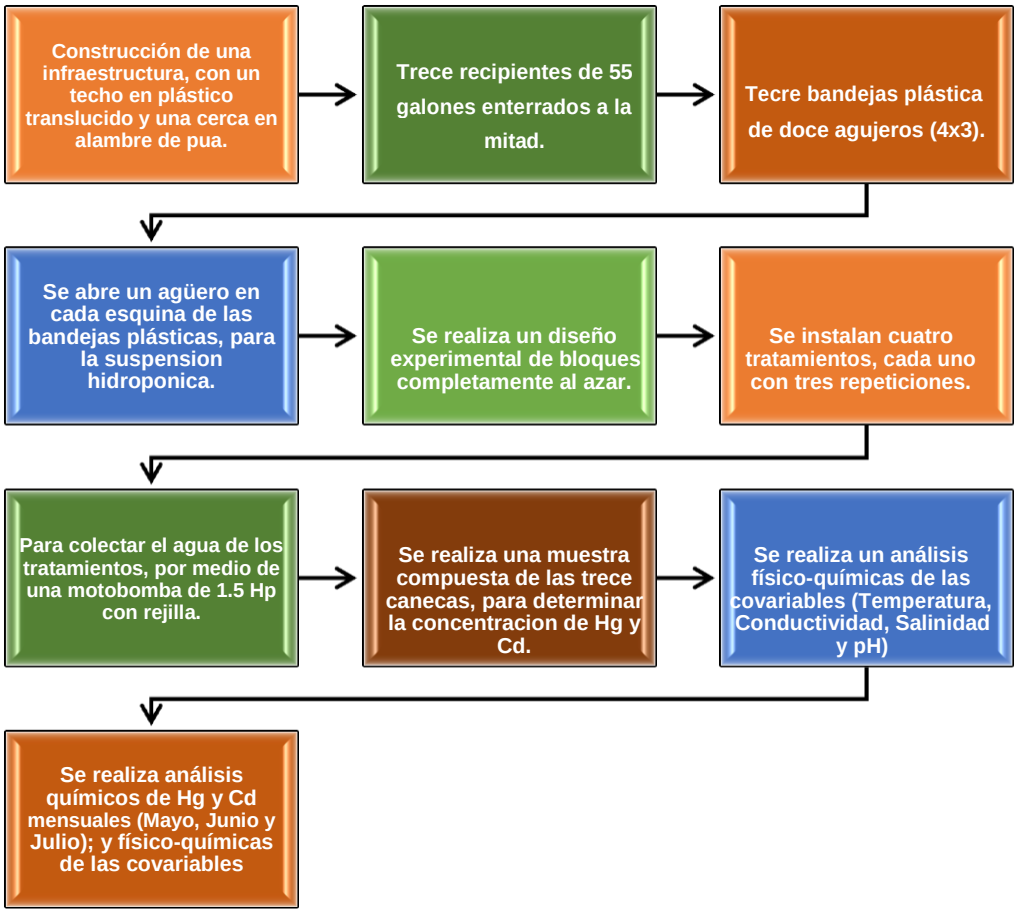

Figura 20. Procedimiento para el establecimiento de los tratamientos**. ; Fuente:** Esta investigación.

Los trece recipientes de 55 galones fueron enterrados a la mitad, y en cada uno de ellos se colocó una bandeja plástica de doce agujeros (4x3), adaptándolas a un sencillo sistema de flotamiento; utilizando un taladro para abrir un agüero en las esquinas para amarrar cada bandeja con fibra plástica, para mantenerlas flotando a nivel (Figura 22).

Figura 21. Infraestructura de protección contra la lluvia. ; Fuente: **Esta investigación.**

Figura 22. Sistema de flotamiento**. ; Fuente:** Esta investigación.

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar, se instalaron cuatro tratamientos, cada uno con tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en las diferentes densidades de siembra (Tabla 9) cada agujero contenía seis plántulas.

Tabla 9. Tratamientos del experimento

Tratamiento	Densidad de Siembra (%)	Número de plántulas
T0	0%	0
T1	25%	18
T2	50%	36
T3	75%	54
T4	100%	72

Fuente: Esta investigación.

Para colectar el agua de los tratamientos, se utilizó una motobomba de 1.5 Hp con rejilla (Figura 23). El agua captada fue sometida a un análisis para determinar la presencia y concentración de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) mediante el análisis por absorción atómica de una muestra compuesta de las trece canecas que fue enviada al laboratorio de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA. También fueron monitoreadas las características físico-químicas establecidas como covariables (Temperatura, Conductividad, Salinidad y pH), en cada uno de los cuatro tratamientos y replicas.

Figura 23. Motobomba de 1.5 Hp con rejilla. **; Fuente:** Esta investigación.

Luego de instalados los tratamientos se realizaron análisis químicos de Hg y Cd mensuales (Mayo, Junio y Julio), en muestras enviadas al mismo laboratorio inicial; en conjunto se realizó el registro de datos de las covariables: Conductividad (µS/cm), pH y Temperatura (°C).

Figura 24. Muestras de agua enviadas a CORPOICA**. ; Fuente:** Esta investigación.

8.4 Técnicas o instrumentos para la recolección de datos.

- Manual de pasto vetiver.
- Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver (*Vetiveria zizanioides*).
- Toma de muestras de aguas residuales (IDEAM).
- Multiparámetro EC500
- HandyLab 200 (SI Analytics)
- HandyLab 200 (SI Analytics)
- Tubo de PVC 1”
- Cinta métrica
- Análisis físico químicos

8.5 Análisis de Evaporímetros Artesanales.

La velocidad de la evaporación en la zona donde se instalaron los tratamientos es un factor de primordial antes de poner en marcha la fase experimental. Por este motivo para determinar la velocidad de pérdida de agua en la cuenca baja del río Bogotá, se elaboraron evaporímetros artesanales expuestos a condiciones diferentes (Color: Transparente y azul rey; Área expuesta al aire libre: expuesta completamente y enterrada al 50%; Exposición al sol: Directa y bajo polisombra.), que fueron instalados en la hacienda El Silencio (Lugar de instalación de los tratamientos); con el fin de evaluar la pérdida de agua mediante los centímetros (cm) que disminuyo la columna de agua en cuatro semanas a la intemperie.

Después de este tiempo se determinó que evaporímetro con su respetiva condición fue más efectivo hallando el menor porcentaje de perdida de agua. Este análisis se emplea con el objeto de determinar el color de las canecas y si deben estar enterradas puesto que este factor puede influir negativamente en los análisis de las muestras de agua, debido a que el (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) se expuso a un tiempo de tres meses.

8.6 Análisis Físico Químicos

Para los análisis químicos se usaron botellas plásticas de 350 ml esterilizadas, las cuales fueron usadas para tomar las muestras de agua a intervalos de un mes bajo la metodología de Toma de muestras de aguas residuales (IDEAM). Estas muestras fueron enviadas al Laboratorio de CORPOICA (Mosquera) para determinar la concentración de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) mediante el método de absorción atómica. Simultáneamente fueron monitoreadas las variables pH, Conductividad y Temperatura, estos registros se analizaron en el paquete estadístico INFOSTAT para determinar la relación que existe con las variaciones de concentraciones de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd).

Inicialmente se planteó en el anteproyecto la determinación de la tasa de absorción que podría brindar el vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty), pero ante la falta de instrumentación del laboratorio de la Universidad de Cundinamarca y las dificultades económicas para realizar los análisis bromatológicos pertinentes en otro laboratorio, se optó por establecer una tasa de reducción probable de los metales pesados en los tratamientos con el pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) producto ajustado al alcance y capacidades de los investigadores.

8.7 Análisis estadístico

La tabulación de los datos y los gráficos se realizaron en el programa Microsoft Excel. Para el análisis estadístico de los datos se seleccionó el análisis de covarianza, ya que permite evaluar el efecto de factores controlados en un experimento, y también el de las covariables, que son variables a las que se les hizo seguimiento pero no se controlaron[89]. En el presente estudio los factores controlados son la densidad de pasto Vetiver y el tiempo de exposición, mientras las covariables son el pH, la conductividad y temperatura. El análisis de covarianza fue realizado usando el paquete estadístico INFOSTAT; verificando los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuos, por medio de los test de Shapiro-Wilky Levene respectivamente.

Los análisis correspondientes, realizados con el software INFOSTAT, fueron corridos bajo un modelo bivariado, tomando la conductividad, el pH y la temperatura como covariables, es decir, haciendo un análisis de covarianza para el modelo $y_{ij} = \mu + \tau_i + \tau_j + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon_{ij}$ en el que τ_i representa los efectos del tiempo, τ_j el efecto de las densidades y X_1 , X_2 , X_3 las covariables.

[89]Urdaneta, U. R. Programa interactivo de Análisis estadístico. Obtenido de Capítulo VI Análisis de Covarianza (s.f.).

9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.2 Análisis de la evaporación.

En el ensayo con los evaporímetros artesanales se observó que la botella azul enterrada, expuesta al sol, tuvo una disminución en el nivel del agua de un 33.3%, al ser esta la menor disminución se optó por replicar a escala mayor las condiciones de este evaporímetro, usando canecas de (55) galones de color azul enterradas a la mitad, para el establecimiento de los tratamientos con el fin de garantizar al máximo la inmersión del sistema radicular del pasto Vetiver, puesto que para el proceso de rizofiltración, según Núñez, Mesa y Ortega[95], se hace énfasis en el uso de la raíz para absorber metales pesados, motivo por el cual la permanencia de ésta en el agua a tratar es muy importante.

Tabla 10. Mediciones de altura del agua en los evaporímetros durante (3) semanas.

Evaporímetros	InicialAltura	1Semana	2Semana	3Semana	disminución de%
Botella T.SE.S	22.5	16.5	12.5	12	46.6%
Botella A.SE.S	22.5	S/D	S/D	S/D	S/D
Botella T.E.S	22.5	15.5	14.5	12.5	44.4%
Botella A.E.P	22.5	16	12.5	11.5	43.8%
Botella T.SE.P	22.5	16.8	15	14	37.7%
Botella A.SE.P	22.5	16	13.5	11	51.5%
Botella T.E.P	22.5	17.5	16	14	37.7%
Botella A.E.S	22.5	17	16	15	33.3%

S/D: Sin datos; **T.SE.S:** Transparente sin enterrar, expuesta al sol; **A.SE.S:** Azul sin enterrar, expuesta al sol;**T.E.S:** Transparente enterrada, expuesta al sol; **A.E.S:** Azul enterrada, expuesta al sol; **T.SE.P:** Transparente sin enterrar, expuesta a polisombra; **A.SE.P:** Azul sin enterrar, expuesta a polisombra; **T.E.P:** Transparente enterrada, expuesta a polisombra; **A.E.P**: Azul enterrada expuesta a polisombra; Los registros **S/D** fueron causados por la pérdida del evaporímetro: Botella **A.SE.S**, por motivos agentes externo, posiblemente haya sido el viento o la acción de algún animal.

Fuente: Esta investigación.

[95] Nuñez Lopez, R. A., Mesa Vong, Y., & Ortega Borgues, R. Rizofiltración, lixiviación y electro-recuperacion: una propuesta integral para el tratamiento de aguas contaminadas con plomo apartir del lirio acuatico (Eichhormia crassipes). Ciencia. 2009

9.3 Eficiencia de la Adaptación Hidropónica.

El proceso de adaptación hidropónica tuvo un eficiencia del **94,46%**, terminando con (546) plántulas adaptadas al medio acuático y con una mortalidad del **5,54%**, un dato mucho menor al que se había estimado en la planificación de esta fase. Asprilla[96] afirma claramente que: "el vetiver es una gramínea que puede ser usada bajo condiciones hidropónicas, puesto que es nativa de ambientes higroscópicos, como humedales, lagunas pantanosos y extremadamente tolerante a sequias".

9.4 Análisis de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) Inicial.

En el momento en que fue tomada la muestra inicial de Hg y Cd, fueron medidas las condiciones iniciales consideradas relevantes (Tabla 11). Las concentraciones iniciales de Hg y Cd: 0,7 mg/L y 0,09 mg/L; superan las concentraciones admisibles para el uso de aguas residuales tratadas para cultivos de pastos y forrajes, según la Resolución 1207 del 2014, donde se establecen valores límites máximos permisibles para Cadmio: 0,01 mg/L; y Mercurio: 0.002 mg/L.

De igual manera la concentración inicial (Hg: 0.7 mg/L; Cd: 0.09 mg/L) sobrepasa las concentraciones que establece La Resolución 2115 del 2007, en el capítulo II, donde afirma que los valores máximos aceptables de Hg y Cd para evitar efectos adversos a la salud son 0,001 mg/L y 0,003 mg/L respectivamente

En un estudio realizado por Villa, Escobar, Ayala, Mortera, Bello, Ortigoza[97] llamado "Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México" se analizaron los metales pesados de en un cuerpo de agua usado para riego agrícola, recreación y uso doméstico. Las concentraciones

---

[96]Asprilla, N. I. Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver (*Vetiveria zizainodes*). Universidad de Manizales. 2013.

[97]Óscar Raúl MANCILLA–VILLA, H. M. Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. Revista internacional de contaminación ambiental SCIELO. 2012.

encontradas de Hg (0,005 $mg.L^{-1}$) y Cd (0,01 $mg.L^{-1}$) fueron menores que las encontradas en esta investigación.

La muestra de esta investigación fue tomada el 04 de abril de 2016, fecha que el IDEAM aseguró, estaba dentro de una continuación del fenómeno del niño que tuvo el año 2015. Este fenómeno como tal, abarco hasta el primer trimestre del año 2016, según agencias internacionales que notificaron al Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y al IDEAM. Según la fecha en que se muestreo y los datos de la innegable "sequia", se atribuye la alta concentración de estos metales pesados a la disminución de la dilución y a un flujo del agua más cercano al fondo de lodos, que es el lugar de concentración de los metales pesados, generando un aumento en las partículas en suspensión[98].

Tabla 11. Características físico- químicas del canal de riego del día 4 de abril del 2016.

PARÁMETROS	
Temperatura	28,1°C
Conductividad	677 µS/cm
pH	7,75
Hg	0,7 mgL^{-1}
Cd	0,09 mgL^{-1}

Fuente: Esta investigación.

9.5 Reducción en la concentración de mercurio y cadmio en los tratamientos.

En primera instancia se evidencia en las figuras 25 y 26 que en el tratamiento testigo o blanco (sin vetiver), las concentraciones de Hg y Cd presentaron una disminución. Esta variación evidenciada entre el primer mes y el segundo, posiblemente se deba al ingreso de agua lluvia en el tratamiento testigo, por una ruptura del plástico que protegía la infraestructura de los tratamientos. Pero se confirma que la concentración de Hg y Cd no debían variar, al observar las

[98] Marqués, A., Senior, W., & Martínez, G. Concentraciones y comportamientos de metales pesados en una zona estuarina de Venezuela. Venezuela. Pág. 25, 6, 290. 2000

concentraciones del blanco previas y posteriores al incidente, donde estas no cambian.

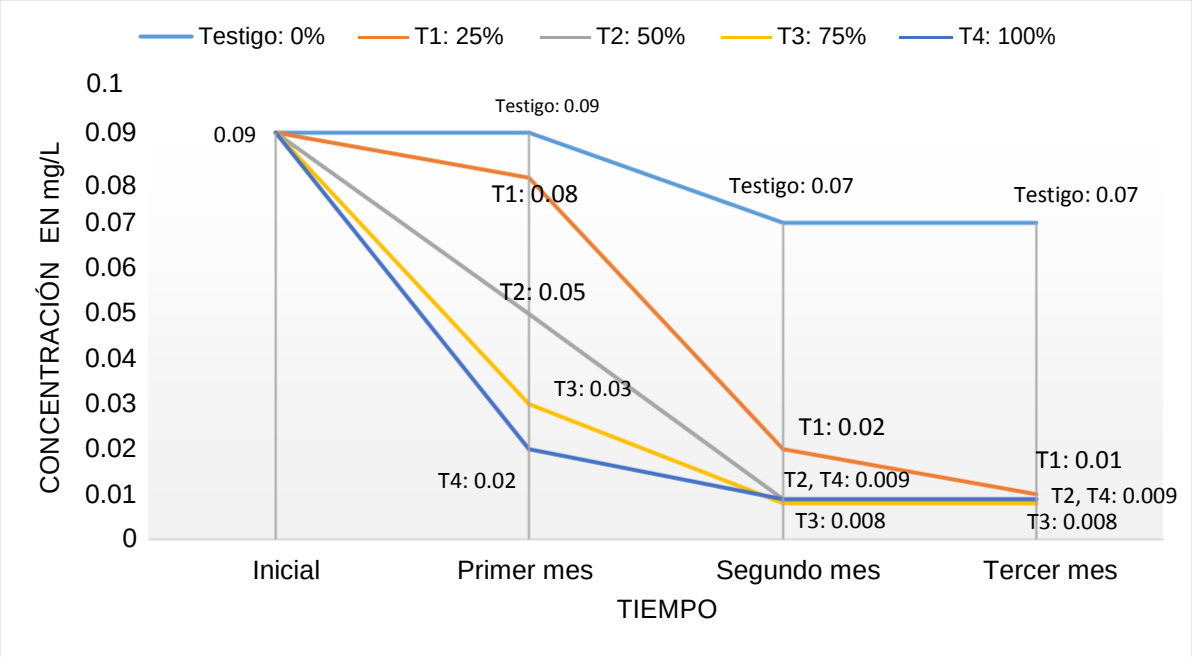

Figura 25. Variación en la concentración de Cadmio a diferentes densidades de siembra durante el experimento**. ; Fuente:** Esta investigación.

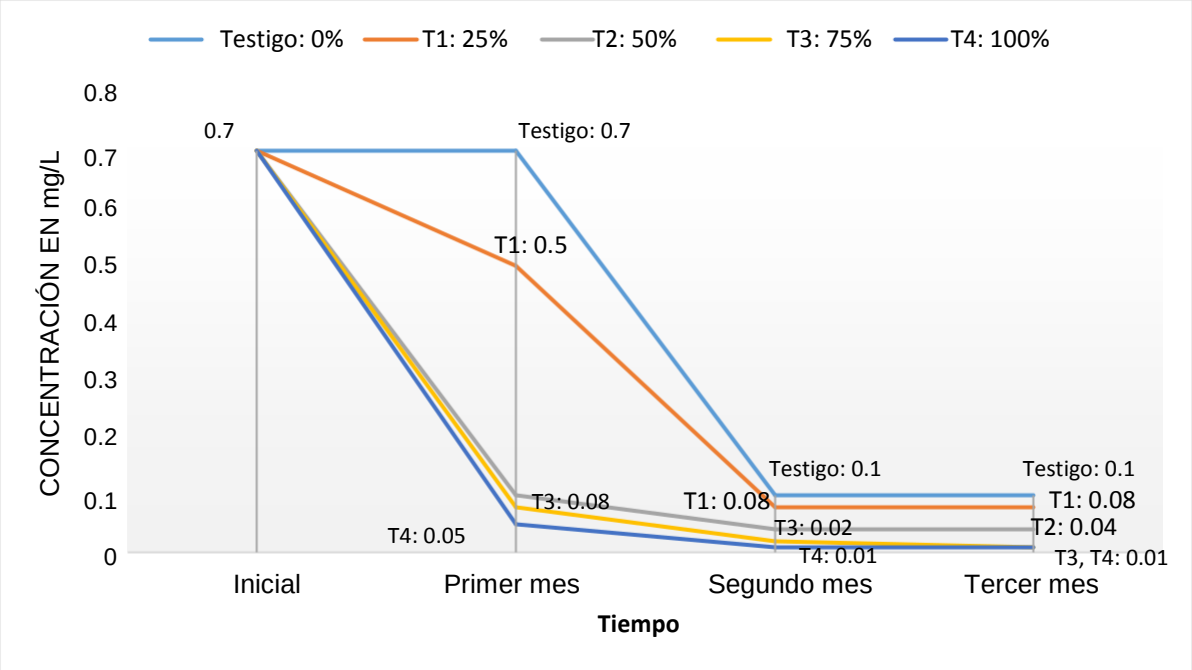

Figura 26. Variación en la concentración de Mercurio a diferentes densidades de siembra durante el experimento**. ; Fuente:** Esta investigación.

Al comparar las concentraciones final e inicial de los metales en cada tratamiento, se observa un comportamiento de disminución distinto al esperado (Tabla 12), ya que se suponía que a mayor densidad de siembra se daría una mayor reducción en la concentración de éstos metales. En el caso del mercurio, la tendencia esperada se observó con las densidades 25% y 50%, sin embargo las densidades 75% y 100% presentaron la misma reducción de 0,23 mg/mes (Figura 27). La reducción en la concentración de Cadmio presentó una relación directa con la densidad en los tratamientos 1,2 y 3 (25%,50% y 75%), siendo este último en el que se da la mayor reducción en mg/mes; en el tratamiento con densidad de 100%, la reducción obtenida es igual a la del tratamiento con 50% (Figura 28).

Tabla 12. Registro de reducción de las concentración de Mercurio y Cadmio en los tratamiento.

Fecha	Medición	Tratamiento	Resultado mg/L		% de Reducción de Hg	% de Reducción de Cd
			Hg	Cd		
04/04/2016	**Inicial**	-	0.7	0.09	**-**	**-**
04/05/2016	**Primer mes**	T1	0.5	0.08	28.6%	11.1%
		T2	0.1	0.05	85.7%	44.4%
		T3	0.08	0.03	88.6%	66.7%
		T4	0.05	0.02	92.9%	77.8%
		Blanco	**0.7**	**0.09**	**-**	**-**
07/06/2016	**Segundo mes**	T1	0.08	0.02	60.0%	66.7%
		T2	0.04	0.009	8.6%	45.6%
		T3	0.02	0.008	8.6%	24.4%
		T4	0.01	0.009	5.7%	12.2%
		Blanco	**0.1**	**0.07**	**85.7%**	**22.2%**
07/07/2016	**Tercer mes**	T1	0.08	0.01	0%	11.1%
		T2	0.04	0.009	0%	0%
		T3	0.01	0.008	1.4%	0%
		T4	0.01	0.009	0%	0%
		Blanco	**0.1**	**0.07**	**-**	**-**

Fuente: Esta investigación.

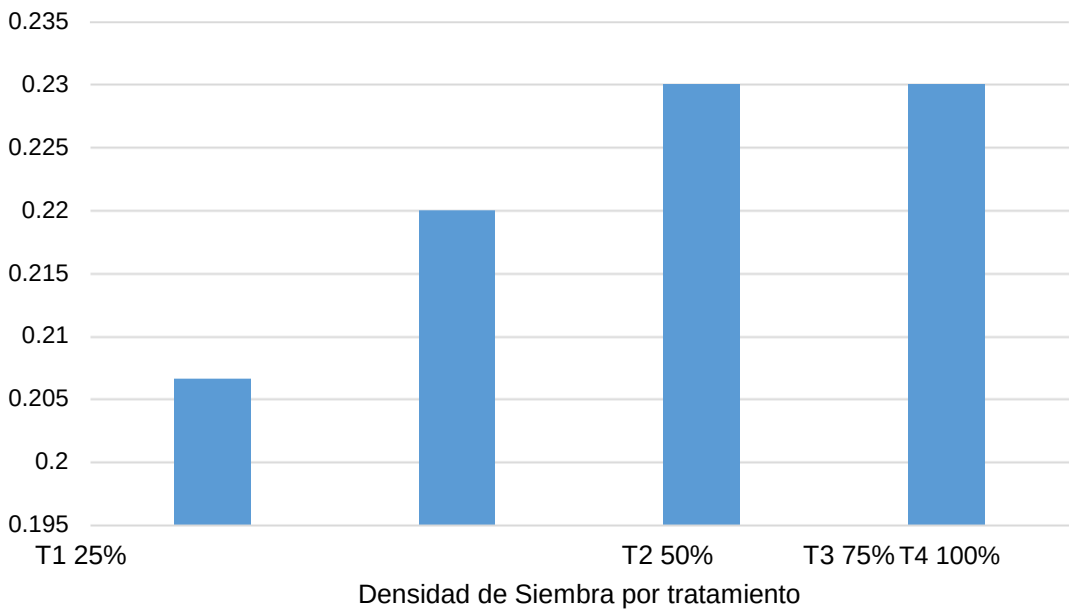

Figura.27. Reducción en la concentración de Mercurio (mg/mes) en los tratamientos experimentales**. ; Fuente:** Esta investigación.

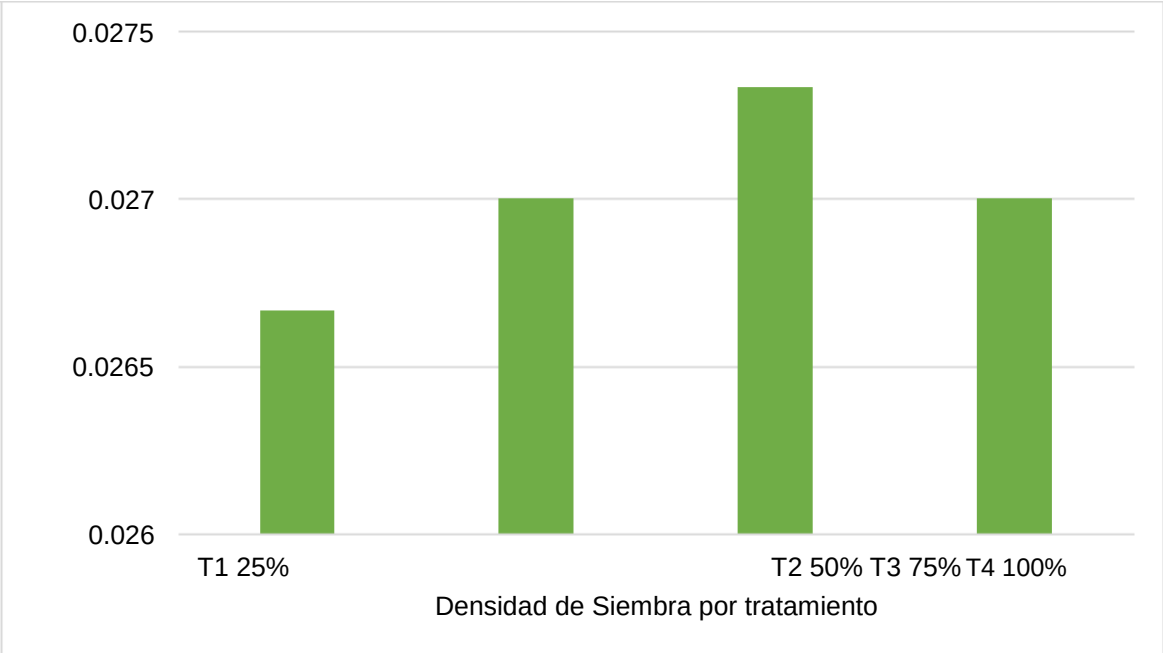

Figura 28. Reducción en la concentración de Cadmio (mg/mes) en los tratamientos experimentales**. ; Fuente:** Esta investigación.

Al analizar el porcentaje de reducción en la concentración de estos metales mes a mes, es posible observar con más detalle las diferencias entre los tratamientos (Tablas 12 y 13). Durante el primer mes, los tratamientos 2,3 y 4 registraron los mayores porcentajes de reducción en la concentración de Mercurio, comprendidos entre el 85 y el 93%, mientras el tratamiento 1 mostró un mayor porcentaje de reducción en el segundo mes (60%). En el tercer mes, los tratamientos 1,2 y 4 no presentaron reducción en la concentración del metal, mientras el tratamiento 3 presentó una reducción del 1,4%.

Para el caso del Cadmio también fue posible evidenciar diferencias en el porcentaje de reducción mes a mes (Tablas 12 y 13), En el primes mes, al igual que para el caso del Mercurio, se destacan los tratamientos 2,3 y 4, con un mayor énfasis en los tratamientos 3 y 4 que presentaron un porcentaje de disminución de 67% y 78%, relación que cambio en el segundo mes, donde el tratamiento 1 se mostró con mayor porcentaje de disminución de Cd (67%) en comparación con el tratamiento 4 que empezó a mostrar menos reducción (12%). Ya en el tercer mes los tratamientos 2,3 y 4 no presentaron disminución de cadmio, solo se evidencio en el tratamiento 1, con un porcentaje de 11,1%.

La reducción en la concentración promedio fue mayor en el primer mes para los dos metales; sin embargo la reducción en cada uno de los tratamientos presentó mayores diferencias respecto al promedio en el caso del Cadmio, según lo indica el coeficiente de variación calculado (58,8%). Posteriormente los siguientes dos meses presentaron menor tasa promedio de reducción y el coeficiente de variación muestra porcentajes muy elevados, esto se debe al ingreso de agua en los tratamientos que altero las concentraciones de los dos metales, diluyéndolos y alterando los tratamientos.

Tabla 13. Tasa de reducción de metales respecto al tiempo.

	Tiempo	Hg	Cd
		mg/L /mes	mg/L /mes
r e s	T1	0.2	0.01
	T2	0.6	0.04
	T3	0.62	0.06
	T4	0.65	0.07
Tasa de reducción promedio		**0.52**	**0.05**
Desviación Estándar		**0,212661703**	**0,026457513**
Coeficiente de Variación		**41,09404892**	**58,79447358**
pasto	T1	0.42	0.06
	T2	0.06	0.041
	T3	0.06	0.022
Tasa de reducción promedio		**0.15**	**0.03**
Desviación Estándar		**0,183575598**	**0,021579311**
Coeficiente de Variación		**126,6038603**	**64,41585397**
r e s	T1	0	0.01
	T2	0	0
	T3	0.01	0
	T4	0	0
Tasa de reducción promedio		**0.003**	**0.003**
Desviación Estándar		**0,005**	**0,005**
Coeficiente de Variación		**200**	**200**

Fuente: Esta investigación.

Los resultados obtenidos en el estudio de Rodríguez, Cumana, Torrealba y Posada[101] muestra una disminución en el mejor de los tratamientos (pasto vetiver + lodo contaminado) desde 21000 ppm de Cr a 13529 ppm de Cr en 15 días, mientras que en el presente estudio muestra que las tasas de disminución de las concentraciones de Hg y Cd que son mucho menores. Pero cabe resaltar que un metal como el Cr puede ser considerado un oligoelemento, que puede servir como nutriente en pequeñas concentraciones, y aunque en este caso era elevada la

[101] Torres Rodríguez, D., Cumana, A., Torrealba , O., & Posada, D. Uso de vetiver para la fitorremediación de cromo en los lodos residuales de una tenería. Revista mexicana de ciencias agropecuarias. Pág. 1, 179. 2010.

concentración, es diferente el efecto toxico de un metal pesado como el Hg o el Cd[102].

9.6 Densidad de siembra.

9.6.1 Variación de la concentración de Cd en los cuatro tratamientos durante los tres meses.

En la Figura 25 se muestra como la concentración de Cd fue disminuyendo durante los tres meses del experimento. El resultado del análisis ANCOVA para el Cd muestra que hay diferencias estadísticamente significativas (p<0,05) en la concentración de Cd entre las diferentes densidades de siembra, por lo cual se realizaron pruebas pareadas a posteriori usando el test LSD Fisher para un alfa de 0,05. Los resultados (Tabla 14) muestran que existen diferencias significativas en la concentración de Cadmio en el tratamiento 1 (densidad 25%) con respecto a los demás tratamientos, y tiene la concentración promedio más alta del metal (0.03). Las concentraciones de Cadmio difieren significativamente entre el mes 1 y los demás, presentando la mayor concentración promedio (0.05). En cuanto a las covariables, la reducción de Cadmio fue explicada por la conductividad (p<0.05) (Tabla 15).

Tabla 14. Test: LSD Fisher para Cd, respecto a la densidad.

Densidad	Medias	n	E.E			
100	0.01	3	0.01	A		
75	0.02	3	4.1E-03	A		
50	0.02	3	4.3E-03	A	B	
25	0.03	3	4.3E-03		B	
0	0.08	3	0.01			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)
Alfa=0.05 DMS=0.01434
Error: 0.0000 gl: 5

Fuente: INFOSTAT (versión libre).

[102] García, I., & Dorronsoro, C. Departamento edafológico y química agrícola. Obtenido de Contaminación por metales pesados. En tecnología de suelos. 2005.

Tabla 15. Test: LSD Fisher para Cd, respecto al mes.

Mes	Medias	n	E.E			
3	0.02	5	3.5E-03	A		
2	0.03	5	4.7E-03	A		
1	0.05	5	3.8E-03		B	

Alfa=0.05 DMS=0.01111
Error: 0.0000 gl: 5

Fuente: INFOSTAT (versión libre).

Para analizar de mejor manera el desempeño de los tratamientos, en necesario tener en cuenta la relación entre densidad de siembra y tiempo de exposición, debido a que todos los tratamientos llegaron a reducir la concentración de Cd hasta casi el mismo punto, por lo cual se estos resultados deben ser analizados en términos de eficacia. En este contexto el T2, T3 y T4 lograron disminuir la concentración hasta el máximo punto en solo dos meses, pero el T1 con menos cantidad de plantas logra el mismo resultado en 3 meses

9.6.2 Variación de la concentración de Hg en los cuatro tratamientos durante los tres meses.

En la figura 26 se muestra como la concentración de Hg fue disminuyendo durante los tres meses del experimento. El resultado del análisis ANCOVA para el Hg muestra que no hay diferencias estadísticamente significativas (p>0,05) en la concentración de Hg entre las diferentes densidades de siembra, ni entre los meses de muestreo. Sin embargo, dado que los valores de p fueron cercanos a 0,05, se realizaron pruebas pareadas *a posteriori* usando el test LSD Fisher para un alfa de 0,05. Los resultados (Tabla 17) muestran que existen diferencias significativas en la concentración de mercurio en el tratamiento 1 (densidad 25%) respecto a los demás tratamientos, y tiene la concentración promedio más alta del metal (0,20). Las concentraciones de mercurio difieren significativamente entre el mes 1 y los demás (Tabla 18), presentando la mayor concentración promedio

(0,34). Para el caso del Hg, las covariables no mostraron tener relación con el proceso de disminución de este metal.

Tabla 16. Test: LSD Fisher para Hg, respecto a la densidad.

Densidad	Medias	N	E.E			
100	-0.09	3	0.10	A		
75	0.01	3	0.09	A		
50	0.07	3	0.08	A		
25	0.20	3	0.09	A	B	
0	0.45	3	0.13		B	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)
Alfa=0.05 DMS=0.29631
Error: 0.0199 gl: 5
Fuente: INFOSTAT (versión libre).

Tabla 17. Test: LSD Fisher para Hg, respecto al mes.

Mes	Medias	n	E.E			
3	0.01	5	0.10	A		
2	0.03	5	0.07	A		
1	0.034	5	0.08		B	

Alfa=0.05 DMS=0.01111
Error: 0.0199 gl: 5
Fuente: INFOSTAT (versión libre).

Hablando en términos de densidad, la eficiencia del T2, T3 y T4 es similar, en comparación de T1, donde se logró una menor disminución del metal. Pero se destaca el T2 debido a que posee una densidad de siembra del 50% y logro una eficiencia similar al T3= 75% y T4= 100%. Sin embargo el T4 es quien logra mayor disminución de la concentración de Hg y los resultados arrojados en el segundo y tercer mes, muestran una igualdad en la concentración encontrada en este tratamiento (0,01 mg/L), dando indicios para suponer un posible límite de detección.

9.7 Relación entre reducción en la concentración de los metales y las covariables.

9.7.1 Mediciones Conductividad

En la figura 29, se presenta la variación de la conductividad que se obtuvo durante los tres meses de la investigación. Los tratamientos T1, T2, T3, y T4, presenta una similitud en el segundo mes con un rango de 633 µS/cm a 553 µS/cm. Generalmente la conductividad se define como la medida de la facilidad con que la corriente eléctrica pasa a través del agua[105], y está estrechamente relacionada con la presencia de sales disueltas que se componen de iones metálicos y compuestos no metálicos. Al primer mes de muestreo, la conductividad se comporta conforme a lo esperado en los tratamientos T2, T3 y T4, (a medida que disminuye la concentración de metales, disminuye la conductividad), sin embargo el T1 presenta un comportamiento distinto en la conductividad, mostrando un aumento significativo. Esta eventualidad se le atribuye a la aparición de algas en el T1 en sus tres repeticiones, que probablemente se deba a que este tratamiento poseía la menor densidad de plántulas de vetiver, por lo cual fueron propicias las condiciones de luminosidad en el agua y disponibilidad de alimento. La presencia de algas aumentaron la cantidad de materia orgánica presente en los T1, la cual según Simón, M.; Peralta, N. & Costa, L., posee componentes que aumentan la conductividad[106]. Después del primer mes, el alga fue desapareciendo hasta su inexistencia.

La conductividad durante los tres meses se encuentra en un rango de 360 µS/cm a 933 µS/cm, este resultado prueba que el pasto vetiver es capaz de tolera estas altas concentración de conductividad eléctrica, como lo afirma Troung, P.[107].

[105] Universidad de Salamanca. Aguas Residuales. Curso a distancia de potabilizadoras. S.f

[106] Simón, M.; Peralta, N. & Costa, L.. Relaciones entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. Asociacion Argentina Ciencia del Suelo (AACS).2013.

[107] Troung, P. Obtenido de La tecnología del pasto vetiver para la protección ambiental. (S.f).

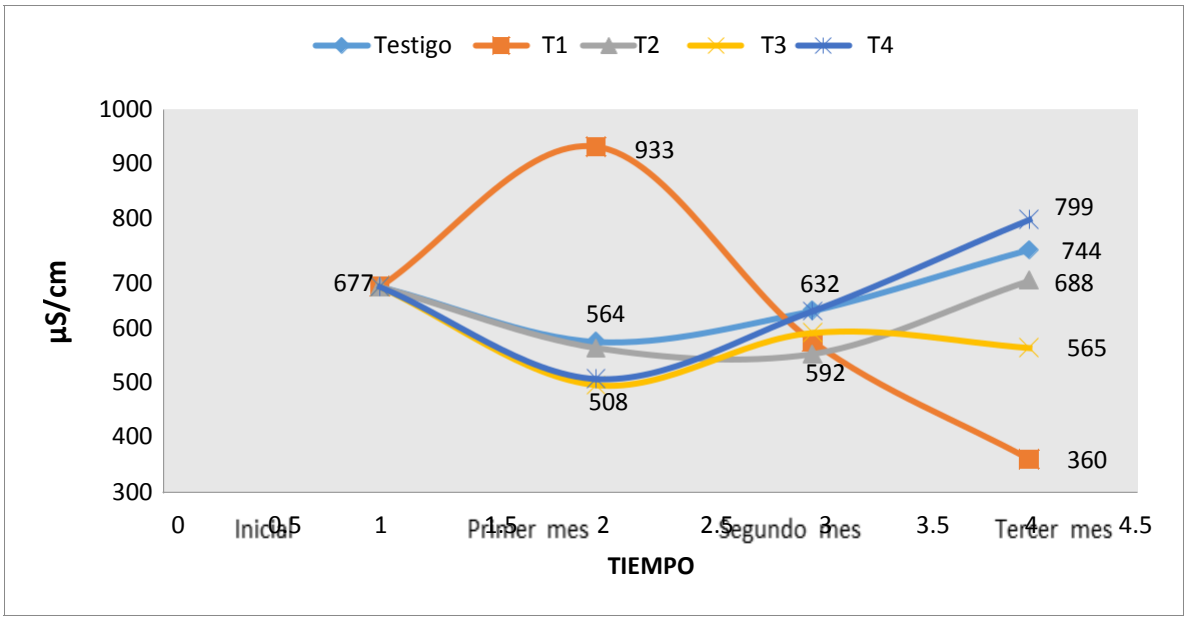

Figura 29. Registro de la conductividad durante los tres meses de la investigación. ; **Fuente:** Esta investigación.

9.7.2 Mediciones de Temperatura

En la figura 30 se registraron los datos de temperatura en el agua de las muestras que fueron enviaban al laboratorio, para el análisis de los metales. Esta medición se incluyó en esta investigación debido a que la temperatura determina la disponibilidad de iones metálicos, según lo afirma Hooda[108]. También es una variable sumamente importante en procesos biológicos ya que ésta influye en la velocidad del metabolismo.

Según Rodríguez, I. (2005)[109] la temperatura no influye de forma significativamente en la capacidad de absorción, dato que se evidencia en esta investigación mediante el análisis de covarianza, ya que en este, la covariable Temperatura no explica la disminución de los metales (p=0.4224). Sin embargo en

[108] Hooda, P. A. Efects of time and temperature on the bioavailability of Cd and Pb from sludge- amended soils. Journal of Soils Science, Pag. 97.1993.

[109] Rodríguez, I. Obtenido en Adsorption of mercury(II) from aqueous solution on natural and oxidized corncob. Separation and Purification Technology. 2015.

la figura 30 se muestra un comportamiento dinámico, lo cual puede ser explicado por las variaciones de la temperatura ambiental de la zona[110].

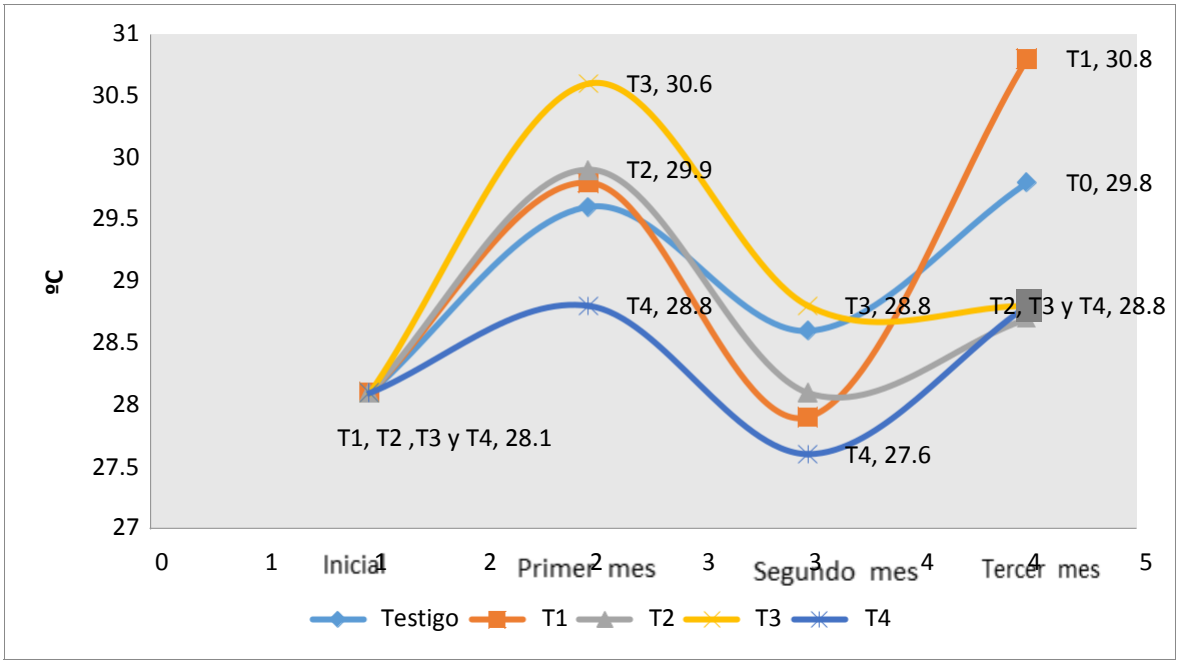

Figura 30. Comportamiento de la temperatura en los tres meses de la investigación. ; **Fuente:** Esta investigación.

9.73. Mediciones de pH

En la presente investigación se registró un pH inicial de 7.97, valor que en términos de pH tiende a ser básico. Según Higueras et al.[111] los valores de pH más elevados están relacionados con mayores concentraciones de metales. No obstante en los resultados obtenidos del ANCOVA, la covariable pH no mostro ser significativa en la disminución de Hg y Cd (p= 0.1965).

A pesar de no explicar el fenómeno, en la figura 31 se muestra que durante el proceso en los tres meses, si se evidencio una disminución del pH en el T1, T2, T3 y T4. Conforme los resultados del ANCOVA en cuanto al pH, se puede asumir la

[110] Meteoblue. Archivo meteoriologico de Tocaima. Fuente. 2016.

[111] Higueras et al Consultado en López Tejedor. M. Informes Técnicos Ciemat. Obtenido de Estudio de la Absorción y Distribución del Mercurio en Nerium Oleander L. en la Ribera del Río Valdeazogues (Estación de Chillón - Almadén). 1995.

disminución por efecto de los ácidos orgánicos exudados constantemente por las raíces de las plantas[112].

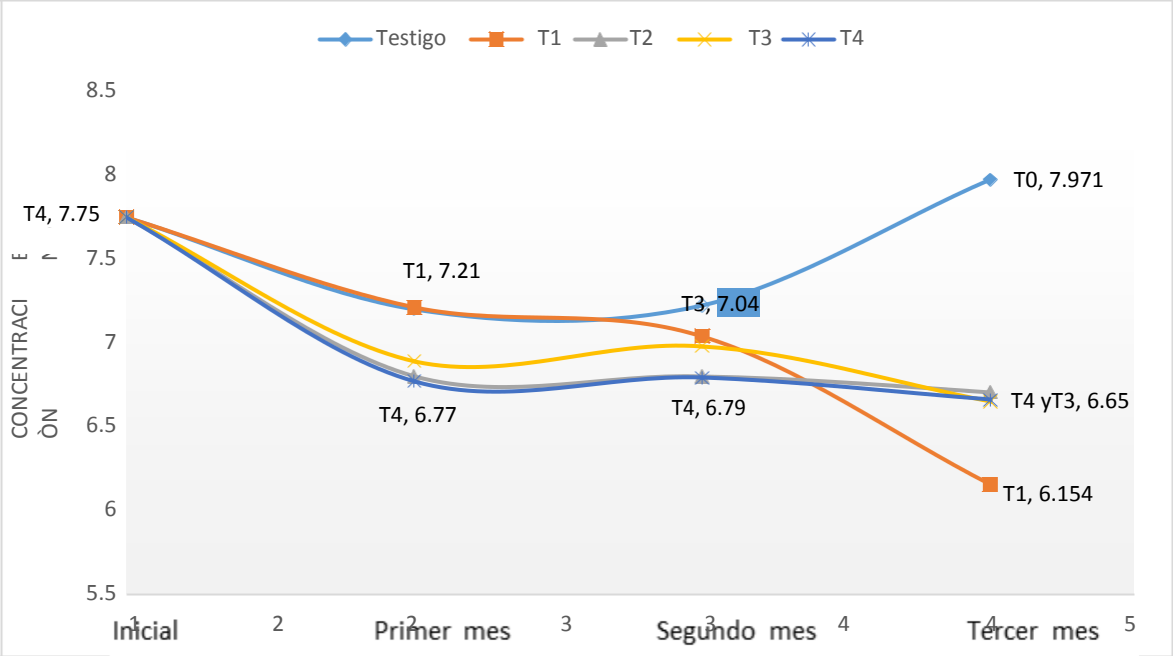

Figura 31. Comportamiento del pH durante los tres meses de la investigación. ; **Fuente:** Esta investigación.

[112] Krishnamurti, G., Ceslinski, G., Huang, P. M., & Van Rees, K. kinetics of cadmium release from soils as ifluenced by organic acids: implication in cadmium availability. Journal of Enviromental Quality. Pag. 271-277. 1997.

10 Conclusiones

El pasto vetiver demostró tener buen desarrollo vegetativo, con hojas rígidas y coloración verde oscura, en el proceso hidropónico con el agua colectada del canal de riego proveniente de la cuenca baja del rio Bogotá. Presentado solamente en las primeras semanas respuestas de toxicidad, que se evidenciaron con tonalidad rojiza en sus hojas, mostrando la posible absorción de mercurio, cadmio y otros metales que estarían presentes en el agua.

Los resultados obtenidos de la tasa probable de disminución en el primer mes, demuestran que posiblemente el pasto vetiver realizo una disminución en la concentración de Mercurio de 0.7 mg/L a 0.52 mg/L; y una disminución en la concentración de Cadmio de 0.09 mg/L a 0.05 mg/L, siendo estos los datos promedio de los cuatro tratamientos. No obstante, no fue posible establecer una tasa de disminución específica para los dos meses siguientes por causa de una ruptura en el plástico que protegía los tratamientos del agua lluvia.

Respecto a las densidades de siembra se establece que el tratamiento que consiguió mayor disminución de las concentraciones de mercurio y cadmio, en los dos primeros meses, fue el T4, que al tener mayor cantidad de plántulas pudo haber absorbido más mercurio y cadmio. Pero al mes tercero los tratamientos disminuyeron su posible capacidad de absorción asemejándose su comportamiento a una estabilización. Esto se debe al ingreso de agua lluvia en el segundo mes, que diluyó la concentración de los metales presentes en los tratamientos, hasta el punto no sufrir disminuciones considerables en las concentraciones de los metales, desde el segundo mes hasta el tercero.

La conductividad, presenta una relación con la absorción de cadmio, debido a que el cadmio es un elemento de naturaleza química muy similar al zinc, el cual es un micronutriente para las plantas, esencial para la transformación de los hidratos de carbono, por este motivo la planta tiende a confundir el cadmio con el zinc, absorbiendo de una manera mas fácil las sales de cadmio debido a que es

transportado al interior de la planta por diferentes proteínas transportadoras de cationes como: Ca^{+2}, Zn^{+2}, Fe^{+2}, Mg^{+2}, Mn^{+2}, Pb^{+2}, Cu^{+2} y Ni^{+2}. El cadmio presenta semejanzas con muchos elementos esenciales para as plantas[128].

Las plantas de vetiver fueron donadas al semillero de investigación de la universidad de Cundinamarca, seccional Fusagasugá: grupo de investigación Agricultura Orgánica y Salud del Suelo (AOSS), a cargo del docente Juan Carlos Tapias Duarte, que utilizara esta biomasa para investigar la distribución de los metales en esta especie.

[128] Coon S, Gilliham M; Compartive physiology of elemental distribution in plants. Annals of Botany 105: 1081-1102.

2010. Citado en: Sagardoy Calderón, R. Estudio de la homeostasis de Zn y Cd en plantas superiores. 2011.

11 Recomendaciones

Este trabajo investigativo buscó determinar la eficiencia del pasto vetiver para la remoción de Hg y Cd en agua, pero por motivos de limites económicos no fue posible realizar los análisis bromatológicos en el área foliar y radicular en los tratamientos, donde se demostraría que la disminución en la concentración de Hg y Cd, que se evidencio en este proyecto investigativo, fue causada por acción del pasto.

Por este motivo se recomienda a futuros investigadores que retomen este tema o que requieran la información de esta investigación; que se debe realizar el análisis de metales en la biomasa, para poder asegurar con certeza que la concentración disminuida o parte de ella, se encuentra en la biomasa del pasto vetiver y así, obtener resultados que se puedan denominar como fitorremediación.

Aunque si se hace hasta este punto, se obtendrá un resultado de la fitorremediación que ocurriría específicamente para el caso de la muestra de agua usada en el proceso, sin tener en cuenta todas las condiciones no controladas que pueden interferir, disminuyendo u optimizando la capacidad del pasto vetiver para realizar la fitorremediación.

Es por esto que para determinar la tasa de absorción del vetiver, se hará necesario realizar este proceso en fase de laboratorio, con agua esterilizada y desionizada, en la cual mediante diluciones de las respectivas sales metálicas, se obtendrán concentraciones de los metales conocidas y partiendo de esto, se podrá obtener la tasa de absorción real: la capacidad del pasto vetiver para la absorción de estos metales en condiciones ideales.

En el caso de que se quiera investigar este tema más afondo, es recomendable que se analice de mejor manera la relación que existe entre la absorción del Cadmio con la conductividad, debido a que en la presente investigación, a la hora de evaluar la influencia de cada una de las covariables en el proceso de absorción de los metales, solo fue significativa para el caso de la conductividad en la

absorción del cadmio. Posiblemente si se somete el proceso a diferentes valores de conductividad, y se analice la variación en la concentración del Cadmio, se pueda hallar un intervalo óptimo para la absorción de este metal.

Al finalizar este proceso con el pasto vetiver, la planta deberá quedar con una concentración de metales en su biomasa, problema que ha acarreado la fitorremediación hasta el día de hoy. Se recomienda realizar estudios de viabilidad del aprovechamiento y/o disposición final adecuada para estos residuos con metales pesados, que indaguen en el uso de estos para artesanías o mezclas con cemento para construcciones.

Es bueno aclarar que con los resultados obtenidos, aun no es posible determinar la eficiencia de un sistema con pasto vetiver para tratar un vertimiento puntual, con puesto que harían falta estudios para calcular a precisión el comportamiento del vetiver en la absorción de metales a caudales determinados, y el efecto que puede acarrear un gran volumen de biomasa en el proceso de fitorremediación, mediante factores como la competencia y desarrollo en general, puesto que los procesos biológicos no son predecibles al ser llevados a escalas de gran diferencia.

12 Anexos

INFORME N°12-MI16 (15011) 2016-04-20

Corpoica	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	Código: VC_F_116
		Versión: 2
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras	Fecha de vigencia: (01-02-2016)

1. Información del cliente

Nombre y Apellido: JUAN PABLO CORRECHA BRIÑEZ
Cédula o NIT
Dirección:
Dpto: CUNDINAMARCA
Municipio: TOCAIMA
Tel. fijo/Celular:
Análisis solicitado: MERCURIO Y CADMIO

TODOS POR UN NUEVO PAÍS

2. Información de la muestra

Número de solicitud 12

Matriz: AGUA
Presentación LIQUIDO
Finca: NO INDICA
Fecha de muestreo: 2016-04-04
Fecha de recepción: 2016-04-04
Fecha(s) de análisis: 2016-04-05
Fecha de reporte: 2016-04-19

Codigo de laboratorio		DEERMINACIÓN ANALÍTICA	
		MERCURIO (Hg) Mg/l	CADMIO (Cd) Mg/l
	UNIDADES MÉTODOS IDENTIFICACIÓN	AOAC 2003.01	
AMI6-15011	MERCURIO	0.7	
	CADMIO		0.09

Observaciones:

Los resultados son validos unicamente para la muestra en referencia
Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de CORPOICA

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA
KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA)
TELÉFONOS: 4227300 EXT: 1414
E-MAIL: ypaeZo@corpoica.org.co

FIN DEL INFORME

Anexo 1. Análisis de laboratorio Inicial. ; **Fuente:** Laboratorio CORPOICA, 2016

INFORME N° 6-MI16 (15011)

Corpoica	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	Código: VC_F_116
		Versión: 2
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras	Fecha de vigencia: (01-02-2016)

LABORATORIO DE MICROBIOLOGIA

1. Información del cliente

Nombre y Apellido: DANIEL CUBILLOS
Cédula o NIT 11366512
Dirección:
Dpto: CUNDINAMARCA
Municipio: TOCAIMA
Tel. fijo/Celular: 3214295583
Análisis solicitado: METALES PESADOS

MINCIR CULTURA — TODOS POR UN NUEVO PAÍS

Número de solicitud
25

2. Información de la muestra

Matriz: AGUA
Presentación LIQUIDO
Finca: NO INDICA
Fecha de muestreo:
Fecha de recepción:
Fecha(s) de análisis:
Fecha de reporte:

Lider Unidad de Laboratorio

Codigo de laboratorio		DEERMINACIÓN ANALÍTICA	
	UNIDADES	mg/l Hg Cd	mg/l Hg Cd
	MÉTODOS IDENTIFICACIÓN	AOAC 2003.01	AOAC
AM16-15011	TRATAMIENTO	RESULTADO	
	T1	Hg 0.5	Cd 0.08
	T2	Hg 0.1	Cd 0.05
	T3	Hg 0.08	Cd 0.03
	T4	Hg 0.05	Cd 0.02

Observaciones:

Los resultados son validos unicamente para la muestra en referencia
Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorizacion formal de CORPOICA

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA
KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA)
TELÉFONOS: 4227300 EXT: 1414
E-MAIL: ypaeZc@corpoica.org.co

FIN DEL INFORME

Anexo 2. Análisis de laboratorio primer mes. ; **Fuente:** CORPOICA**, 2016**

INFORME N° 22-A16 (15127) Daniel Cubillos 2016-06-30

Corpoica	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	Código: VC_F_116
		Versión: 2
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras	Fecha de vigencia: (01-02-2016)

LABORATORIO DE QUÍMICA DE SUELOS , AGUAS Y PLANTAS

TODOS POR UN NUEVO PAÍS

1. Información del cliente

Nombre y Apellido: DANIEL CUBILLOS
Cédula o NIT 11366512
Dirección: CALLE 7 # 2-05 INT 6 CASA 3
Dpto: CUNDINAMARCA
Municipio: TOCAIMA
Tel. fijo/Celular: 8207359
Tipo de análisis: METALES PESADOS

Número de solicitud
22

2. Información de la muestra

Finca:
Matriz: AGUA
Tipo de agua: NO INDICA
Tipo de riego:

Fecha de recepción: 2016-06-07
Fecha de reporte: 2016-06-30

Jamer Ricardo Jiménez. (7882)
Lider Unidad de Laboratorio de suelos

CODIGO LABORATORIO	DETERMINACIÓN ANALÍTICA		
	UNIDADES	Hg Cd	
	METODOS	SM3120 B Modificado	
	IDENTIFICACION	VALORES	
TRATAMIENTO	RESULTADO		
	Hg	Cd	
T1	0.08	0.02	
T2	0.04	0.009	
T3	0.02	0.008	
T4	0,01	0.009	

OBSERVACIONES:

Los resultados son validos unicamente para la muestras en referencia
Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorizacion formal de CORPOICA

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA
KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA)
TELÉFONOS: 4227300, extensión 1414
E-MAIL: ypaezo@corpoica.org.co

FIN DEL INFORME

Anexo 3. Análisis de laboratorio segundo mes. **; Fuente**: CORPOICA, 2016

INFORME N° 22-A16 (15127) Daniel Cubillos 2016-06-30

Corpoica	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	Código: VC_F_116
		Versión: 2
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras	Fecha de vigencia: (01-02-2016)

LABORATORIO DE QUÍMICA DE SUELOS , AGUAS Y PLANTAS

1. Información del cliente

Nombre y Apellido: DANIEL CUBILLOS
Cédula o NIT 11366512
Dirección:
Dpto: CUNDINAMARCA
Municipio:
Tel. fijo/Celular: 8207359
Tipo de análisis: METALES PESADOS Hg Cd

TODOS POR UN NUEVO PAÍS

Número de solicitud
74

2. Información de la muestra

Finca:
Matriz: AGUA
Tipo de agua: NO INDICA
Tipo de riego: GOTEO

Fecha de recepción:
Fecha de reporte:

Jamer Ricardo Jiménez. (7882)
Lider Unidad de Laboratorio de suelos

CODIGO LABORATORIO	DETERMINACIÓN ANALÍTICA		
	UNIDADES	Mercurio	cadmio
	METODOS	SM3120 B Modificado	
IDENTIFICACION		VALORES	

TRATAMIENTO	Hg	Cd
T1	0.08	0.01
T2	0.04	0.009
T3	0.01	0.008
T4	0.01	0.009

OBSERVACIONES:

Los resultados son validos unicamente para la muestras en referencia
Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorizacion formal de CORPOICA

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA
KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA)
TELÉFONOS: 4227300, extensión 1414
E-MAIL: ypaezo@corpoica.org.co

FIN DEL INFORME

Anexo 4. Análisis de laboratorio tercer mes. ; **Fuente:** CORPOICA, 2016

Anexo 5. Registro de mediciones de covariables.

Tabla 18. Mediciones de covariables.

Registro de mediciones de covariables.						
Covariable	**Tiempo**	**Testigo**	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**
Temperatura	04/05/2016	29.6	29.8	29.9	30.6	28.8
	07/06/2016	28.6	27.9	28.1	28.8	27.6
	07/07/2016	29.8	30.8	28.7	28.8	28.8
pH	04/05/2016	7.2	7.21	6.8	6.89	6.77
	07/06/2016	7.22	7.04	6.8	6.98	6.79
	07/07/2016	7.971	6.154	6.705	6.65	6.66
Conductividad	04/05/2016	576	933	564	496	508
	07/06/2016	633	576	553	592	632
	07/07/2016	744	360	688	565	799

Fuente: Autores, 2016

13 Bibliografía

Atencio Garcia, V., Prado Carrasco, S., Barrera Cruz, A., & Martines Tirado, E. (2006). Efecto de la densidad de siembra en el alevinaje de la dorada (Brycon sinuensis Dahl,1955). *Revista Colombiana de ciencias pecuarias, 19*(2), 197.

Angélica Evelin Delgadillo-López, C. A.-R.-G.-G.-S. (2011). CONTAMINACIÓN, FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN. México: Tropical and Subtropical Agroecosystems. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf

Arce Sandra, A. J. (2013). (Universidad Simón Bolívar) Obtenido de Uso de Chrysopogon zizanioides para la fitorremediación de suelos contaminados por As y Hg: http://www.vetiver.org/LAICV2F/2%20Environmental%20Protection/E4Sandra_TS.pdf

Arroyave, M. I. (Diciembre de 2006). EFECTOS DEL MERCURIO SOBRE ALGUNAS PLANTAS ACUÁTICAS TROPICALES. *EIA*(1794-1237), 63.

Broky, M. L. (s.f.). *ESCUELA NORMAL "Juan P. Pringles"*. Obtenido de LABORATORIO: PH: http://server-enjpp.unsl.edu.ar/escuela/images/laboratorio_de_ph.pdf

ligoo. (s.f.). *Toxiambiental*. Obtenido de Glosario: http://toxiambiental.bligoo.com.co/glosario#.WAZSnWX0jIU

Calderón, J. A., Ramos, O. M., & Barrios, y. E. (1997). *Contaminación del agua, los pastos, la leche y las carnes bovinas por arsenico, mercurio, plomo y cadmio en la planicie aluvial baja del rio Bogotá. .* Girardot, Cundinamarcaa: Produmedios Corveica.

Castro, F. S. (2016). *Multi Tech Solutions*. Obtenido de Mapa del Río Bogotá: http://mts-fsc.com/index.php/enlaces/diagnostico-del-rio-bogota/37-mapa-del-rio-bogota

Chulim, Á. C., Escobar, H. M., Bernal, E. I., & Crespo, E. C. (2014). Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. *Científica Redalyc "Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal"*, 83.

Cristina Lomonte, y. W. (2014). *Revista Internacional de fitorremediación* . Obtenido de El estudio de la distribución espacial de Mercurio en las raíces de vetiver (zizanioides Chrysopogon) por micro-PIXE Espectrometría: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15226514.2013.821453

Danh, P. T. (2015). *EL SISTEMA VETIVER PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA*. Obtenido de SEGUNDA EDICIÓN: PREVENCIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS Y SUELOS CONTAMINADOS: http://www.vetiver.org/Water%20quality%20Spanish%20web%202.pdf

Danh, P. T. (2015). *EL SISTEMA VETIVER PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA*. Obtenido de PREVENCIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS Y SUELOS CONTAMINADOS: http://www.vetiver.org/Water%20quality%20Spanish%20web%202.pdf

Dinero, R. (2014). *Rio bogotá le pasa factura al gobierno*. Obtenido de Fundación al verde vivo: http://alverdevivo.org/SitioAntiguo/Documentos/EL%20PROBLEMA%20DEL%20RIO%20BOGOTA.pdf

Duilio Torres Rodríguez, A. C. (2010). *SCIELO "Revista mexicana de ciencias agrícolas"*. Obtenido de Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000200005

Eskakeados", P. E. (2016). Obtenido de METEOROLOGÍA - TIPOS DE ISOLÍNEAS Y FUNCIÓN QUE DESARROLLAN CADA UNA: http://www.loseskakeados.com/joomla1cinco/index.php?option=com_content&view=article&id=7868:meteorologa-tipos-de-isolneas-y-funcin-que-desarrollan-cada-una-&catid=347:meteorologa&Itemid=298

El Ministerio de Educación, C. y. (s.f.). *La nutrición de las plantas*. Obtenido de Absorción de agua y sales por la raíz: http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/2esobiologia/2quincena7/2quincena6_contenidos_3a.htm

Flores, S. E. (s.f.). *APÉNDICE A*. Obtenido de PRUEBA DE NORMALIDAD DE SHAPIRO-WILK: http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/segninis/Docencia/ANEXO_A_Sahapiro-Wilks.pdf

Garcia, I., & Dorronsoro, C. (2005). *Departamento edafologico y quimica agricola*. Obtenido de Contaminación por metales pesados. En tecnologia de suelos: http://edafologia.ugr.es/index.htm

Glosarios de términos especializados. (2011). *Términos estadísticos*. Obtenido de Covariables: http://glosarios.servidor-alicante.com/terminos-estadistica/covariables

Gimenez, J. B. (2015). CULTIVO EN HIDROPONÍA. En *Introducción al cultivo hidropónico* (pág. 10). Universidad Nacional de La Plata. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1

Gómez, A. M. (Febrero de 2005). *http://www.bdigital.unal.edu.co.* Obtenido de http://www.bdigital.unal.edu.co/1125/1/angelicamariajimenezgomez.2005.pdf

Hooda, P. A. (1993). Efects of time and temperature on the bioavailability of Cd and Pb from sludge- amended soils. *Journal of Soils Science*, 97.

Hernández, L. J. (14 de Febrero de 2014). Agencia de Noticias de la Universidad Nacional. *Nueve de cada 10 bogotanos tienen mercurio y plomo en su organismo.* . Bogotá, Colombia: El Espectador.

Hypergéo. (2014). Obtenido de Homogeneidad: http://www.hypergeo.eu/spip.php?article135

Infojardin. (2002-2016). *Absorción de nutrientes*. Obtenido de http://www.infojardin.net/glosario/abonos-binarios/absorcion-de-nutrientes.htm

J. Pérez Carballo, E. V. (2013). En *Introducción a la gestión financiera de la empresa* (pág. 164). Madrid: Graficas DO-MO. Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=O6n8huDgvi4C&pg=PA164&lpg=PA164&dq=que+significa+disminuir&source=bl&ots=bFqZPXcI2v&sig=5vsQ_QwjsAO4eKlgX2wDXDceYIQ&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=que%20significa%20disminuir&f=false

Krishnamurti, G., Ceslinski, G., Huang, P. M., & Van Rees, K. (1997). kinetics of cadmium release from soils as ifluenced by organic acids: implication in cadmium availability. *Journal of Enviromental Quality*, 271-277.

Marques , A., Senior, W., & Martinez, G. (Septiembre de 2000). *Concentraciones y comportamientos de metales pesados en una zona estuarina de venezuela, 25, 6*, 290. (Interciencia, Ed.) Venezuela.

Mayagüez, U. d. (s.f.). *Manual parte 2*. Obtenido de PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: TEMPERATURA: http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-temperatura.pdf

Mayagüez, U. d. (s.f.). *Manual parte 2*. Obtenido de PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: SALINIDAD : http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-salinidad.pdf

Mendez Cardenas, L. I. (2014). *ALTERNATIVAS DE ABASTECIMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO CALANDAIMA EN CUNDINAMARCA-COLOMBIA.* Bogotá, DC, Colombia.

Minitab 17. (2016). Obtenido de Método de la diferencia significativa mínima de Fisher (LSD) : http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/multiple-comparisons/what-is-fisher-s-lsd-method/

Mónica Scavo, O. R. (s.f.). *ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COMPLEMENTARIO, CON PASTO VETIVER (VETIVERIA ZIZANIOIDES L.), PROVENIENTES DE UNA PLANTADE PRODUCCIÓN DE GASEOSAS, EN VILLA DE CURA, ESTADO ARAGUA"*. Obtenido de Universidad Central de Venezuela.: http://www.vetiver.com/ICV4pdfs/BA17es.pdf

Navarra, G. d. (02 de Marzo de 2012). *Meteorología y climatología de Navarra.* Obtenido de Evaporímetro: http://meteo.navarra.es/definiciones/evaporimetro.cfm

Noguera, N. G. (2005). *Biotecnología ambiental y Biotecnología vegetal*. Obtenido de BIOTECNOLOGÍA: http://www.portaley.com/biotecnologia/bio3.shtml

Preciado, A. (31 de Julio de 2012). *Fundación al verde Vivo*. Obtenido de http://alverdevivo.org/SitioAntiguo/Documentos/EL%20PROBLEMA%20DEL%20RIO%20BOGOTA.pdf

Quiñones, R. T. (2011). *Universidad Nacional*. Obtenido de Prueba de normalidad: https://es.scribd.com/doc/94621641/Prueba-de-Normalidad-Estadistica

Rafael Esteban Ortega-Ortega, J. D.-H.-N. (23 de Mayo de 2011). *Revista Colombiana de Biotecnología*. Obtenido de Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (Gynerium sagittatum) (Aubl) Beauv. in vitro: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/22923/38225

Ramos, E. (11 de 08 de 2014). *El espectador* . Obtenido de ¿CUÁLES SON LOS MUNICIPIOS QUÉ CONTAMINAN EL RÍO BOGOTÁ?: http://blogs.elespectador.com/el-rio/2014/08/11/cuales-son-los-municipios-que-contaminan-el-rio-bogota/

red, T. d. (s.f.). *Estudio de la contaminación por metales pesados de la cuenca Llobregat* . Obtenido de Metales pesados y componentes mayoritarios en aguas: http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6978/04ComponentesAguas01.pdf;jsessionid=C0FB0FC1689A17A176D180F26366CB26?sequence=4

Regine Brandt, R. S.-K. (s.f.). *University of Münster, Institute of Landscape Ecology, Germany*. Obtenido de Potential of Vetiver (Vetiveria zizanioides (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela: http://www.vetiver.com/ICV4pdfs/BA22.pdf

Ruiz, C., Luque, O., Rodriguez, O., & Alarcon, N. (S.f). *Desarrollo de un sistema de tratamiento para la remosion de Fluor del agua mediante el uso de Vetiveria zizanioides en Guarataro, Yaracui, Venezuela.* Venezuela.

Sagan, L. M. (s.f.). *El proceso de nutrción de las plantas*. Obtenido de http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448180895.pdf

Sanchez, S., & Murillo, O. (13 de 07 de 2004). *Desarrollo de un método para controlar la calidad de producción de plántulas en viveros forestales: estudio de caso con ciprés*. Obtenido de www.mag.go.cr/rev_agr/v28n02_095.pdf

SCORP. (2006). Obtenido de Análisis de Covarianza : http://www.uru.edu/fondoeditorial/libros/pdf/manualdestatistix/cap6.pdf

Serrano, L. B. (2010). *Ambiente ecologico.* Obtenido de Contaminación por Mercurio y sus consecuencias e impactos en la ecología y Población Rural: http://www.ambiente-ecologico.com/ediciones/2002/085_09.2002/085_Investigacion_LuisBarretoSerrano.php3

Troung, P. (S.f). Obtenido de La tecnolgia del pasto vetiver para la proteccion ambiental: http://www.vetiver.org/LAVN_Prot%20Amb.htm

Universidad de Tarapacá. (2012). *ANÁLISIS ESTADÍSTICO UNIVARIADO, BIVARIADO Y VARIABLES CONTROL*. Obtenido de http://chitita.uta.cl/cursos/2012-1/0000104/recursos/r-25.pdf