IMPLEMENTACIÓN DE FITORREMEDIADOR CON ESPECIES MACRÓFITAS (*SCIRPUS HOLOSCHOENUS* Y *CYPERUS PAPYRUS)* EN AGUAS CONTAMINADAS CON MERCURIO Y CIANURO, PROVENIENTES DE ACTIVIDADES MINERAS EN LA VEREDA LA PAILA, MUNICIPIO DE BUENOS AIRES (CAUCA)

KAREN TATIANA SANCHEZ HIDROBO

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
POPAYÁN
2020

IMPLEMENTACIÓN DE FITORREMEDIADOR CON ESPECIES MACRÓFITAS (SCIRPUS HOLOSCHOENUS Y CYPERUS PAPYRUS) EN AGUAS CONTAMINADAS CON MERCURIO Y CIANURO, PROVENIENTES DE ACTIVIDADES MINERAS EN LA VEREDA LA PAILA, MUNICIPIO DE BUENOS AIRES (CAUCA)

KAREN TATIANA SANCHEZ HIDROBO

Trabajo de grado en modalidad investigación para optar al título de Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Director

ARNOL ARIAS

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE

POPAYÁN

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez revisado el documento final del trabajo de grado titulado “Implementación de fitorremediador con especies macrófitas (*Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus)* en aguas contaminadas con mercurio y cianuro, provenientes de actividades mineras en la Vereda La Paila, municipio de Buenos Aires (Cauca).”; realizado por la estudiante **Karen Tatiana Sánchez Hidrobo**, se autoriza sustentación para optar, respectivamente, el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

_____

(Nombre Director (a), profesión, Mg)
Director(a)
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

_____

(Nombre jurado), [Formación académica-último título]
Jurado
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

_____

(Nombre de jurado), [Formación académica-último título]
Jurado
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Popayán, febrero 25 de 2020

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el que me dio la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los sueños más deseados y anhelados.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Por su amor y comprensión, por creer en mí en especial a mi madre por su apoyo incondicional incluso en los momentos tormentosos, porque gracias a ti soy la persona que soy y no dejaste que me rindiera en situaciones tan difíciles.

A mi hermana por estar siempre presente acompañándome y por el apoyo moral, que me brindo a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mi hija gracias que llego justo en este proceso que fue muy difícil, pero ella es una inspiración para hacer las cosas de la mejor manera para ella.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo agradezco a Dios por ser mi guía y fortaleza en todas las situaciones de mi vida, especialmente a mi Madre que con su esfuerzo y dedicación me ayudo a culminar mi carrera universitaria y me dio su apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible, y por siempre creer en mí , a mi bebe que llego en una situación que no esperaba pero hoy en día es mi fortaleza y alegría para salir adelante, a mi padre por su apoyo y por inculcarme siempre valores, a su exigencia que a veces chocábamos pero hoy este logro es gracias a eso mismo y por siempre querer lo mejor para mí y como tú dices que lo mejor que me podías dar era mi educación este logro es también gracias a ti, a mi hermanita que pueda sentirse orgullosa de este logro que aunque difícil todo este proceso gracias a ella fue una inspiración más para poder culminarlo.

Agradezco a mi director de tesis Arnol Arias quien con su experiencia, conocimiento y motivación me oriento en la investigación teniendo siempre la mejor disposición a colaborarme y a guiarme en este proceso.

A mis amigos que gracias a su apoyo moral me permitieron permanecer con empeño, dedicación y cariño, y a todos quienes contribuyeron con un granito de arena para culminar con éxito la meta propuesta.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 14

ABSTRACT 15

INTRODUCCIÓN 16

CAPITULO I. PROBLEMA 18

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 18

1.2. JUSTIFICACIÓN 21

1.3. OBJETIVOS 23

1.3.1. Objetivo general 23
1.3.2. Objetivos específicos 23

CAPITULO II. REFERENTES TEÓRICOS 24

2.1. ANTECEDENTES 24

2.2. BASES TEÓRICAS 29

2.1.1. Minería artesanal 29
2.2.2. Mercurio 32
2.2.3. Aguas residuales 33
2.2.4. Tratamiento de aguas residuales 34
2.2.5. Fito remediación 34
2.2.6. Metales pesados 36
2.2.7. Humedales artificiales 37
2.2.8. Junco (*scirpus holoschoenus)* 37
2.2.9. Papiro (*Cyperus papyrus)* 38

2.3. BASES LEGALES 39

CAPITULO III. METODOLOGÍA 40

3.1. Descripción área de estudio 41

3.2. FASE I: Recopilación de información y diagnóstico.....43

3.2.1. Actividad 1. Recopilación de información primaria 43
3.2.2. Actividad 2. Diagnóstico 43

3.3. FASE II. Diseño e implementación del fitorremediador con las especies macrófitas *Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus* 44

3.3.1. Actividad 1. Diseño de humedales 44
3.3.2. Actividad 2. Implementación del humedal 45
3.3.3. Acondicionamiento de las plántulas 45
3.3.5. Actividad 4. Funcionamiento y mantenimiento 46

3.4. FASE III. Porcentaje y tiempo.....46

- Cianuro.....47
- DBO5.....47
- DQO 47
- Mercurio 47
- pH.....47

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 49

4.1. Diseñar e implementar el humedal con especies macrófitas *Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus*.....49

4.1.1. Diseño del humedal.....50
4.1.2. Implementación del humedal.....52
4.1.4. Funcionamiento y mantenimiento.....58

4.2. Concentración del mercurio (Hg) y cianuro CN- presentes en el agua residual producida por el entable minero.....60

4.2.1. Concentración de Hg y CN-.....61
4.2.2. Concentraciones de pH 65
4.2.3. Concentración de DBO_5 67
4.2.4. Concentraciones de DQO 69
4.2.5. Porcentaje de remoción de mercurio.....71

4.3. Porcentaje de remoción de mercurio, cianuro y el tiempo de retención hidráulico a través del fitorremediador. 75

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 76
5.1. CONCLUSIONES 76
5.2. RECOMENDACIONES 79

BIBLIOGRAFÍA 80

ANEXOS 84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fases del proceso de Fitorremediación 35

Tabla 2. Normatividad para actividades mineras 39

Tabla 4. Valores permisibles.....49

Tabla 5. Medición del crecimiento de las especies Scirpus holoschoenus, y Cyperus papyrus en los humedales artificiales. 55

Tabla 6. Información estanques.....61

Tabla 7. Concentración de Mercurio 61

Tabla 8. Concentración de Cianuro 64

Tabla 9. Concentración de pH 66

Tabla 10. Concentración de DBO_5.....67

Tabla 11. Concentración de DQO.....69

Tabla 12. Concentraciones del porcentaje de remoción 72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de trituración 30

Figura 2. Proceso de amalgamación 32

Figura 3. Área de estudio.....42

Figura 5. Prototipo humedal.....52

Figura 6. Ubicación de las peceras.....53

Figura 8.Vertimiento de las aguas residuales provenientes del entable minero. ...54

Figura 9. Montaje del diseño de los humedales con sus respectivas abreviaciones. 55

Figura 10. Montaje de los humedales con las plantas, agua del entable, grava y su tubería de PVC. 58

Figura 11. Recolección de las muestras en recipientes plásticos de 1000 mL de capacidad. 59

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Concentración de Mercurio Hg(mg/L).....62

Gráfica2. Concentraciones de cianuro.....64

Gráfica 3. Concentración de pH.....66

Gráfica 4. Concentración de DBO_5.....68

Gráfica 5. Concentración de DQO.....70

Gráfica 6. Concentraciones iniciales y finales del porcentaje de remoción.....72

LISTA DE ECUACIONES

Ecuaciones 1. Diseño de humedales.....44

Ecuaciones 2. Porcentaje de remoción.....46

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados de concentración, pH, DBO5, DQO, Hg y CN 84

Anexo 2. Resultados de laboratorio 85

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, describe el manejo de macrófitas acuáticas para el proceso de fitorremediación en remoción de mercurio y cianuro mediante el uso de las especies (S*cirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus)* como alternativa de bajo costo, mantenimiento y operación para el tratamiento de aguas residuales procedentes de la actividad minera, en una planta de beneficio de oro en el municipio de Buenos Aires, Cauca vereda la Paila. Estas plantas han sido utilizadas en procesos de biorremediación y fitorremediación, ya que pueden absorber algunas sustancias disueltas y producir oxígeno mediante fotosíntesis. Con base en los estudios de remoción de compuestos tóxicos por parte de estas plantas acuáticas son de gran ayuda en la depuración de aguas residuales, por lo cual la presente investigación tuvo como propósito eliminar la contaminación por mercurio y cianuro en las aguas residuales generadas en el proceso de producción en los entables mineros".

Las especies macrófitas (S*cirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus)* fueron utilizadas en la presente investigación con resultados muy aceptables de acuerdo con pruebas cuantitativas de remoción efectuadas en planta. El tratamiento se realizó mediante un sistema de acuarios que captaban el agua proveniente de la mina, en ellos se depositaron las especies mencionadas y se midieron parámetros fisicoquímicos de control, así como de mercurio y cianuro. Se evidencia que las macrófitas absorben gran parte del mercurio y cianuro disuelto con eficiencias entre 68% y 73% que son valores aceptables en todo tipo de remoción. De acuerdo con los resultados alcanzados se sugiere el uso de plantas fitorremediadoras en el tratamiento de aguas provenientes de los entables mineros; no solamente son efectivas en la remoción, sino que desde el punto de vista económico presentan una alternativa viable, en el mismo sentido se recomienda hacer estudios de remoción de otros metales pesados en otro tipo de actividades mineras.

Palabras claves: Fito remediación, Remoción, Minas de filón, Mercurio y Cianuro.

ABSTRACT

The present research work, it describes the management of aquatic macrophytes for the phytoremediation process in removal of mercury and cyanide through the use of species (Scirpus holoschoenus and Cyperus papyrus) as a low-cost alternative, maintenance and operation for the treatment of wastewater from mining activity, in a gold beneficiation plant in the municipality of Buenos Aires, Cauca, la Paila. These plants have been used in bioremediation and phytoremediation processes, since they can absorb some dissolved substances and produce oxygen through photosynthesis. Based on the studies of removal of toxic compounds by these aquatic plants, they are of great help in the purification of wastewater, therefore, the purpose of this research was to eliminate mercury and cyanide contamination in the wastewater generated in the production process in mining establishments".

The macrophyte species (*Scirpus holoschoenus and Cyperus papyrus)* were used in the present investigation with very acceptable results according the quantitative removal tests carried out in the plant. The treatment was done through a system of aquariums that collected the water from the mine, the mentioned species were deposited into the aquariums and the physicochemical control parameters were measured, as well as the mercury and cyanide levels. In that way was evident that the macrophytes absorb much of the mercury and dissolved cyanide with efficiencies between 68% and 73% that are acceptable values in all types of removal. According to the results achieved, the use of phytoremediation plants in the treatment of water from mining sites; Not only are effective in the removal, but from the financial point of view they present a viable alternative, Equally it is recommended to carry out studies of removal of other heavy metals for other types of mining activities

Keywords: Phytoremediation, Removal, Reef Mines, Mercury and Cyanide.

INTRODUCCIÓN

Según La Rotta y Torres [2], hoy en día las dinámicas globales del mundo contemporáneo obedecen al modelo capitalista de producción a gran escala, acumulación, derroche y despojo. Este sistema productivo esta soportado en el necesario consumo de productos y servicios que se ha ido incrementando con el auge de la tecnología, crecimiento demográfico y las necesidades artificiales; para su producción se requiere diversos recursos naturales y para lograr satisfacer las necesidades se ha recurrido a explotar múltiples territorios levantando una destrucción sin precedentes.

En Colombia, este modelo se ha convertido en una de las principales actividades económicas, siendo un panorama confiable para diversas multinacionales para la explotación de territorios, confrontando los intereses de las mismas con el Estado y con las comunidades que ahí habitan y que generan resistencia al defender sus recursos naturales y la salud de su entorno. Estas problemáticas afectan principalmente a poblaciones vulnerables al vivir en tierras estratégicas, desafortunadamente a las comunidades no se les informa acerca de los proyectos mineros, o reciben mal información que afecta los intereses económicos de su sociedad. [1].

Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia que los sistemas acuáticos se ven afectados por las sustancias usadas con el fin de extraer el oro y otros minerales. En este sentido, podemos decir que la contaminación en los ríos se produce, bien por la presencia de compuestos o elementos que normalmente no estarían sin la acción del hombre, o por un aumento o descenso de la concentración normal de las sustancias ya existentes debido a la manipulación humana [2].

En los últimos tiempos el interés de los académicos de este tema ha girado en torno a las problemáticas que se derivan del alto grado de población cerca a los nacimientos de agua, y demás cuencas hidrográficas en la región de este modo, es importante tener en cuenta el estudio de los metales pesado que causan toxicidad

y que se acumulan en varios organismos vivos. Así mismo, es pertinente comprender que el ser humano termina afectándose al consumir dichas especies que se encuentran en el agua. [2].

El presente trabajo de investigación se encuentra estructurado en cinco capítulos. El primero describe el problema de interés, reflejando de manera general el estado actual del grado de contaminación ambiental por metales pesados a nivel mundial y local, así como los objetivos de esta investigación. El segundo capítulo presenta definiciones y conceptos, además de antecedentes y bases legales que ayudan a la comprensión de términos y enfoques de la investigación. El tercer capítulo enmarca la metodología aplicada, indicando instrumentos, actividades y el tipo de análisis de información con la cual se podrán inferir respuestas y plantear alternativas para disminuir la contaminación en aguas residuales mineras y que de esta manera contribuyan a mejorar las condiciones de la zona afectada. El cuarto capítulo refleja los resultados por medio de la determinación de la concentración del metal (Hg) y el mercurio (CN) en aguas residuales por el entable minero, Diseñar e implementar el humedal con especies macrófitas *Scirpus Holoschoenus y Cyperus Papyrus* y la evaluación del porcentaje de remoción de mercurio y cianuro y el mejor tiempo de retención hidráulico a través del fitorremediador. Por último, se presenta el capítulo cinco que describe las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPITULO I. PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las últimas décadas, los mercados globales de materias primas y metales preciosos están experimentando un auge nunca antes visto, la demanda ha aumentado vertiginosamente y las cantidades extraídas se han multiplicado de manera exponencial; el 90% de la fuerza de trabajo de la minería mundial trabaja en el sector artesanal y de pequeña escala, aproximadamente entre 10 a 15 millones de personas, donde 4,5 millones son mujeres y 1 millón son niños [3].

Es una industria polémica, sin embargo, se considera importante ya que representa una oportunidad para las personas que están en situación de pobreza del mundo principalmente las zonas rurales más apartadas y con altos índices de necesidades básicas insatisfechas [3]. Sin embargo, han sido notorios los graves problemas que ha generado en los ecosistemas al modificar el paisaje y producir contaminación del agua y suelo y problemas de salud pública, principalmente por los altos contenidos de cianuro, mercurio y otros residuos derivados del proceso de extracción [4].

Según las Naciones Unidas [5], en sus recientes investigaciones mencionan que las emisiones principalmente de mercurio están aumentando en algunos países en desarrollo como Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú están entre las más elevadas del mundo, cuyas emisiones se comprenden entre las 50 y 500 toneladas/año, y cuyos indicios indican que las actividades de minería artesanal de oro en Colombia emiten 180 toneladas de mercurio anualmente.

En Colombia, la pequeña minería existe desde antes de la época de la conquista y se ha mantenido hasta el día de hoy [6]. Colombia gracias a su diversidad de climas, suelos, geología y posición geográfica, dispone de variada oferta de productos mineros a gran escala entre los que se incluyen oro, carbón, platino, níquel, esmeralda y caliza; así como otras que producen en menor escala principalmente

sal, roca fosfórica, arcillas, arenas silíceas, minerales de cobre y manganeso, yeso y varios tipos de rocas ornamentales. Convirtiéndola en un factor importante y determinante para la economía [6].

Históricamente, la producción minera en Colombia se ha realizado en gran medida a través de la minería artesanal, según el último censo minero colombiano realizado en el año 2011, el 72% de las minas en el país son pequeñas y el 30% de la producción de estas corresponden a minería del oro [8]. Los departamentos con mayor número de minas en pequeña escala son Boyacá (2.024 minas), Antioquia (1.395 minas), Bolívar (967 minas), Santander (954 minas), Cundinamarca (764 minas) y Magdalena (505 minas) [7].

En el municipio de Buenos Aires departamento del Cauca, especialmente en la vereda “La Paila”, se evidencia el problema ocasionado por la explotación minera artesanal o de filón que ha alterado las condiciones fisicoquímicas del rio y las especies bióticas que habitan en este lugar, las cuales son el sustento económico y alimenticio que abastecen a la comunidad. Finalmente llegaría a zonas agrícolas, de pesca y a fuentes de abastecimiento de agua potable, por lo general, las bocatomas, o sistemas de captación se encuentran localizados más cerca de los sedimentos, donde es mayor la contaminación.

Para el desarrollo de la actividad minera se utilizan dos técnicas principales para la extracción del oro. En primer lugar, la amalgamación con mercurio y, en segundo lugar, la extracción con cianuro. El mercurio y cianuro se usa para separar y extraer el oro de las rocas o piedras en las que se encuentra. Este se adhiere al oro formando una amalgama que posteriormente se calienta para que se evapore el metal y quede el oro [7].

Los efectos nocivos de estos elementos están científicamente corroborados entre ellos figuran daños neurológicos, además de causar malformaciones fetales cuando la víctima de intoxicación es una mujer en estado gestacional. Al ser inhalado y absorbido a través de la piel y las mucosas pueden dañar permanentemente los

riñones o el cerebro, causando irritabilidad, temblores o alteración de audición y la memoria, además de causar síndromes de tristeza, ansiedad, insomnio, temor, excesiva timidez, sueño agitado, susceptibilidad emocional, híper-excitabilidad o depresión. Por otro lado, estas dos técnicas amenazan en atacar los ecosistemas terrestres, atmosférico e hídrico [8].

Es por ello que se hace necesario buscar alternativas que contribuyan a mejorar las condiciones de esta zona. En la actualidad se utilizan tratamientos en aguas residuales mineras, con tecnologías convencionales de descontaminación, tales como los fitorremediadores [9], estos tratamientos de descontaminación son de tipo biológico con la ayuda de especies macrófitas tales como *(Scirpus Holoschoenus* y/o *Cyperus Papyrus),* donde su función principal se desarrolla en efluentes contaminados con metales pesados como cianuro y mercurio que son producto de los procesos de la minería aurífera de la zona.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La vereda “La Paila” ubicada en el municipio de Buenos Aires (Cauca), es una zona que se caracteriza por la presencia de entables mineros para extracción de oro, donde dicha actividad se elabora de forma artesanal, lo cual constituye una de las principales fuentes de economía de la población [10]. No obstante, a lo considerado el 16 de julio de 2018 en Colombia sobre la prohibición del uso de mercurio en la minería como se establece en la ley 1658 de 2013, se ha continuado con el uso de esta sustancia y de esta forma se siguen contaminando las fuentes hídricas de la zona [10].

Debido a este tipo de problemáticas, existen investigaciones de Fitorremediación y biorremediación, sin embargo, hay un espacio bastante significativo para avanzar en el uso de nuevas alternativas y estudios orientados a la utilización de nuevas especies. Por este motivo se han llevado a cabo algunos análisis en relación con el uso y la implementación de nuevas tecnologías además de la necesidad de investigar otras alternativas que aprovechen, beneficien y apliquen los procesos ocurridos naturalmente en el ecosistema para la depuración de aguas contaminadas, ofreciendo la posibilidad de recuperar los recursos y contribuyendo así a la sostenibilidad del sistema para la reducción y/o eliminación de estos metales presentes en el agua provenientes de dichas actividades[11].

Los métodos biológicos de descontaminación tales como los humedales, resultan viables, y económicos para el uso de las especies macrófitas con potencial fitorremediador siendo eficientes, además de ser de fácil consecución, así mismo ayuda y beneficia a la población. Teniendo en cuenta que las concentraciones en las aguas residuales con presencia de metales, y reduzca el impacto generado al medio ambiente [12]. Las especies macrófitas de las cuales se tiene referencia y que resultan ser exitosas en su proceso, son *scirpus holoschoenus* y *cyperus papyrus.* Ya que tienen la ventaja de ser especies no invasoras, aunque no se

elimine el problema totalmente, son necesarias por ser de gran beneficio para la naturaleza y la población.

Teniendo en cuenta lo anterior, se considera importante el desarrollo de la presente investigación cuyo objetivo busca “Evaluar la eficiencia fitorremediadora de las especies macrófitas *scirpus holoschoenus y cyperus papyrus* para la remoción de mercurio y cianuro en efluentes contaminadas provenientes de la minería artesanal en la Vereda la Paila, Municipio de Buenos Aires-Cauca”. Esta vereda cuenta con 334 afiliados de la Cooperativa Multiactiva Unión de Mineros “Comultimineros”. Por lo tanto, se considera importante buscar alternativas que solucionen el inadecuado manteniendo de los entables, los cuales se encuentran colmatados con arenas, ocasionando que la descarga del vertimiento sea directa al río, afectando principalmente el suelo, la cobertura vegetal, las fuentes hídricas, la fauna, flora y las personas que participan directamente en las actividades mineras, quienes viven a las cercanías ocasionando a corto y a largo plazo problemas graves de salud.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia fitorremediadora de las especies macrófitas *Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus* para la remoción de mercurio y cianuro en efluentes contaminadas provenientes de la minería artesanal en la Vereda la Paila, Municipio de Buenos Aires.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar el humedal con especies macrófitas *Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus*
- Determinar la concentración del mercurio y cianuro presentes en el agua residual producida por el entable minero.
- Evaluar el porcentaje de remoción de mercurio y cianuro y el mejor tiempo de retención hidráulico a través del fitorremediador.

CAPITULO II. REFERENTES TEÓRICOS

2.1. ANTECEDENTES

Para el desarrollo de la investigación, se han tomado casos de éxito a nivel internacional y nacional que muestran avances y resultados en el campo de uso de eficiencia fitorremediadora de las especies macrófitas *Scirpus Holoschoenus y Cyperus Papyrus* para la remoción de mercurio y cianuro en efluentes contaminados provenientes de la minería artesanal, dentro de los cuales se destacan los siguientes:

El trabajo elaborado por Nancy Eribel Nungaray Arteaga (2014) en la Ciudad de México D.F., México, titulado “Fitorremediación del suelo de la mina La Blanca, Hidalgo, con plantas de la especie *Cosmos bipinnatus* y el género *Dahlia*.” tienen como objetivo básico promover los procesos naturales a partir de organismos vivos (plantas, hongos, bacterias entre otros) para remover, degradar o transformar compuestos orgánicos contaminantes en productos metabólicos menos tóxicos, es un tratamiento seguro con un mínimo de riesgos a la salud y es tecnológicamente efectiva. El éxito de cualquier estrategia de Fitorremediación depende de la identificación de especies de plantas adecuadas, ya que deben contar con valores ecológicos desechables. En esta investigación la autora concluye que los individuos de *Cosmos Bipinnatus y Dahlia* son Fito extractoras de Cd, Pb, Zn presentes en los suelos de mina ayudan a la descontaminación de estos lugares, igualmente argumenta que la Dahlia es hiperacumuladora de Cd y Pb en su parte aérea. En relación a los resultados, el autor sostiene que la concentración de metales que quedaron retenidos en el suelo de las especies *Cosmos Bipinnatus y Dahlia* están dentro del rango normal para Pb y Zn. Para el comportamiento de *Cosmos Bipinnatus* en la primera etapa de crecimiento (17 días) se comprobó que puede absorber concentraciones elevadas de Cd, Pb y Zn, sin embargo, los metales provocan daños en las hojas, pero aun así pueden continuar con su desarrollo. De

igual manera se evidencio un estrés constante en la planta que afecto el crecimiento además del ataque de plagas como la mosca blanca y el pulgón. [13].

Por otro lado, el trabajo desarrollado por Ismael Hernández Valencia, Gabriela Navas y Carmen Infante (2016), titulado “Fito remediación de un Suelo Contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrsus Maximus*”, en el cual se estudió la capacidad del pasto *Megathyrsus Maximus* para remediar un suelo contaminado con petróleo extra pesado, a través de los cambios durante 120 días en el contenido de hidrocarburos totales de petróleo y de indicadores de la actividad microbiológica en el suelo (actividad de la enzima deshidrogenasa, biomasa del carbono microbiano y respiración basal), los cuales fueron evaluados en dos tratamientos, uno en suelos contaminados en donde se trasplantó Megathyrsus maximus y otro en suelos contaminado sin la planta .Hernández Valencia concluye que la especie *Megathyrsus Maximus* favorece la reducción del contenido de hidrocarburos de suelos contaminados con petróleo extra pesado con relación a los suelos que no tienen esta planta así mismo afirma que las diferencias son visibles a partir de los 120 días, otro de los puntos abordados son las fracciones que componen el hidrocarburo, disminuyeron los desaturados y aromáticos para el tratamiento con pasto, y solo la de aromáticos para el tratamiento sin pasto el resto de las fracciones no mostraron cambios significativos lo que se asocia a su baja biodegrabilidad. Uno de los resultados más importantes al cual llega el autor es que el uso de plantas con fines de fitorremediación mejoran la calidad del suelo al aportar materia orgánica y fomentar la actividad bilógica. Igualmente, este procedimiento remueve compuestos contaminantes y protege el suelo contra la erosión volviendo al entorno más agradable. En relación a porcentajes el autor describe que la recuperación del petróleo en el suelo no fue total, es decir la mezcla originalmente preparada de 50.0mg/g de petróleo extra pesado se obtuvo una concentración inicial de hidrocarburos del 37.5mg/g lo que indica una recuperación del 75% aproximadamente [14].

A nivel nacional se toma como referencia el trabajo denominado “Fito remediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de industria minera” realizado por María C. Domínguez, Sara Gómez S., Alba N. Ardila A. (2016) en la ciudad de Medellín (Antioquia), cuyo objetivo fue evaluar el desempeño del buchón de agua (*Eichhornia Crassipes*) en un humedal de flujo sub-superficial para la Fito remediación de un efluente real contaminado con mercurio, aplicable a ambientes con concentraciones bajas de contaminantes. En especial estudios de Fito remediación de Hg mediante el uso de humedales han mostrado ser eficientes (Fortunato, Crespo y Reis, 2005; Teles Rodríguez, Silva y Araujo, 2014; Zheng, Gu, Zhou y Li, 2013). Domínguez concluye en el trabajo que no se logró obtener un agua residual en óptimas condiciones y que cumpliera con los límites máximos permisibles para el mercurio (Hg) en efluentes utilizadas para la industria minera según las leyes colombianas; no obstante, se logró un efluente con niveles inferiores en la mayoría de los parámetros analizados en relación a lo obtenido en el agua residual original proveniente de los entables mineros. Con respecto a los logros el autor afirma que hubo disminución considerable de los parámetros analizados y con respecto a otros estudios relacionados con el tema. [15].

A nivel local, se puede encontrar el trabajo desarrollado por Giovanni Hernán Palta Prado, Sandra Morales Velasco (2014), titulado **“**Fito depuración de aguas residuales domésticas con poaceas: *brachiaria mutica, pennisetum purpureum y panicum maximun* en el municipio de Popayán, Cauca”, plantearon la Fito depuración como un tipo de Fitorremediación teniendo como objetivo, evaluar diferentes especies de gramíneas, buscando una alternativa de manejo de las aguas residuales domésticas con plantas útiles en la alimentación animal. Para el desarrollo de esto se establecieron humedales artificiales bajo un diseño de muestreo temporal y un arreglo factorial de bloques al azar. El estudio se realizó como una alternativa para el asentamiento Brisas de San Isidro del Municipio de Popayán que no presenta sistema de recolección de aguas servidas, las cuales son vertidas directamente sobre la Quebrada Lame. Los autores concluyen 3

argumentos importantes, en el primero afirman que los pastos utilizados en su trabajo sirvieron como medio para la reducción de la carga orgánica de las aguas residuales domesticas logrando de esta manera humedales con varias funciones para el manejo del agua residual doméstica y como alimento para animales. En otro punto argumenta que las variaciones presentaron entre los tratamientos efectividad en brachiaria *mutica, pennisetum purpureum* , finalmente en el trabajo se recomienda aplicar estrategias de sedimentación primaria, de igual forma cortes periódicos a los pastos con el fin de evaluar el movimiento de nitrógeno hacia el forraje. En cuanto a los resultados se define lo siguiente: aunque el efluente no presento clarificación parcial la composición del agua residual domestica corresponde a un agua entre débil y media concentración. Por otro lado, el carácter débil del agua residual pudo darse a las precipitaciones durante el periodo de estudio que ocasionaron dilución de los nutrientes presentes en el efluente. El único parámetro con una condición fuerte fue el cloruro con un valor promedio de 163.17mg/l evidenciando la utilización de detergentes, desinfectantes y suavizantes por los habitantes del lugar. [16].

Por otro lado, el trabajo realizado por Renso Alfredo Aragón Calderón, Andrea Yiceth Parra Collazos y Martha Adriana Peña Torres titulado “Evaluación preliminar del funcionamiento de un sistema prototipo de humedales artificiales empleando *Heliconia Psittacorum* y *Cyperus Papyrus* para el tratamiento de aguas residuales”, el objetivo a evaluar fue el de dar una solución ambientalmente sostenible a las aguas residuales domésticas que genera, en el marco del desarrollo de las actividades de formación integral profesional por proyectos de sus aprendices en El Tecno parqué Agroecológico Yamboró del Sena – Pitalito, Huila, el tratamiento prototipo se realizó con dos especies de plantas: *Heliconia Psittacorum* y *Cyperus papyrus*. Los parámetros evaluados fueron DBO5, DQO, CE, OD, STD, sólidos sedimentables, coliformes fecales y totales, mostró resultados satisfactorios en remoción de carga contaminante, sin embargo, se propone realizar estudios posteriores, con tiempos de medición prolongados. En esta investigación los

autores concluyen que los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales realiza bajas remociones de DBO5 (31%), alta remoción de DQO (93%), presento disminución de OD (14,1%) en el efluente aumento en la cantidad de Solidos Totales Disueltos (6.6%), una total remoción de Solidos Sediméntales (100%). Con respecto al nivel microbiológico presenta eficiencias mayores a 90% en remoción de Coliformes Fecales y Totales. En otra parte los autores hacen una recomendación la cual consiste en analizar en un periodo de tiempo, que permita identificar una tendencia marcada del comportamiento fisicoquímico y microbiológico del sistema. Finalmente, los resultados encontrados demuestran de forma preliminar que la implementación de humedales construidos de flujo subsuperficial, empleando *Heliconia Psittacorum* y *Cyperus papyrus* en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, es una alternativa viable y sostenible desde lo ambiental siendo de muy bajo costo para las comunidades. [17]

Finalmente, el trabajo realizado por el licenciado en bioquímica Antonio María Cervantes titulado "Aproximación a los riesgos derivados de la presencia de residuos mineros en saladares del entorno del mar menor: dinámica de metales pesados y arsénico y su acumulación en plantas y moluscos" argumenta que en las zonas contaminadas con metales pesados y arsénico, se pueden implementar en esas áreas las especies que presentan un elevado potencial de Fitoestabilizador con base a su capacidad de acumulación de elementos tóxicos en las raíces, que además son aquéllas que toleran mejor las condiciones de hidromorfía, estas son; (*Arthrocnemum Macrostachyum, Sarcocornia fruticosa, Juncus Maritimus, Scirpus holoschoenus y Phragmites Australis*), Así mismo, la presencia de vegetación impide la erosión y el arrastre de los estériles mineros. Para las conclusiones de este trabajo se argumenta que existen riesgos de toxicidad y de trasferencia de metales pesados y arsénico en la cadena atrófica en los aladares, y en los alrededores del lagunar. Tanto en los suelos de ambos lugares, como los sedimentos marinos contienen altas concentraciones de dichos elementos, sobre todo en las partes aéreas de algunas especies de plantas, en especial el

gasterópodo H. trunculusen. Los resultados se encuentra algunas recomendaciones para minimizar los riesgos anteriormente descritos uno de ellos es la inundación permanente de las zonas contaminadas, donde se implanten las especies que presentaron un rendimiento alto en el proceso de fitoestabilizador, ya que tiene una capacidad de acumulación de elementos tóxicos en las raíces y que mejor tolerancia tuvieron frente a la hidromorfia. También se recomienda el uso de carbonatos y un programa de monitoreo periódico que permita comprobar la efectividad a mediano y largo plazo. [18]

2.2. BASES TEÓRICAS

2.1.1. Minería artesanal

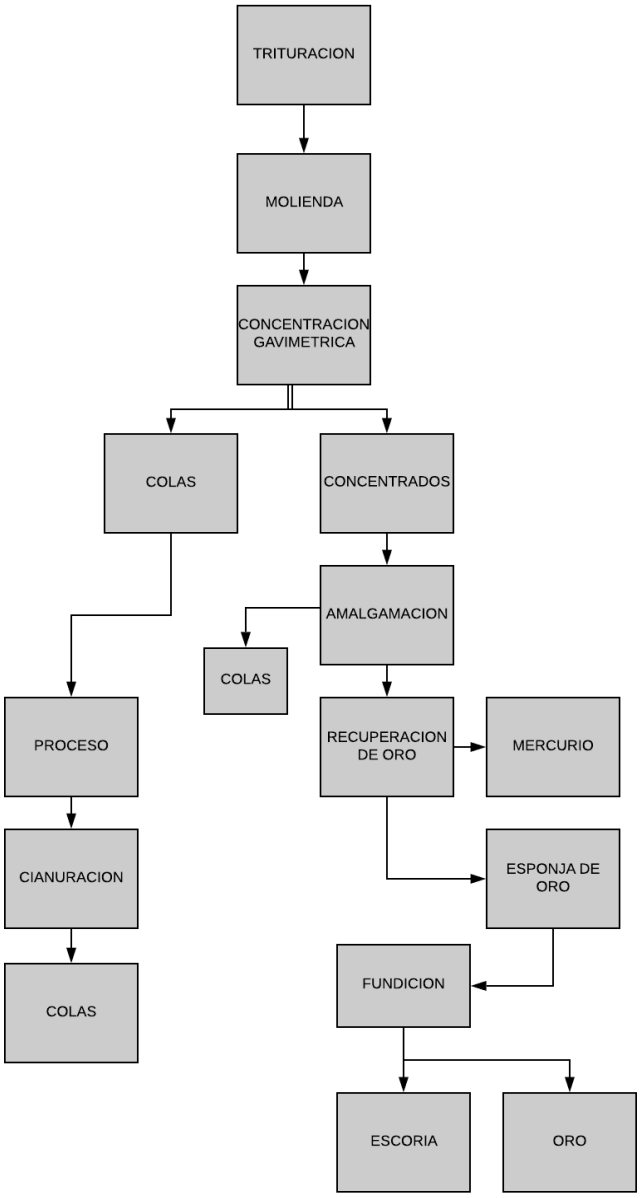
Según Perea, se refiere a la minería artesanal como el tipo de minería más primaria, caracterizada por individuos o grupos de individuos que exploran depósitos en pequeña escala con métodos manuales y equipos muy simples, como mates, las bateas, los cachos en los que se hace el proceso de concentración del mineral. Durante el proceso de beneficio del oro se usan los canalones en tierra y madera, motobombas de muy baja potencia, con proceso de molienda en pequeños molinos de bolas discontinuos (Llamados marranas, tarros, tambores o cocos) y trituración manual. [9]

En la etapa de beneficio, el oro es recuperado generalmente a través de un análisis gravimétrico con el uso del mercurio, en especial para minerías provenientes de yacimientos en filones, sin alcanzar etapas de recuperación un poco más avanzadas y complejas, como la separación por proceso metalúrgicos [20]. Según el boletín geológico [19], el oro se extrae en su totalidad de minas de aluvión o de filón, aproximadamente el 20% de la producción proviene de minas de filón. Los primeros procesos hidrotermales que dieron origen a los filones, están relacionados a eventos magmáticos que tuvieron lugar en los Andes Colombianos.

La minería artesanal del oro es la actividad extractiva de mayor informalidad en Colombia y salvo en contados casos en donde el Estado ha creados reservas especiales, los mineros realizan su oficio sin la medición de ningún tipo de título o permiso de exploración y en muchos casos ni siquiera cuentan con aprobación de dueños de los terrenos, lo que conlleva a conflictos de tierras y alteraciones de orden social [9].

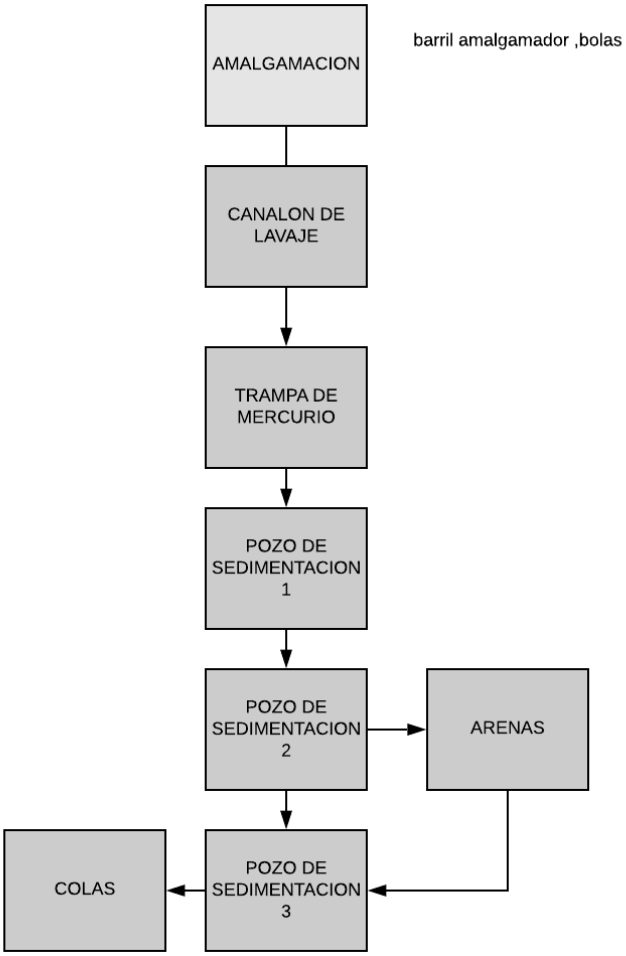
A continuación, se presentan en las Figuras 1 y 2 donde se detallan los procesos de trituración y amalgamación

Figura 1. Proceso de trituración



Fuente: Elaboración propia, con datos de [21]

Figura 2. Proceso de amalgamación



Fuente: Elaboración propia, con datos de [21]

2.2.2. Mercurio

El mercurio es el único elemento metálico líquido a temperatura ambiente, posee un brillo parecido a la plata, con una densidad de 13.456 g/ml. A 20 °C la presión de vapor es de 0,00212 mmHg, de tal forma que un recipiente abierto con mercurio metálico y expuesto en un ambiente cerrado, desprende vapor suficiente para saturar la atmósfera y exceder el límite máximo seguro de exposición ocupacional. El mercurio tiene su origen magmático, emanando como producto de desgasificación a lo largo de fallas profundas, proceso que continúa en la actualidad,

de este modo el mercurio inicia su ciclo biogeoquímico pasando a la corteza terrestre y de esta al aire, el agua y los suelos para pasar luego a las plantas, animales y por último el hombre [20].

Por otro lado, Marco [21], menciona que el mercurio es el tercer elemento en el grupo I2 de la tabla periódica, tiene un número atómico de 80, un peso atómico de 200.59 y valencias de 1 y 2, la abundancia promedio en la corteza terrestre es de 0,009 ppm, en suelo de 3 a 160 ppb, se caracteriza por ser un metal volátil que puede ser transportado a grandes distancias una vez que se ha emitido a la atmósfera. Dentro de los usos del mercurio se encuentran en amalgamas, recubrimiento de espejos, lámparas de vapor, pinturas aparatos de medición (termómetros, barómetros, manómetros) farmacéuticos, pesticidas y fungicidas. El mercurio es considerado perjudicial para plantas y animales.

2.2.3. Aguas residuales

El agua se utiliza en actividades determinadas que contienen propiedades fisicoquímicas generando agua residual donde el vertimiento de esta genera grandes contaminaciones, esta contiene altos compuestos y elementos orgánicos e inorgánicos, por lo que estos son disueltos dispersos o suspendidos. Para actividades industriales la extracción de minerales metálicos, manejan efluentes de lavado de minera por lo que estas contienen frecuentemente altas concentraciones de metales pesados que pueden llegar a ser absorbidos a los suelos y a las aguas mediante reacciones de oxidación y meteorización [22].

Se puede definir las aguas como aquellas que, por uso del hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y microorganismos. Las aguas residuales debido a la gran cantidad de sustancias en algunos casos tóxicas y microorganismos que portan, pueden ser causa y vehículo

de contaminación, en aquellos lugares donde son evacuados sin un tratamiento previo [22].

Según Martelo [23], para disminuir los impactos que generan estas aguas residuales se pueden manejar diferentes especies de plantas acuáticas las cuales son importantes, debido a que difieren en su capacidad de depuración del agua residual, en la remoción de nutrimentos específicos, de elementos traza y de compuestos potencialmente tóxicos como los metales pesados evitando una mayor contaminación en los ecosistemas.

2.2.4. Tratamiento de aguas residuales

Los procesos utilizados generalmente son físicos, químicos y biológicos. Otra de las técnicas actualmente son los humedales artificiales (HA) teniendo una gran ventaja este sistema por sus bajos costos de instalación y mantenimiento, a diferencia de sistemas físicos, químicos y biológicos convencionales estos utilizados para aguas residuales de tipo doméstico, industriales y remover metales pesados.

El incremento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de depuración eficientes autónomas y económicamente viables. Entre las soluciones más atractivas se encuentran los tratamientos que ayudan al mejoramiento de los fenómenos que ocurren en la naturaleza [23].

2.2.5. Fito remediación

Es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*. Los mecanismos de Fitorremediación incluyen la rizodegradación, la rito-extracción, la fitodegradación y la Fito estabilización. La Fitorremediación puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno,

etilbenceno y xilenos, solventes clorados desechos de nitrotolueno agroquímicos clorados y organofosforados, además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr(VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn. Se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua [24].

Las fases del proceso por el cual las plantas incorporan y acumulan metales pesados son las siguientes:

Tabla 1. Fases del proceso de Fitorremediación

FASES	DESCRIPCIÓN
Fase I	En el artículo encontrado de los autores Delgadillo y otros sobre, la fitorremediación argumenta lo siguiente [28]: “el manejo de los metales pesados al interior de la planta y después de la célula, tiende a que la raíz establezca principalmente la de los metales, los cuales llegan por difusión en el medio este puede ser flujo masivo o por intercambio catiónico. La raíz posee cargas negativas en sus células, debido a la presencia de grupos carboxilo, que interaccionan con las positivas de los metales pesados, creando un equilibrio dinámico que facilita la entrada hacia el interior celular, ya sea por vía apoplástica o simplástica” (p.602).
Fase II	Una vez dentro de la planta, las especies metálicas son retenidas o retraídas mediante la unión de

	moléculas o electrones. Entre estos se encuentran moléculas orgánicas, como los ácidos orgánicos (ácidos cítrico, oxálico y málico), algunos aminoácidos (histidina y cisteína) y dos clases de péptidos: fitoquelatinas y metaloteínas.
Fase III	Implica la compartimentalización y detoxificación, proceso por el cual forma un complejo con una biomolécula donde el metal queda retenido en la vacuola.

Fuente: [10]

2.2.6. Metales pesados

Los metales son componentes naturales de la corteza terrestre por ende son muy importante en los organismos, al ser parte fundamental de sus funciones bioquímicas y fisiológicas. Algunos son oligoelementos imprescindibles para el mantenimiento de los sistemas bioquímicos de los seres vivos como lo son el cobre, el manganeso, aluminio, mercurio, cadmio, berilio, hierro, bismuto, plomo, cobalto, molibdeno y zinc, siendo principalmente importantes en el metabolismo de los mamíferos que actúan también como potentes tóxicos, tanto para los seres humanos como para los ecosistemas. Según la alta exposición y la dosis absorbida, las naturalezas químicas de dichos metales pueden llegar a ser altamente tóxicos y cancerígenos [25].

2.2.7. Humedales artificiales

Un humedal artificial (HA) es una eco tecnología que se genera mediante procesos de biotransformación y mineralización, esto reduce la concentración de carbono, nitrógeno y fósforo, minimizando lo establecido por la normatividad vigente. Los principales componentes de un Humedal Artificial es el componente vegetal, lo cual se puede diseñar o estar representado por plantas vasculares terrestres o acuáticas, los microorganismos y el material de empaque o medio de soporte constituido por métodos rocosos [26].

Los Humedales Artificiales fundamentan su funcionamiento en la actividad bioquímica de los microorganismos, el aporte de oxígeno proveniente del componente vegetal en interacción con el material de empaque, también funciona como soporte tanto para los microorganismos como para el componente vegetal, además de funcionar como material filtrante. Todos estos elementos juegan un papel importante ya que eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan los materiales orgánicos hasta mineralizarlos permitiendo mantener e incrementar la estética del paisaje y proporcionan condiciones para el desarrollo, mejorando la preservación de vida silvestre ayudando a un mejor hábitat para las diferentes clases de organismos [26].

2.2.8. Junco (*scirpus holoschoenus)*

El Junco es una planta frecuente en los humedales principalmente de la costa central de Perú, perteneciente a la familia Cyperaceae. Es una especie que posee un rizoma con o sin escamas, del cual se desprenden múltiples tallos verdes. Los tallos pueden llegar hasta 1,5 m, son erectos, cespitosos, lisos, agudamente trígonos. Posee vainas foliares inferiores, sin lamina, con un limbo de hasta 2 cm, oblicuo; las vainas foliares superiores pueden poseer o no una lámina de 13 hasta 20 cm, lisa, septado nodulosa [27].

Por otro lado, Aponte [27] menciona que, el junco es una de las plantas más utilizadas en los humedales, debido principalmente a la fibra que produce, esta se usa en la fabricación de artesanías, en algunos humedales han destinado zonas como área de conservación regional, con lo que ha pasado su gestión a manos de los gobiernos regionales, que debido a su contexto actualizar sobre el mercado del junco y los cambios en la gestión de este recurso es muy importante para la toma de decisiones en relación con la sostenibilidad de su aprovechamiento.

2.2.9. Papiro (*Cyperus papyrus)*

Para Aulestia [28], el papiro viene de la Familia Cyperaceae (Ciperáceas) el origen de este es de la Cuenca del Nilo, África tropical hasta Egipto es una planta acuática o palustre, arraigante por lo general con rizomas tiene características entre ellas está el rápido crecimiento de hojas basales pequeñas flores agrupadas en inflorescencias estas plantas son utilizadas para estanques, embalses, pequeños lagos, o bien como planta de interior en maceta, esta es muy utilizada para la depuración de aguas.

Dándole solución a un gran número de problemas como lo económico y medioambiental que presenta la depuración total de las aguas residuales, evita la evaporación del agua aplicada y consigue que el sistema de depuración sea el más eficiente de todos los conocidos. sus temperaturas con las que crecen mejor se encuentra entre los 10º C de mínima en invierno y sin problemas de máximas si se asegura un ambiente húmedo. En invierno si no se ha la planta tiende a volverse amarilleará y se marchitará.

2.3. BASES LEGALES

En Colombia, la minería sus prácticas y a fines están normalizados a través de políticas, las cuales han logrado la formulación e implementación de instrumentos y guías las cuales permiten seguir una línea para el adecuado manejo de la actividad. La norma tenida en cuenta respecto a la eficiencia del poder fitorremediador de las dos especias se hará por medio de la resolución 0631 de 17 marzo de 2015, donde se establecen los límites máximos permisibles para vertimientos puntuales además de tener en cuenta las variables a tratar. En la Tabla 2, se presenta la normatividad establecida para quienes ejercen actividades mineras.

Tabla 2. Normatividad para actividades mineras

NORMA	DESCRIPCION
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones [29]
Ley 685 15 de agosto del 2001	Por el cual se expide el código de minas y otras disposiciones [30]
Resolución 2115 de junio del 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano [31]

Ley 1658 de 15 de julio del 2013	Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país. se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones [11]
Resolución 0631 17 de marzo del 2015	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en lo vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones [32]

Fuente: [29], [30], [31], [11] y [32]

CAPITULO III. METODOLOGÍA

El desarrollo de la metodología se fundamentó en la evaluación de la efectividad fitorremediadora de especies macrófitas (*Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus*) para la remoción de mercurio y cianuro presente en aguas que han sido utilizadas en las actividades de la minería artesanal en la Vereda “La Paila” del municipio de Buenos Aires, Cauca. La metodología se realizó de forma aplicada.

Para el desarrollo del proyecto se realizó la revisión del instructivo de toma de muestras de aguas residuales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para seguir con los protocolos establecidos en campo por su aplicabilidad a muestreos de cualquier tipo de vertimientos y donde se describen los

instrumentos requeridos para muestreo en campo; de acuerdo a lo mencionado se procedió hacer un seguimiento de las aguas superficiales a tratar [33].

3.1. Descripción área de estudio

El municipio de Buenos Aires está localizado a los 03º 01' 08" de latitud norte y 76º 38' 37" de longitud oeste, su altura sobre el nivel del mar es de 1.200 m. El área municipal es de 410 km^2, hacen parte del municipio los corregimientos de La paila, El Ceral, El Porvenir, Honduras, La Balsa, Paloblanco y San Ignacio. Limita al oriente con el municipio de Santander de Quilichao, al occidente con los municipios de Suárez, López de Micay y Buenaventura, al norte con los municipios de Jamundí y al sur con los municipios de Suárez, Morales y el río ovejas medio. Sus principales actividades económicas es el sector minero y agropecuario, actividades que en muchas ocasiones actúan de modo complementario para asegurar la economía familiar [34].

El Plan de ordenamiento del recurso hídrico [35], menciona que la subcuenta río Teta hace parte de la subzona hidrográfica Quinamayo, se localiza en el norte del departamento del Cauca, siendo parte en su mayor porcentaje del municipio de Buenos Aires y la otra parte al municipio de Santander de Quilichao, el cauce principal inicia en el corregimiento San Ignacio perteneciente al municipio de Buenos Aires a una altura aproximada de los 2000 y 2100 msnm. La red de drenaje del río Teta, la conforman tributarios pequeños, como son la Quebrada El Uvo, el río Mazamorrero y la Quebrada Purgatorio, que discurren por la margen derecha y por la margen izquierda sólo la Quebrada San Miguel que confluye en la zona próxima a la desembocadura al río Cauca.

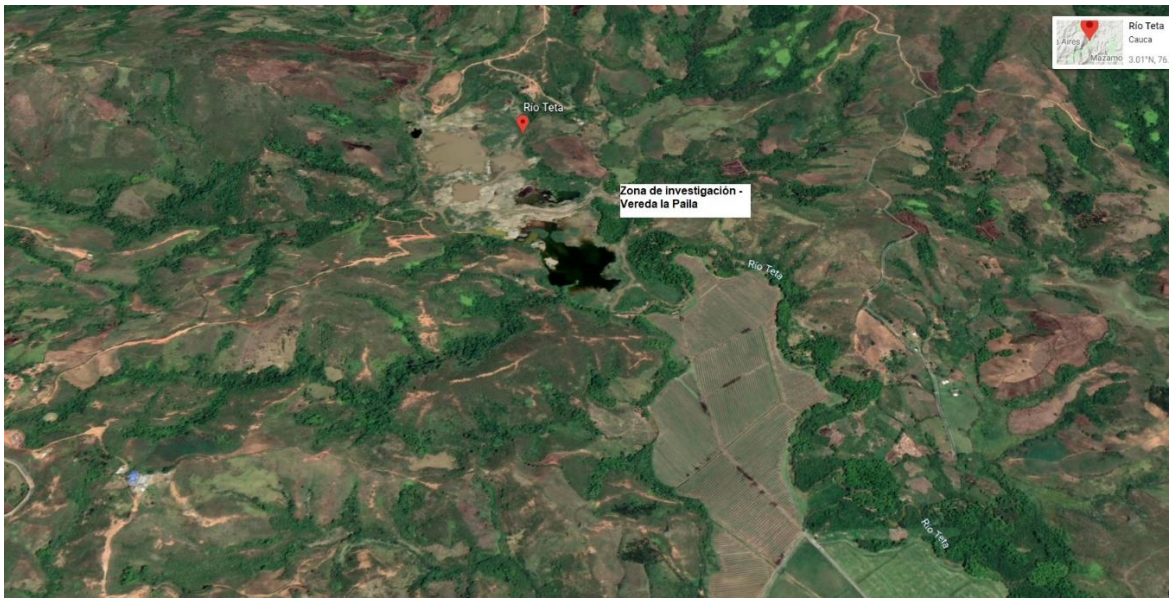
En su recorrido se une con varios tributarios de importancia como la Quebrada el Uvo, Quebrada el Purgatorio, Quebrada San Miguel, Rio Mazamorrero, hasta llegar

al rio Cauca, donde tributa después de haber sido fuente de abastecimiento para uso humano y agrícola en su parte alta.

En el municipio de buenos aires específicamente en la vereda la Paila actualmente se encuentra constituido por una cooperativa en esta alberga mineros ancestrales, miembros de los consejos comunitarios y citadinos teniendo un grupo de 334 afiliados .Esta cooperativa Realiza la intermediación para los insumos de la minería (explosivos), los procesos de legalización de los mineros en las diferentes áreas de la región, a partir del acta del 20 de junio de 2017 tanto la cooperativa como los mineros apoyaron el irrestricto al diagnóstico del PORH del rio Teta en el municipio de Buenos Aires, Verada la Paila. En la Figura 3 se presenta el área de estudio donde se desarrolló el proyecto.

Figura 3. Área de estudio

Localización - vereda La Paila y rio La Teta.
Municipio de Buenos Aires



Fuente: https://earth.google.com/web/[36]

3.2. FASE I: Recopilación de información y diagnóstico

3.2.1. Actividad 1. Recopilación de información primaria

En la primera etapa se realizó la recopilación de la información existente en fuentes principales sobre estudios realizados con el uso de humedales y pruebas con especies macrófitas con potencial fitorremediador e información del estado actual de la fuente contaminada que genera el entable esto con el fin de fortalecer los procesos del estudio planteado.

3.2.2. Actividad 2. Diagnóstico

Una vez realizada la evaluación de los entables mineros de la zona, se seleccionó el entable del señor Ferleider Carabalí con título minero No. 19141 del ministerio de minas, vinculado al plan de manejo de la Corporación Regional del Cauca (CRC) de acuerdo con la resolución 0547 de 2010, el cual cumplió con las características requeridas para el desarrollo del estudio.

Por otro lado, se realizó el acondicionamiento de las plantas y según estudios bibliográficos, se determinó que para el entable se requiere aproximadamente de 14 plantas de especie papiro con un tamaño aproximado de 95 cm a 1 m y 14 plantas de junco con un tamaño aproximado de 40 cm a 55 cm. Donde 14 plantas de papiro y junco fueron utilizadas para el estudio de los humedales y las restantes se les realizó un seguimiento de adaptación y crecimiento en el ambiente natural. Las plantas se obtuvieron del vivero “Campo Bello” de la ciudad de Popayán. Este análisis se realizó teniendo en cuenta el trabajo desarrollado de Coral [37], quienes investigaron sobre “Evaluación de la eficiencia de la especie *heliconia psittacorum* en la remoción de mercurio proveniente de los efluentes mineros en un entable de

Suárez Cauca”. En este estudio, se utilizaron 6 plantas las cuales arrojaron resultados positivos para el adecuamiento de estos humedales. Es importante resaltar las dimensiones de las peceras respecto a la biología de las plantas, en

relación a su tamaño y crecimiento. De esta manera se decidió dejar 14 plantas para evitar la saturación del humedal con el fin que se tenga un buen crecimiento.

3.3. FASE II. Diseño e implementación del fitorremediador con las especies macrófitas *Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus*

3.3.1. Actividad 1. Diseño de humedales

Para el diseño e implementación del fitorremediador, se tuvo en cuenta lo establecido en la Guía para el Diseño y Construcción de Humedales Construidos Con Flujos Superficiales emitido por la U.S. EPA. De acuerdo a esta guía para el cálculo de los humedales se usó la siguiente fórmula hidráulica de flujo pistón y la relación largo ancho de 3:1 (Ecuación 1), ya que este diseño se basa en la relación directa del caudal y la concentración de los contaminantes a remover, para este caso en específico mercurio y cianuro [38].

$$A_s = LW = Q\left[\ln\left(\frac{C_0}{C_e}\right)\right] + K_t dn$$

Ecuación 1. Diseño de humedales

Dónde:

A_s= Área superficial

L= Largo del humedal

W= Ancho del humedal

Q= Caudal

C_0= Concentración de mercurio y/o cianuro inicial

C_e= Concentración de mercurio y/o cianuro final

K= Constante de temperatura de las aguas residuales

d= profundidad promedio

n= Porosidad de la estructura del filtro

En el entable se determinó un punto específico para la toma del aforo y la construcción del humedal en donde se realizó una pendiente del 5% y de fácil accesibilidad a un terreno estable evitando que afectara el proceso de estudio con las especies macrófitas (*Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus).*

3.3.2. Actividad 2. Implementación del humedal

Se construyeron tres humedales en el cual cada uno de ellos contenía: para el humedal 1 muestra en blanco, el cual está constituido por grava y agua residual, para el segundo la especie *Scirpus holoschoenus* con grava y agua residual, y un último Humedal con la especie *Cyperus* con grava y agua residual*,* estos humedales se diseñaron de tal forma que se distribuya uniformemente el agua residual, a una altura determinada, cada uno de los humedales contuvo un lecho de soporte compuesto por grava y arena fina de un grosor de 4 cm. Para el primer y segundo humedal se plantaron 7 plantas de las especies *Scirpus holoschoenus*, y *Cyperus papyrus* y para el tercer humedal solo contuvo un lecho filtrante, el cual fue tomado como blanco. Los tres humedales fueron ubicados en los lugares previamente identificados, teniendo una pendiente aproximada del 5% [38].

3.3.3. Acondicionamiento de las plántulas

Para realizar el proceso de acondicionamiento de las plantas se tuvo en cuenta que el agua que vertía fuera 100% agua residual del entable.

Se seleccionaron 14 plantas para el acondicionamiento del humedal en aguas contaminadas, a las cuales se les realizó un seguimiento de absorción, acumulación, metabolización y comportamiento respecto a los contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como son los metales pesados mientras se iba adecuando los humedales.

El proceso tomó un tiempo de aproximadamente 7 días de acondicionamiento y 42 días más de estudio estos análisis se hicieron con base a los estudios de Malmo (*et al.)* y Campoverde, quienes abordaron temas similares uno de ellos en la reserva forestal en Boyacá y el otro un tratamiento secundario de aguas residuales domésticas. Los muestreos se hicieron durante 6 semanas que finalmente fueron llevadas al laboratorio de la CRC, evaluando principalmente los parámetros de pH, DBO5, DQO, mercurio y cianuro [39].

3.3.5. Actividad 4. Funcionamiento y mantenimiento

Para el tema de evaluación del funcionamiento del humedal, se realizó un seguimiento de la operación por un tiempo aproximado de 42 días. [44] En el tema de mantenimiento fue importante realizarlo con un tiempo de retención hidráulico. Igualmente es pertinente describir que el presente trabajo se desarrolló en condiciones reales, es decir que una de las posibilidades que se podían encontrar era la precipitación de lluvias en el humedal, sin embargo, durante el periodo de estudio hubo nula pluviosidad. [38].

3.4. FASE III. Porcentaje y tiempo

Se determinó el porcentaje y el tiempo de remoción de mercurio y cianuro alcanzados por las macrófitas (*Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus)* en los sistemas de Fitorremediación a escala laboratorio previamente acondicionados con las especies y el lecho filtrante. A continuación, en la Ecuación se presenta la fórmula del porcentaje de remoción.

$$E = \frac{S_0 - S}{S_o}\ x\ 100$$ Ecuación 2. Porcentaje de remoción

Donde:

S_0: Carga contaminante de entrada

S: carga contaminante de salida

3.4.1. Actividad 1. Toma muestras

Se tomaron muestras puntuales en la entrada y salida de cada uno de los humedales, siguiendo el protocolo para toma de muestras de aguas residuales del IDEAM. Esto se realizó con el fin de analizar sus características físicas y químicas mediante los procesos propios del análisis de laboratorio.

3.4.2. Actividad 2. Análisis paramétrico

Para realizar el análisis de los parámetros se utilizó el Laboratorio de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), bajo los lineamientos establecidos por los profesionales que manejan estos sitios. En la Tabla 3, se presentan los parámetros a medir.

Parámetros a medir:

- Cianuro
- DBO_5
- DQO
- Mercurio
- pH

En el laboratorio se tomaron las lecturas de las concentraciones de los parámetros del agua. Estas lecturas se realizaron con distintos métodos y las unidades se emitieron con las unidades exigidas por Standard Methods 22t comprendido para el análisis de aguas residuales. Para el DQO se utilizó oxidación con dicromato de potasio, el oxímetro siendo una técnica estándar, para el DBO_5 se utilizó una incubadora por cinco días y para el caso del mercurio Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica por Vapor Frío (ET-AAS) a 253,7 nm, usando vaporización

en un atomizador de dos etapas con un vaporizador purgado, con límites de detección de 0,24 o 0,024 µg /L-1(microgramo /litro) para agua potable a un volumen de muestra de 100 µg [47] y para el cianuro se debe realizar destilación de la muestra previo a la determinación. Si durante la destilación la muestra se concentra hasta 10 veces, se pueden determinar concentraciones desde 0.1 mg/L.

3.4.3. Actividad 3. Tiempo y retención hidráulico

Se tomaron 6 muestras durante un mes y medio, posteriormente al tiempo de adaptación del material vegetal, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulico (TRH) de 6 semanas [6]. Para la porosidad del lecho de soporte se tuvo en cuenta un valor medio de los dos materiales grava fina y arena que se encontraron en un rango de 25% a 50%, por lo que se tomó 35%. En la Ecuación 3, se presenta el tiempo de retención hidráulico.

$$TRH = \frac{LWd}{Q}$$

Ecuación 3. Tiempo y retención hidráulico

Dónde:

L= Largo del humedal

W= Ancho del humedal

Q= Caudal

d= profundidad promedio

Para el análisis de los resultados se tuvo en cuenta lo establecido en la Resolución 0631 de 2015, que tiene como referencia los límites máximos permisibles según lo

descrito en el artículo 10 de la misma norma, donde se miden los parámetros fisicoquímicos y valores permisibles en vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas siendo para este caso actividades de tipo minero, esto con el fin de tener referencia sobre la eficiencia del tratamiento y determinar si cumple con lo establecido en la norma. En la Tabla 4, se presentan los valores de las variables que fueron evaluados.

Tabla 3. Valores permisibles

VALORES PERMISIBLES	
pH	6.00-9.00
DQO	150.00 mg/l O2
DBO5	50.00 mg/l O2
MERCURIO	0.002mg/l
CIANURO	1,0 mg/l

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Atendiendo al objetivo general del proyecto, así como a los objetivos específicos, en este capítulo se muestra lo encontrado en la investigación mediante la aplicación de actividades de campo en la vereda “La Paila” del municipio de Buenos Aires.

4.1. Diseñar e implementar el humedal con especies macrófitas *Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus*.

Para la toma de las muestras del agua residual en los cuatro puntos de muestreo y su posterior análisis, se tuvieron en cuenta algunas observaciones por lo que se adaptó y se obedeció el protocolo del IDEAM, cuyo instructivo especifica el procedimiento para la recolección, conservación y el almacenamiento, de esta

manera se toman las muestras de una manera simple en recipientes plásticos de 1000 mL, los cuales fueron enviados al laboratorio externo de la CRC para el análisis de pH, Mercurio, DBO, DQO Y Cianuro.

El caudal en el vertimiento empleando el método volumétrico realizando aforos manuales, utilizando una probeta volumétrica de 1000 mL y un cronómetro para la medición del tiempo, este procedimiento se repitió 3 veces, finalmente se promediaron los datos para obtener un valor más preciso, una vez promediados los datos se utiliza la siguiente ecuación:

Por otro lado, se determinó

$$Q=\frac{V}{T}$$ Ecuación 4 Caudal

Dónde:

Q: Caudal (m^3/s)

V: Volumen de agua medido (mL)

T: Tiempo (s)

A continuación, se presentan los pasos que se realizaron para el diseño e implementar el humedal con especies macrófitas *Scirpus holoschoenus y Cyperus papyrus*.

4.1.1. Diseño del humedal

De acuerdo a las concentraciones del agua residual del estable minero y variables del caudal, se realizaron los cálculos hidráulicos concernientes para el diseño del humedal apoyándose en la guía de “Diseño y construcción de humedales construidos con flujo superficial” el cual tiene una dependencia directa del caudal y la concentración del contaminante a remover en este caso el mercurio y el cianuro.

Se tomó como base el nivel de concentración obtenido en la caracterización del agua residual del vertimiento después de un proceso de sedimentación con un valor equivalente de 0,299 mgHg/L y como concentración final el nivel establecido por la resolución No. 0631 de vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales.

Los cálculos se obtuvieron aplicando las formulas hidráulicas (Ecuación 3) de flujo pistón y con una relación largo ancho de 3:1; la porosidad del lecho de soporte se tomó estableciendo un valor medio de los dos materiales grava fina que tiene un grosor de 0,5 cm y arena.

Ecuación 5. Área superficial

$$As = L\ x\ W = 0{,}015\ \frac{m^3}{dia}\left[Ln\left(\frac{0{,}299}{0{,}022}\right)\right] + 2\ x\ 0{,}3\ x\ 0{,}35$$

$$As = L\ x\ W = 0{,}285\ m^3$$

$$\frac{L}{W} = \frac{3}{1} = L = 3W$$

$$3\ W\ x\ W = 0{,}285\ m^2$$

$$\sqrt{W^2} = \sqrt{\frac{0{,}285\ m^3}{3}}$$

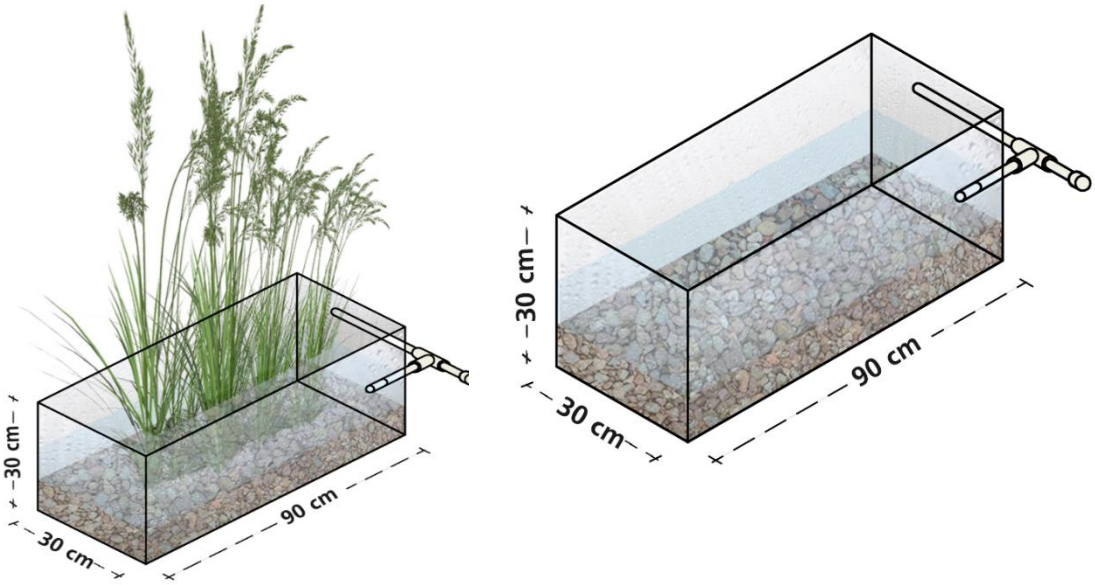
$$W = 0{,}308\ m\ \approx 0{,}30\ m$$

$$L = 3\ x\ 0{,}30\ m = 0{,}90\ m$$

De esta manera, se determina las dimensiones del humedal artificial correspondiente a 30 cm y 90 cm de largo.

En la Figura 5, se presenta el prototipo del humedal artificial con sus medidas correspondientes.

Figura 4. Prototipo humedal



Fuente: Propia

4.1.2. Implementación del humedal

Se utilizaron tres peceras en vidrio para la implementación del humedal (Tabla 6), las cuales midieron 90cm, 30 cm de ancho y 30 cm de altura donde contenían orificios de ½ pulgada por pecera las cuales fueron ubicadas a 7 cm, donde se le inserta a cada una un tubo de PVC de ½ pulgada dejando una altura de 10 cm donde posteriormente se le acondiciona una llave de paso para permitir la salida del agua para su respectivo muestreo.

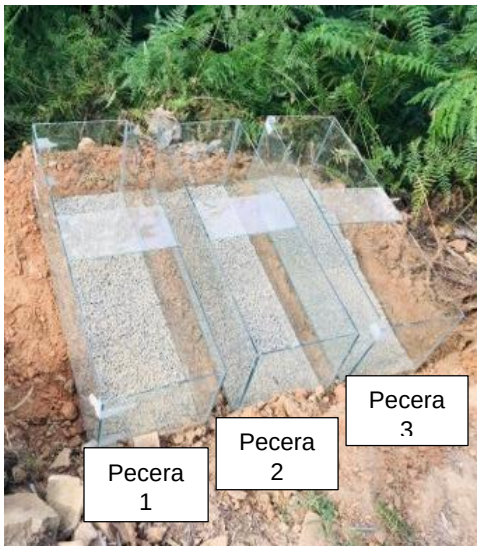
Posteriormente, a las peceras se le coloca un lecho filtrante con grava fina y arena de 0,5 cm en los cuales van distribuidos en la primera pecera grava fina con agua del entable, en el segundo grava fina con la planta junco y en el tercero grava fina con planta papiro plantando 7 plantas por pecera, el junco se encontraba en un rango de crecimiento de 8 cm y el papiro de 20 cm aproximadamente. Finalmente, las peceras fueron ubicadas en la parte de atrás del entable con una pendiente del 5 % teniendo cerca la fuente de descarga del entable, que es un estanque

construido manualmente por los mismos mineros que alberga aproximadamente 1000 litros de agua proveniente del entable, el cual fue interconectado por una tubería de PVC a las peceras para que suministrara las aguas contaminadas para el respectivo estudio.

Figura 5. Ubicación de las peceras.

Fuente: Propia

En la Figura 7, se presenta la ubicación de las peceras con la grava fina.



Fuente: Propia

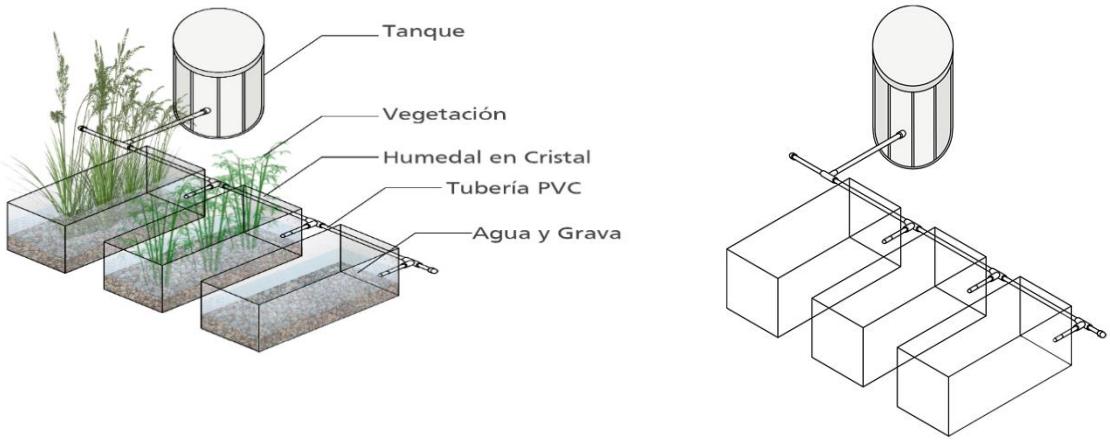
En la Figura 8 se presenta los vertimientos de aguas residuales provenientes del entable de minero donde se realizó el estudio.

Figura 6.Vertimiento de las aguas residuales provenientes del entable minero.

Fuente: Propia

Seguidamente en la Figura 9, presenta el montaje del diseño de humedales con sus respectivas abreviaciones.

Figura 7. Montaje del diseño de los humedales con sus respectivas abreviaciones.



Fuente: Propia

4.1.3. Acondicionamiento de plántulas

Las especies vegetales se escogieron teniendo en cuenta las condiciones climáticas e investigaciones de estas que fueran de fácil adaptación al medio acuático donde se encontraron varias entre ellas la especie *Cyperus Papyrus* (papiro) lo cual tolera temperaturas de 20 a 33°C, y tiene un pH entre 6 - 8,5. Las plantas se acondicionaron y posteriormente se colocaron en el humedal, colocándose en el sitio natural durante 15 días, con el fin de preparar las plantas a los diferentes cambios climáticos llevándole un reporte de su comportamiento , se adicionó agua residual proveniente de la actividad minera, observando nuevamente su comportamiento durante los siguientes días en donde en ese proceso hubo bastantes cambios.

En la Tabla 5 se presenta el crecimiento de las especies *Scirpus holoschoenus, y Cyperus papyrus* en los humedales artificiales.

Tabla 4. Medición del crecimiento de las especies *Scirpus holoschoenus*, y *Cyperus papyrus* en los humedales artificiales.

SEGUIMIENTO CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS						
	INICIO	Muestreo 1(cm)	Muestreo 2 (cm)	Muestreo 3(cm)	Muestreo 4 (cm)	Promedio crecimiento
Planta 1 papiro	145 cm	145,6 cm	146,2 cm	146,7 cm	147,5 cm	146,2 cm
Planta 2 papiro	151 cm	151,4 cm	151,9 cm	152,5 cm	153,1 cm	151,9 cm
Planta 3 papiro	148,8 cm	149,4 cm	149,9 cm	150,6 cm	151,2 cm	149,9 cm
Planta 4 papiro	153,2 cm	153,8 cm	154,3 cm	155 cm	155,4 cm	154,3 cm
Planta 5 papiro	149,5cm	149,9 cm	150,6 cm	151,2 cm	151,8 cm	150,6 cm
Planta 6 papiro	147,2 cm	147,5 cm	147,8 cm	148 cm	148,1 cm	147,7 cm
Planta 7 papiro	130	130,7	131	131,8	132,3	131,2
Planta 1 Junco	44,5	44,9	45,8	46,1	46,8	45,6

Planta 2 junco	43,7 cm	44 cm	44,2 cm	44,6 cm	44,9 cm	44,3 cm
Planta 3 junco	49,1 cm	49,5 cm	49,7 cm	49,9 cm	50,1 cm	49,6 cm
Planta 4 junco	46 cm	46,3 cm	46,5 cm	46,8 cm	47,1 cm	46,5 cm
Planta 5 junco	39,5 cm	39,9 cm	40,4 cm	40,7 cm	40,9 cm	40,2 cm
Planta 6 junco	52,5cm	52,7 cm	52,9 cm	53 cm	53.1 cm	52,8 cm
Planta 7 junco	58,7 cm	59,8 cm	60,2 cm	61,3 cm	62,1 cm	60,4 cm

Fuente: Elaboración propia

Durante el periodo de la investigación, se monitoreo el crecimiento de las plantas, este consistió en mediciones desde los rizomas hasta el pétalo más alto de las mismas, desde el momento en que fueron sembradas y en cada uno de los muestreos. Con el fin de verificar el crecimiento de cada planta, obtuvieron un aspecto positivo en todo el proceso en el cual según los datos tomados tuvieron un crecimiento de 0,4cm a 2 cm respecto con la tomada inicialmente en ese proceso no se notó ninguna en mal estado o en condiciones de marchitamiento o que los vientos las hubieran dañado por su altura, se observó que las plantas tuvieron buena adaptación con el agua residual minera por lo que generalmente y según investigaciones se puede decir que tienen crecimiento adecuado

4.1.4. Funcionamiento y mantenimiento

El adecuamiento de las peceras dura aproximadamente 15 días de acondicionamiento y 42 días más de estudio; los muestreos se realizaron cada semana debido a que había poca disponibilidad por parte del laboratorio de la CRC, para el adecuamiento de las peceras. La investigación se desarrolló teniendo en cuenta las condiciones generales de operación, el mantenimiento del sistema y las diferentes etapas de experimentación.

El presente trabajo se realizó en el entable del señor FERLEIDER CARABALI con título minero No 19141 del ministerio de mineras plan de manejo de CRC con la resolución 0547 de 2010, donde se llevó a cabo el acondicionamiento de los humedales estos fueron ubicadas en la parte posterior del entable con fácil accesibilidad expuestos a temperatura ambiente, humedad relativa y vientos. ayudaba e impedía el ingreso de personas que alteraran las muestras o de animales que dañaran el sistema, todo esto se hizo con el fin de llevar un buen proceso adecuado para el muestreo.

En las Figuras a, b, c, d se presenta el montaje de los humedales con las pantas, el agua del entable, grava y su tubería de PVC.

Figura 8. Montaje de los humedales con las plantas, agua del entable, grava y su tubería de PVC.

Fuente: Propia

Figura 9. Recolección de las muestras en recipientes plásticos de 1000 mL de capacidad.

a) Adecuamiento de las peceras con las plantas

b) Muestreo para humedal

c) Fuente de descarga del entable minero

d) Entable minero donde se realizó el trabajo

4.2. Concentración del mercurio (Hg) y cianuro CN- presentes en el agua residual producida por el entable minero.

Una vez realizado el diseño definitivo de los humedales artificiales de flujo superficiales plantados con especies micrófitos *(Scirpus holoschoenus y Cyperus papyrus)*, se realiza un análisis de la concentración de Hg y CN-,pH, DBO_5, DQO y concentración de remoción de Hg y CN-, presentados en el agua residual proveniente del entable minero de muestra del señor Ferleider Carabalí con título minero No 19141 del ministerio de minas y de esta manera realizar una comparación con la legislación colombiana (Resolución 0621 de 2015) vigente que hace referencia a los vertimientos.

Para el análisis de la concentración de remoción de Hg y CN-, pH, DBO_5 y DQO se tomaron como referencia cuatro estanques y en cada uno de ellos se tomaron 4 muestras de agua residual (Tabla 6).

Tabla 5. Información estanques

ESTANQUES	EXPERIENCIA
Estanque 1	Muestra en blanco
Estanque 2	Muestra papiro
Estanque 3	Muestra Junco
Estanque 4	Muestra fuente de descarga del entable

Fuente: Elaboración propia

4.2.1. Concentración de Hg y CN-

El mercurio es un metal pesado altamente toxico debido a su reactividad con sus átomos presentes en los aminoácidos y las proteínas, contrario a los contaminantes de origen orgánico estos metales pesados no pueden ser degradados químicamente u orgánicamente por lo que una de las alternativas para la remoción de aguas contaminadas con estos iones metálicos es la Fitoextracción, esta consiste en la absorción y acumulación de metales pesados en la parte área de plantas hiperacumuladoras como lo son las especies macrófitas *Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus.* En la Tabla 7, se presenta la concentración de mercurio en el agua residual de los estanques artificiales tomada durante las 6 semanas.

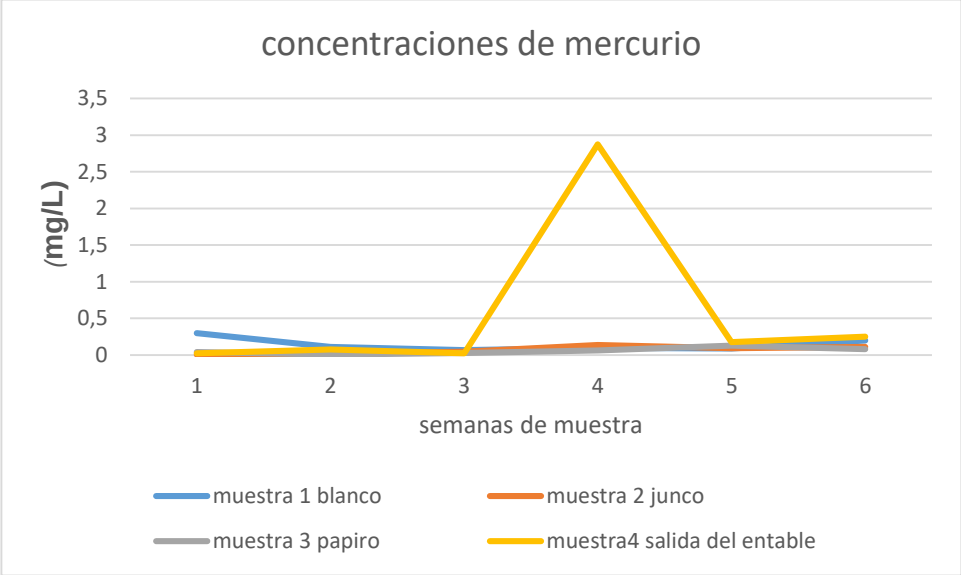
Tabla 6. Concentración de Mercurio

Muestra 1 Blanco mg/L	Muestra 2 junco mg/L	Muestra 3 papiro mg/L	Muestra4 salida del entable mg/L	Frecuencia de muestreo
0,299	0,00875	0,0423	0,026	Semana 1
0,111	0,018	0,0067	0,0775	Semana2
0,07	0,0475	0,0293	0,0262	Semana3
0,1	0,139	0,065	2,875	Semana4
0,0902	0,0933	0,13	0,177	Semana 5
0,198	0,111	0,0823	0,251	Semana 6

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 1, se detalla las variaciones de las concentraciones de mercurio en los cuatro estanques artificiales.

Gráfica 1. Concentración de Mercurio Hg.



Fuente: Elaboración propia

El mercurio como metal toxico es necesario para la actividad minera ya que se usa para separar y extraer el oro de las rocas o piedras en las que se encuentra, este se adhiere al oro, formando una amalgama que facilita su separación de la roca, arena u otro material. Se observa que las concentraciones de este metal generadas por la planta de beneficio se encuentran entre 0,1 mg/L a 2,875 mg/L, lo que indica que no cumple con la normatividad para vertimientos de Colombia, siendo su valor máximo permisible de 0,002 mg/L para un vertimiento de agua residual de actividad minera. Es importante mencionar, que comparado con otros estudios de investigación desarrollado por las autoras Domínguez y Gómez [15] quienes trabajaron el proceso de fitorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de la industria minera utilizando el buchón de agua (*Eichhornia crassipes), en* un humedal de flujo superficial y con una efluente real contaminado con mercurio los resultados obtenidos son semejantes, este es el caso reportado

por Domínguez que después de hacer un seguimiento y de muestreo en 7 meses encontraron concentraciones iniciales de mercurio de 0.325 mg/L y para el caso de nosotros de 0,299mg/L, estas se generaban en efluentes mineras con concentraciones superiores al máximo permisible que es de 0,02 mg/L, después de realizar el tratamiento de fitorremediación con la especie *Eichhornia crassipes* por lo que afirmaron, una remoción del 71% del mercurio presente en el agua residual que es un valor semejante al obtenido en el presente proyecto trabajado, con Junco un valor de 62,88% y para la muestra con Papiro alcanza el 72,47 mg/L. No obstante, los resultados de estos dos trabajos muestran claramente la alta eficiencia de remoción de estas macrofitas acuáticas, por esta razón es pertinente afirmar que el buchón de agua, el Papiro y el Junco es recomendable en la remoción de mercurio, en la etapa inicial de remediación de un cuerpo de agua.

Finalmente se concluye que en las concentraciones de mercurio provenientes del entable minero presentan en algunos casos fuertes variaciones en el contenido de mercurio , en ocasiones para el presente estudio alcanza los 3 mg/L ya que el valor máximo encontrado es de 2,875mg/l , en otras se observan valores de casi cero, esto se debe a que la operación minera no es constante presentando fuertes picos de utilización de mercurio y fuertes descensos, lo que indica que la actividad minera no sigue patrones de consumo de mercurio constantes y la utilización de este material, se hace muy puntualmente. Por lo que determinan esta fuerte variación siendo la única manera en que se controlaría un poco mejor la entrada de mercurio a los estanques de depuración mediante un colector al cual lleguen las aguas de poca o mucha actividad.

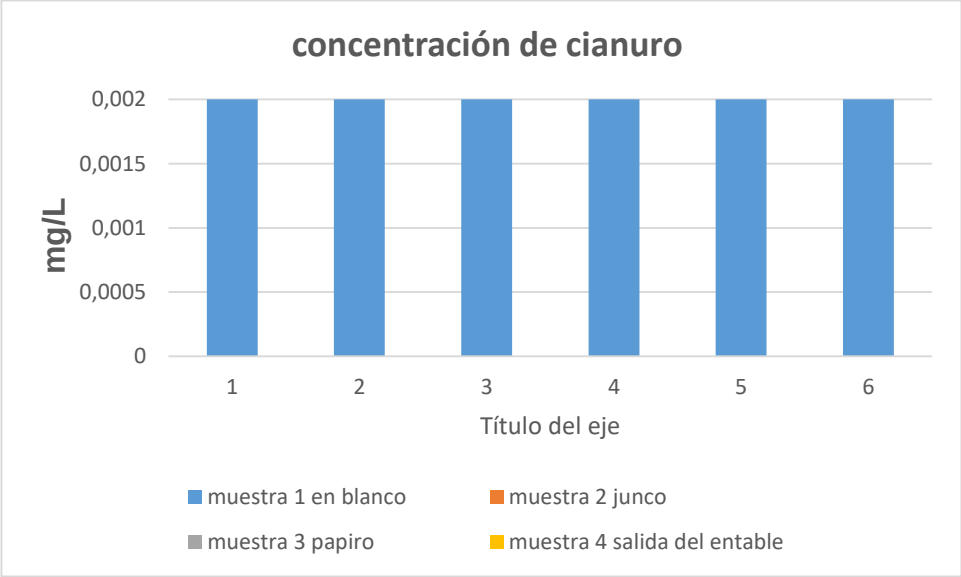
Es difícil controlar un proceso aun con la utilización de los removedores eficientes si las entradas a los estanques presentan estas variaciones tan marcadas, lo ideal sería tratar de controlar una entrada estable a los removedores donde no se presenten estas variaciones tan fuertes.

Tabla 7. Concentración de Cianuro

Muestra 1 en Blanco mg/L	Muestra 2 junco mg/L	Muestra 3 papiro mg/L	Muestra 4 salida del entable mg/L	Frecuencia de muestreo
0,002	0,002	0,002	0,002	Semana 1
0,002	0,002	0,002	0,002	Semana 2
0,002	0,002	0,002	0,002	Semana 3
0,002	0,002	0,002	0,00	Semana 4
0,002	0,002	0,002	0,002	Semana 5
0,002	0,002	0,002	0,002	Semana 6

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2. Concentraciones de cianuro



Fuente: Elaboración propia

Con respecto al cianuro, el resultado obtenido en este estudio fue el siguiente 0,002 mg/L siendo el porcentaje encontrado en los humedales a lo largo del proceso de fitorremediación. Respecto a la concentración de cianuro no se encontró suficiente información ya que los datos presentados estuvieron muy por debajo de los limites

admisibles del límite analizado por lo que posiblemente el uso de este químico ha disminuido sustancialmente según información de los operarios de la planta se está utilizando muy poco este material.

Es importante mencionar a partir de una revisión bibliográfica, para entables mineros que trabajan con grandes cantidades de cianuro se han hecho estudios de fitorremediación con varios tipos de plantas unas de ellas son (*Eichhornia Crassipes, Pistia Stratiotes Salvinia Auriculata*). Esta investigación la realizaron los autores Jaramillo y Buitrago quienes formularon un análisis “sobre el manejo de macrofitas acuáticas en la acumulación y trasformación de cianuro producto del beneficio del oro en la mina la Coqueta”. El objetivo de ellos fue buscar la disminución de la contaminación por cianuro de las aguas residuales del lavado de arena. Ellos utilizaron macrofitas acuáticas flotantes (*Eichhornia Crassipes, Pistia Stratiotes Salvinia Auriculata*). finalmente concluyeron que obtuvieron una remoción de cianuro del 86% al final del tratamiento lo que demostró que dichas plantas tuvieron muy buena eficiencia removiendo compuestos tóxicos del agua cianurada. Así mismo se considera importante que este tratamiento es ambientalmente seguro y económicamente viable.

4.2.2. Concentraciones de pH

El pH se mide a través de una escala que va de 0 a 14 siendo 7 un pH neutral lo que significa que por debajo de 7 el agua se considera acida, mientras que por encima se considera alcalina. Es una de las variables más importantes que se pueden controlar durante un proceso especialmente si se tiene peces o plantas. En la Tabla 9, se presentan las concentraciones de pH en los cuatro estanques artificiales.

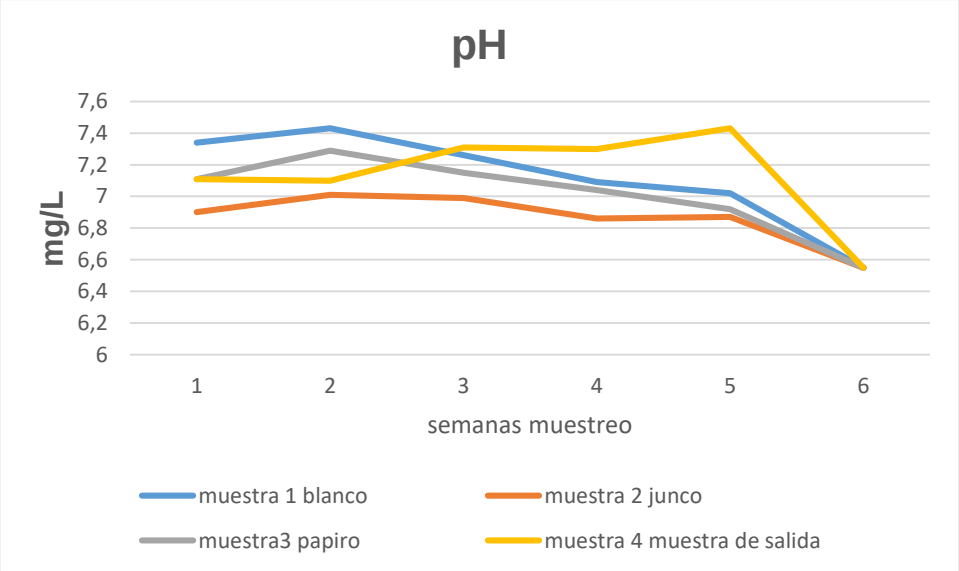
Tabla 8. Concentración de pH

Estanque 1 muestra en blanco (mg/L)	Estanque 2 Muestra junco (mg/L)	Estanque 3 Muestra papiro (mg/L)	Estanque 4 Salida del entable (mg/L)	Frecuencia de muestreo
7,34	6,9	7,11	7,11	semana1
7,43	7,01	7,29	7,1	semana 2
7,26	6,99	7,15	7,31	semana 3
7,09	6,86	7,04	7,3	semana 4
7,02	6,87	6,92	7,43	semana 5
6,55	6,55	6,55	6,55	semana 6

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 3, se detalla las variaciones de las concentraciones de pH en los cuatro estanques artificiales.

Gráfica 3. Concentración de pH



Fuente: Elaboración propia

La anterior grafica indica que el pH tiene una tendencia a la neutralidad ya que se encuentra dentro de los valores 6,9 a 7,43, siendo un valor normal para aguas superficiales por que se encuentra en un intervalo de 6,0-9,0 de pH que son utilizadas para el proceso de minería artesanal según la resolución 631 de 2015 en calidad de los parámetros de vertimientos. Cabe resaltar que de acuerdo con la actividad que se realiza en el entable minero no hay descomposición orgánica que podría ser una fuente de acidificación y que tampoco se usan otros materiales que puedan aumentar el pH debido a esto los materiales utilizados como sales o el propio mercurio no producen alteración sustancial en el nivel de pH.
Según Mancilla [41], en su estudio “Metales pesados totales y arsénico en el agua para riesgo de Puebla y Veracruz, México” el pH de la solución tiene un efecto sobre la disponibilidad de la mayoría de los metales pesados al afectar el equilibrio entre la especiación metálica, solubilidad, adsorción e intercambio de iones en el suelo. Al aumentar el pH los metales son removidos de la solución del suelo y adsorbidos por los coloides disminuyendo su biodisponibilidad.

4.2.3. Concentración de DBO_5

La DBO_5 es uno de los parámetros que mide la cantidad de oxigeno consumido al degradar la materia orgánica presente en una muestra liquida por métodos biológicos. En la Tabla 10, se presenta la concentración de DBO_5 en el agua residual de los estanques artificiales.

Tabla 9. Concentración de DBO_5

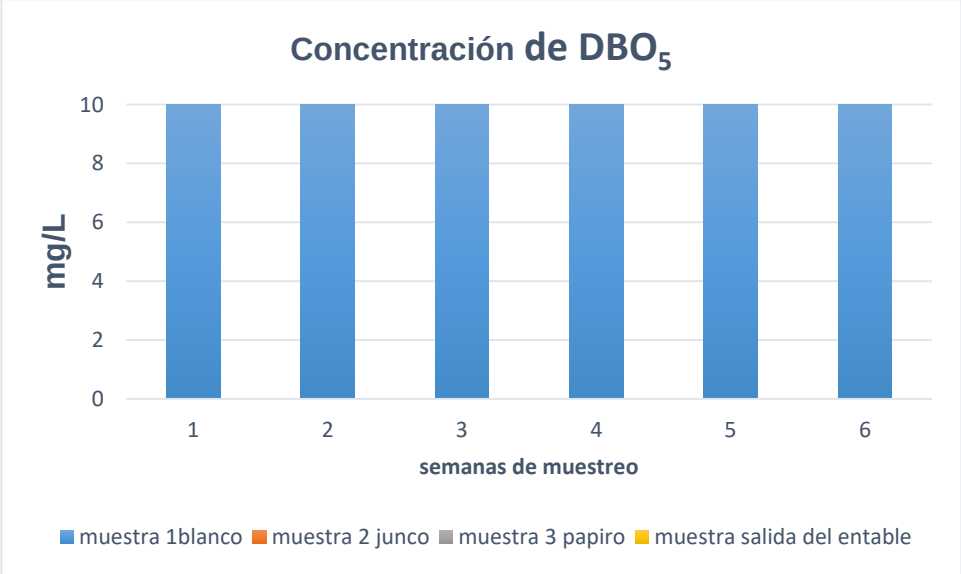
Muestra 1 en Blanco (mg/L)	Muestra 2 Papiro (mg/L)	Muestra 3 Junco (mg/L)	Muestra 4 Salida del entable Mg/L	Frecuencia De muestreo
10	10	10	10	Semana 1
10	10	10	10	Semana 2

10	10	10	10	Semana 3
10	10	10	10	Semana 4
10	10	10	10	Semana 5
10	10	10	10	Semana 6

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 4, se detalla las variaciones de las concentraciones de DBO_5 en los cuatro estanques artificiales.

Gráfica 4. Concentración de DBO_5



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 4, se observa que los valores de DBO_5 se encuentran muy por debajo del límite permitido (150mg/l) que es el valor máximo establecido por la resolución 631 de 2015 para aguas residuales. Este parámetro es una medida del componente orgánico que puede ser degradado mediante procesos biológicos, por lo tanto, la cantidad de materia orgánica no es significativa dentro de la muestra.

Lo que indica Lecca [42], en su investigación “Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno” infiriendo que la materia orgánica requiere oxígeno para ser degradada en un curso de agua en condiciones normales de laboratorio, la DBO_5 se determina a una temperatura de 20 grados centígrados en un tiempo de cinco días.

4.2.4. Concentraciones de DQO

La DQO es la demanda de oxígeno para oxidar toda la materia orgánica susceptible de ser oxidada y puede incrementarse con la presencia de sustancias inorgánicas tales como como sulfuros, sulfitos, yoduros, etc. que incrementan la medida de este parámetro. En la Tabla 11, se presenta la concentración de DQO en el agua residual de los estanques artificiales.

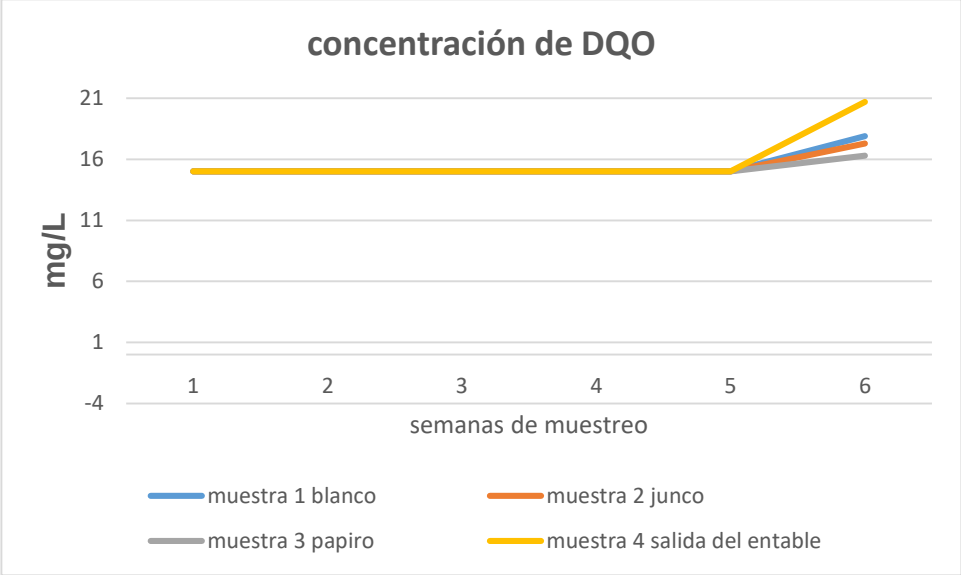
Tabla 10. Concentración de DQO

muestra 1 Blanco (mg/L)	muestra 2 junco mg/L	muestra 3 papiro mg/L	muestra 4 salida del entable mg/L	Frecuencia de muestreo
15	15	15	15	Semana 1
15	15	15	15	Semana 2
15	15	15	15	Semana 3
15	15	15	15	Semana 4
15	15	15	15	Semana 5
17,9	17,3	16,3	20,7	Semana 6

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 5, se presentan las concentraciones de DQO en los cuatro estanques artificiales.

Gráfica 5. Concentración de DQO



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que la DQO es un parámetro que mide la cantidad de sustancia orgánicas (disueltas o en suspensión) susceptibles a ser oxidadas por un oxidante químico fuerte. Este parámetro proporciona una medida de oxígeno equivalente al contenido de materia orgánica de una muestra que puede ser oxidada. Esta es usada para medir contaminantes en aguas residuales y aguas naturales. La medida varía en función de las características

de la materia orgánica presente, debido al proceso que se está llevando a cabo era de esperarse valores altos en cada una de las muestras de este parámetro medido, pero al realizar los muestreos los resultados reflejados en la gráfica 5 muestran que todos los valores están por debajo de los límites permisibles establecidos en la resolución 631 de 2015, equivalente a 150 mg/L. Lo que quiere decir que se está cumpliendo con el vertimiento, por tal motivo al ser valores muy bajos los humedales no presentan ninguna remoción por esta razón los resultados encontrados obedecen a los procesos químicos normales de un cuerpo de agua.

En el último muestreo hay una tendencia al alza, pero es muy baja esto podría ser que debido al día del muestreo hubo mayor cantidad de material para procesar.

Para la DQO en el proceso se obtuvo muestras con las siguientes cifras: 15 mg/l para las primeras 5 muestras y para la 6 con unos valores de 17,3 mg/L y 16,3 mg/L en los humedales con vegetación y 15 mg/L para las 5 primeras muestras y 17,9mg/L para la 6 sin vegetación, pero comparado con otros estudios para Domínguez [15] los valores medios de parámetros la DQO, a lo largo del proceso indico que la eficiencia del desarrollo de fitorremediación dio un valor de 43mg/L y 38.5 mg/L cumpliendo con la normatividad colombiana. De igual manera el oxígeno disuelto a lo largo de los 7 meses se incrementó en cada periodo de tratamiento con respecto al anterior lo que indica una disminución de impacto ambiental causado por la contaminación.

4.2.5. Porcentaje de remoción de mercurio

Para estimar el porcentaje de remoción de las especies macrófitas (*Scirpus holoschoenus* y *Cyperus papyrus),* se utilizó la Ecuación 5, donde se toma como carga contaminante inicial, la concentración de mercurio y cianuro presente en el tanque de distribución y para determinar la carga final se realizó la diferencia entre los valores del afluente de la pecera que contenía lecho de soporte humedal 1 y los afluentes de las peceras con lecho de soporto y vegetación humedal 2 y 3 , tomando en cuenta el valor restante para así realizar el cálculo matemático de cada una de ellas, con el fin de cuantificar únicamente el mercurio y el cianuro que se presume está siendo retenido por las plantas.

Ecuación 1. Porcentaje de remoción

S_0: Carga contaminante de entrada

S: carga contaminante de salida

$$E_{P1} = \frac{0{,}299 - 0{,}198}{0{,}229}\ x\ 100 = 33.78\%$$

$$E_{P2} = \frac{0{,}229 - 0{,}111}{0{,}229}\ x\ 100 = 62.88\%$$

$$E_{P3} = \frac{0{,}229 - 0{,}0823}{0{,}229}\ x\ 100 = 72.47\%$$

En la Tabla 12, se presenta las concentraciones iniciales y finales del porcentaje de remoción, se toma la decisión de tomar tres muestras con el fin de tener más exactitud de los datos. Para la determinación de los porcentajes de remoción se consideraron niveles de mercurio en el agua residual; donde se observa que se inicia con una concentración inicial de 0,299 mg/l siendo esta la muestra inicial para todas y una variación para cada una de ellas para la concentración final.

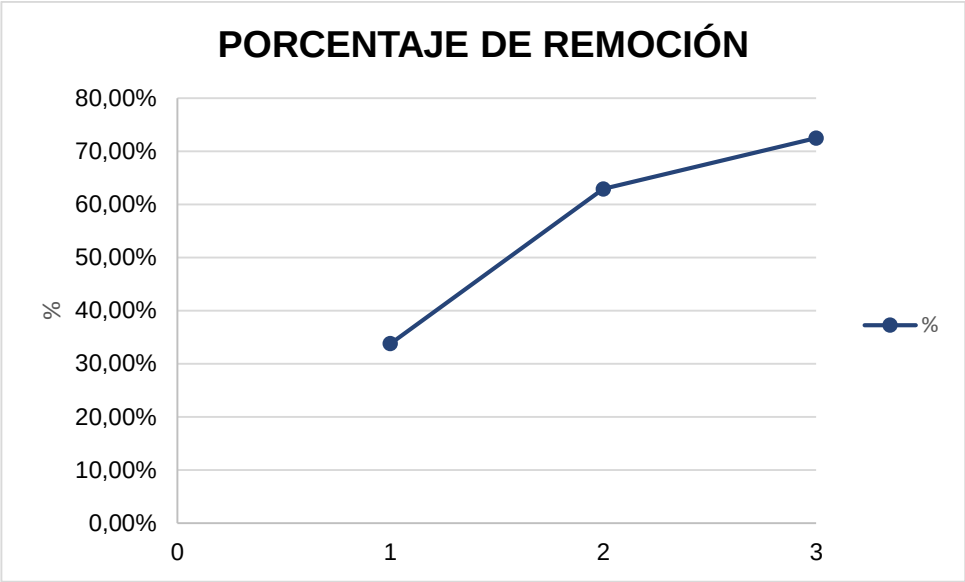
Tabla 11. Concentraciones del porcentaje de remoción

	Concentración inicial de mercurio	**Concentración final de mercurio**	**%**
Estanque 1 blanco	0,299mg/l	0,198mg/l	33,78%
Estanque 2 junco		0,111mg/l	62,88%
Estanque 3 papiro		0,0823mg/l	72,47%

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 6, se detalla el porcentaje final de la remoción de mercurio y cianuro por las especies macrófitas *Scirpus holoschoenus y Cyperus papyrus.*

Gráfica 6. Concentraciones iniciales y finales del porcentaje de remoción



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Gráfica 6 y la Tabla 11, se observa que el porcentaje de remoción de mercurio para el humedal artificial de flujo superficial plantado con las especies presenta los siguientes valores:

Para el humedal 1 se logró una remoción del 33,78%, para el 2 una remoción del 62,88% y para el 3 una remoción del 72,47%, con esto se concluye que la mayor remoción se obtuvo en el humedal 3, el cual contenía especies macrófitas *Scirpus Holoschoenus* y seguido muy de cerca por el estanque 2 que contenía *Cyperus Papyrus* y por último el humedal que contenía gravilla y agua residual siendo tomado como muestra en blanco.

Con base a lo anterior se deduce que las especies utilizadas de *Scirpus Holoschoenus* y *Cyperus Papyrus* son bastantes eficientes comparados con la muestra en blanco que contenía grava, el cual es importante afirmar que este realizo una gran parte de la remoción. Esto implica que las especies utilizadas mejoran sustancialmente la labor de depuración de las aguas residuales en cuanto a mercurio. Esto lo corrobora Hoyos [43], en su estudio denominado “Fitorremediación de metales pesados presentes en el suelo de la ladera del río Bogotá”, donde

concluye que el proceso de Fitorremediación tanto con *Salix Humboldtiana* (Sauce) y en especial la *Cyperus Papyrus* (papiro) logra una reducción rápida de la concentración de metales presentes en el suelo.

Para el caso de *Cyperus Papyrus* (tercer estanque) las etapas se tornan similares a la presentada en el segundo estanque siendo suficientes en ambos casos, a lo que se supone una eficiencia de remoción igual a las observadas para cada etapa. Según Domínguez y Gómez en su trabajo de Fitorremediación de Mercurio en la Industria Minera para la remoción de mercurio con la planta buchón de agua concluyo que fue difícil obtener un agua residual que cumplieran los límites permisibles de la normatividad colombiana ,no obstante se obtuvo un efluente con niveles inferiores en la mayoría de los parámetros obtenidos con respecto a los valores en la caracterización del agua residual proveniente de la minería artesanal .de lo anterior los autores afirman que a pesar de no obtener al 100% la descontaminación si se logró disminución considerable tanto como para este caso como para el presente estudio con Papiro y Junco en relación a otros estudios y otros trabajos desarrollados.

Para llevar a cabo un análisis más acertado en cuanto a la remoción que realiza las plantas se tomaron las fórmulas que se describen a continuación teniendo en cuenta el porcentaje de remoción del mercurio en donde la primera de ellas es la referencia de muestra en blanco esta contiene gravilla y agua residual, en la segunda gravilla agua residual, junco y por ultimo gravilla agua residual y papiro.

Estas fórmulas se toman de la concentración final del mercurio de cada una de las platas menos la concentración de la muestra en blanco sobre la muestra de concentración inicial del mercurio en donde este proceso se realiza para dar el valor al proceso de fitorremediación de las plantas dando los siguientes valores:

$\frac{|0,111-0,198|}{0,299}\ x\ 100$=29%

$\frac{|0,0823-0,082|}{0,299}\ x\ 100$=38%

4.3. Porcentaje de remoción de mercurio, cianuro y el tiempo de retención hidráulico a través del fitorremediador.

El tiempo de retención hidráulico se calculó con la Ecuación 5

$$TRH = \frac{L\ x\ W\ x\ d}{Q}$$ Ecuación 2. Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

L: Largo

W: Ancho

d: Profundidad

Q: Caudal

$$TRH = \frac{0,3m\ x\ 0,9m\ x\ 0,3m}{0,022\ \frac{m^3}{dia}} = 3,68\ dias\ \approx 4\ dias$$

De acuerdo a los resultados obtenidos y estudios realizados, se presume que las plantas *Scirpus Holoschoenus Y Cyperus Papyrus* remueve altos niveles del metal pesado, permitiendo así una disminución de los iones de mercurio presentes en el agua residual minera proveniente del beneficio de materiales. Se considera que el TRH más adecuado para la remoción de mercurio en el humedal, humedal 3 con TRH de 4 días, representa un porcentaje de remoción mayor al del humedal 2 con un TRH de 2 días, lo que significa que a mayor TRH, mayor absorción de nutrientes y por ende más remoción del metal pesado, indicando que, a mayor tiempo de exposición, mayor remoción de mercurio.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Los problemas de contaminación por el uso del mercurio y cianuro en la industria minera, ha causado que muchas fuentes hídricas terminen afectadas, en este sentido, la flora y la fauna que circunda las zonas mineras y sus afluentes reciben este impacto ambiental, el cual afecta igualmente a las comunidades que trabajan en la industria al manipular estas sustancias, así como también por el consumo del agua y de alimentos que terminan contaminándose.

En respuesta a lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de plantas fitorremediadoras en los humedales artificiales de flujo subsuperficial, en el cual reaccionaron bien en cuanto a las condiciones ambientales, el sustrato y a la exposición al agua residual proveniente del entable minero , sin presentar muerte, e inflorescencias, y además, continuar con su crecimiento natural, por lo tanto, se puede decir que la aplicabilidad para tratamiento biológico mediante humedales artificiales aumenta si se utiliza bajo las mismas condiciones.

La implementación de humedales artificiales con *Scirpus Holoschoenus Y Cyperus Papyrus son* viables para la depuración de aguas residuales producto de la industria minera, teniendo costos bajos en cuanto a instalación, consumo de energía, suministro, operación y mantenimiento, además de no requerir un control permanente.

A través de este procedimiento, se pudo determinar que, las concentraciones de mercurio provenientes del entable minero, presentaron, en algunos casos fuertes variaciones en el contenido de este metal pesado; en momentos para el presente estudio, alcanza los 3 mg/L, y el valor máximo encontrado es de 2,875mg/l , en otras, se observan valores de casi cero, esto se debe a que la operación minera no es constante, presentando fuertes picos de utilización de mercurio y fuertes

descensos, lo que indica que la actividad minera no sigue patrones de consumo de mercurio constantes y la utilización de este material, se hace muy puntualmente.

Los resultados con base a la remoción de mercurio y cianuro durante el procedimiento, fueron los siguientes: para el mercurio: el estanque 1 se logró una remoción del 33,78%, para el estanque 2 una remoción del 62,88% y para el estanque 3 una remoción del 72,47%. De esta forma se pudo determinar, que la mayor remoción se obtuvo en el estanque 3 el cual contenía especies macrófitas *Scirpus Holoschoenus*, seguido muy de cerca por el estanque 2 que, contenía Cyperus Papyrusy, por último, el humedal que contenía gravilla y agua residual siendo tomado como agua en blanco, para llevar a cabo un análisis más acertado en cuanto a la remoción, el proceso de fitorremediación de las plantas da los siguientes valores, 29% para el estanque 2 y 38% para el estanque 3. Así, se deduce que las especies utilizadas de *Scirpus Holoschoenus y Cyperus Papyrus* son bastantes eficientes comparados con la muestra en blanco, de lo cual es importante afirmar, que este realizó una gran parte de la remoción.

Para el caso del Cianuro, el resultado obtenido, fue el siguiente 0,002 mg/L siendo el porcentaje encontrado en los humedales a lo largo del proceso de fitorremediación. Respecto a la concentración de cianuro, no se halló suficiente información, ya que los datos presentados estuvieron muy por debajo de los limites admisibles del límite analizado, por lo que posiblemente el uso de este químico ha disminuido sustancialmente según información de los operarios de la planta se está utilizando muy poco este material.

Los resultados en el pH, se pudo analizar una tendencia a la neutralidad, ya que se encuentra dentro de los valores 6,9 a 7,43, siendo un valor normal para aguas superficiales por que se encuentra en un intervalo de 6,0-9,0 de pH que son utilizadas para el proceso de minería artesanal. Es importante aclarar, que de acuerdo con la actividad que se realiza en el entable minero, no hay descomposición orgánica que podría ser una fuente de acidificación y, que tampoco se usan otros

materiales que puedan aumentar el pH debido a esto los materiales utilizados como sales o el propio mercurio no producen alteración sustancial en el nivel de pH.

Con respecto a los análisis de DQO, presentados estos indican que no hay una contaminación significativa de materia orgánica disuelta y, además no existe un gran nivel contaminación por metales pesados, por ende, los valores de DQO se encuentran por debajo del funcionamiento del sistema, en el ARC. Los resultados fueron los siguientes: 15 mg/l para las primeras 5 muestras y para la 6 con unos valores de 17,3 mg/L y 16,3 mg/L en los humedales con vegetación y 15 mg/L para las 5 primeras muestras y 17,9mg/L para la 6 sin vegetación, lo cual se ve reflejado en el oxígeno disuelto que aumenta notablemente

Para terminar, es importante aclarar que esta investigación, se realizó a partir de una muestra tomada aguas arriba del Rio Teta, la cual dio como resultado que este afluente no iba contaminado, sin embargo, se determinó que al llegar cerca de los entables mineros y al hacer estos las descargas de material al rio, generaba una contaminación de las aguas. Por este hecho, se propuso desarrollar este estudio, con el fin de ayudar en la descontaminación de sus aguas, y de los riesgos que tienen para el medio ambiente y la comunidad que lo circunda.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de humedales artificiales para un tratamiento biológico de las aguas residuales con actividades mineras que ayude a minimizar y a mitigar los impactos generados por los residuos.
- Se deben hacer estudios que correlacionen la edad de los fitorremediadores con la eficiencia de remoción y el tiempo de vida media que se pueden utilizar estos procesos.
- Tener en cuenta los resultados obtenidos en el proyecto y continuar profundizando en este tipo estudios, ya que puede ser útil y una alternativa para la remoción de metales pesados en otras actividades mineras siendo una alternativa económica y para la realización de otros proyectos.
- Se recomienda realizar talleres y charlas a todos los mineros , para que concienticen y desarrollen en todas estas alternativas para el buen manejo de los metales pesados y así mismo para ayudar con la disminución de todos los impactos que se generan por la actividad minera evitándoles enfermedades a un corto y largo plazo por las actividades que son el beneficio de oro, ya que en las áreas urbanas y rurales del municipio de buenos aires siendo estas aguas residuales vertidas directamente a las fuentes hídricas como lo es el rio Teta.
- Implementar estrategias educativas sobre la toxicidad del mercurio en la salud humana y medios acuáticos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Á. M. L. R. Latorre and M. H. T. Tovar, “Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá,” *Saúde em Debate*, vol. 41, no. 112, pp. 77–91, 2017, doi: 10.1590/0103-1104201711207.

[2] J. A. Lara Borrero, “Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiale,” no. January 1999, p. 122, 1999.

[3] S. Friess and H. Brotz, “La Minería en los Países en Desarrollo - Desafíos y Propuestas de Acción.,” p. 42, 2011.

[4] H. Rosas Rodríguez, “Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat,” 2001.

[5] Corresponsal, “Minería artesanal y de pequeña escala (MAPE), infra-mundo laboralSearch @ Www.Google.Com.Co.” 2017.

[6] L. GÜIZA, “LA PEQUEÑA MINERÍA EN COLOMBIA: UNA ACTIVIDAD NO TAN PEQUEÑA45320 @ revistas.unal.edu.co.” 2013.

[7] A. Orozco *et al.*, “ANALISIS Y EVALUACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA SOCIOAMBIENTAL OCASIONADA POR EL USO DEL MERCURIO EN LA MINERIA AURIFERA ARTESANAL EN COLOMBIA,” *J. Teknol.*, vol. 1, no. 1, pp. 69–73, 2013, doi: 10.11113/jt.v56.60.

[8] F. H. Pantoja Timarán and S. D. Pantoja Barrios, “Problemas y desafíos de la minería de oro artesanal y en pequeña escala en Colombia,” *Rev. Fac. Ciencias Económicas*, vol. 24, no. 2, pp. 147–160, 2016, doi: 10.18359/rfce.2217.

[9] J. R. V.-I. and O. A.-S. Angélica Evelin Delgadillo-López*, César Abelardo González-Ramírez, Francisco Prieto-García, “Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación99a09d14037a8e58285af495a87f9a51d69dc7f6 @ www.uaeh.edu.mx.” 2011.

[10] C. de Colombia, “Ley 1658 / 15 de Julio de 2013. Disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del pais, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y otras disposiciones.,” *Repub. Colomb. - Gob. Nac.*, pp. 1–9, 2013.

[11] D. E. L. Oro, E. N. La, and M. La, “Transformación De Cianuro Producto Del Beneficio Management of Aquatic Macrophyte in Accumulation and Transformation of Cyanide,” vol. 20, no. 1, pp. 63–77, 2016, doi:

10.17151/bccm.2016.20.1.6.

[12] V. Katherine and C. Trujillo, “Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Mercurio Producto de la Minería Aurífera (artesanal y pequeña escala),” *Univ. Nac. Abierta y a Distancia – UNAD*, pp. 1–106, 2016.

[13] NUNGARAY ARTEAGA NANCY ERIBEL, “Fitorremediación del suelo de la mina La Blanca, Hidalgo, con plantas de la especie Cosmos bipinnatus y el género Dahlia.,” p. 165, 2014.

[14] I. Hernández Valencia, G. Navas, and C. Infante, “Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con megathyrsus maximus,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 33, no. 3, pp. 497–503, 2017, doi: 10.20937/RICA.2017.33.03.12.

[15] M. C. Domínguez, S. G. S., and A. N. A. A, “Fitorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de la industria minera,” *UGCiencia*, vol. 22, no. 1, pp. 227–237, 2016.

[16] H. P.-P. y S. M. V. Giovani, “FITODEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS CON POACEAS: Brachiaria mutica, Pennisetum purpureum y Panicum maximun EN EL MUNICIPIO DE POPAYÁN, CAUCA.” Popayán - Cauca, 2013.

[17] M. A. P. T. Renso Alfredo Aragón Calderón, Andrea Yiceth Parra Collazos, “Evaluación preliminar del funcionamiento de un sistema prototipo de humedales artificiales empleando Heliconia psittacorum y Cyperus papyrus para el tratamiento de aguas residuales. 932 @ revistas.sena.edu.co.” 2015.

[18] Antonio María Cervantes, “APROXIMACIÓN A LOS RIESGOS DERIVADOS DE LAPRESENCIA DE RESIDUOS MINEROS EN SALADARES DELENTORNO DEL MAR MENOR: DINÁMICA DE METALESPESADOS Y ARSÉNICO Y SU ACUMULACIÓNEN PLANTAS Y MOLUSCOs. TÉCNICA_SUPERIO_R_DE_INGENIERÍA_AGRONÓMICA_DEPARTAM @ www.academia.” 2009.

[19] H. L. Q. O. H. Pulido., “Boletín Geológico. cc53fcff217c14748de9c5e67ee308275eee872f.pdf.” 1986.

[20] Santiago Español Cano, “Contaminación con mercurio por la actividad minera. INSTITUTO NACIONAL DE SALUD. Volumen 32, No. 3, Bogotá, D.C., Colombia - Septiembre, 2012.,” no. 3, pp. 295–298, 2017.

[21] C. Marco, “Lixiviacion - marco teorico,” 2015.

[22] M. E. García, J. A. Pérez, and L. Generalidades, “Aguas Residuales. Composición.”

[23] J. Martelo and J. Lara, “Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas

residuales: una revisión del estado del arte," *Ing. y Cienc.*, vol. 8, no. 15, pp. 221–243, 2012.

[24] Alfredo José Suárez Mendoza Karina Isabel Macias Mazo Lina Marcela Agudelo Betancur., "Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. Search @ Agris.Fao.Org." 2005.

[25] L. R. T. Amador, F. D. González-Martínez, E. , Leonardo José Martínez Hernández, L. Alberto, E. O. . Wilches Vergara, and E. O. . , José Nelson Celedón-Suárez, "Ignition of densely packed zirconium particles," *Niveles Met. pesados en muestras biológicas y su importancia en salud*, vol. 14, no. 1, pp. 22–26, 2015, doi: 10.1007/BF00789163.

[26] González Fernández Jesús, "Humedales artificiales para depuración.," vol. 3349, pp. 282–290, 1998, doi: 10.1117/12.316498.

[27] H. Aponte, P. Pérez-Irigoyen, and M. Armesto, "Notas sobre el uso y mercado de Schoenoplectus americanus 'junco' en la costa central del Perú: Implicancias para su manejo y conservación," *Científica*, vol. 11(3), no. 3, pp. 218–229, 2014.

[28] AULESTIA AGUILAR KELLY LORENA, "Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Biólogo ENRIQUE JAVIER PEÑA SALAMANCA Ph . D Profesor Asociado Departamento de Biología," 2012.

[29] Ministerio del Medio Ambiente, "Ley 99 De 1993," *D. Of.*, no. 41146, p. 44, 1993, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

[30] N. Aclaratoria and I. Nacional, "LEY 685 DE 2001. Código de Minas ," vol. 2, no. agosto 15, pp. 1–109, 2002.

[31] Ministerio de Vivienda Ciudad y Desarrollo Territorial, "Resolución Número 2115 de 2007," *Soc. Minist. la Protección Minist. Ambient. Vivienda y Desarro. Territ.*, p. 23, 2007.

[32] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "D1-Res_631_Marz_2015.Pdf." p. 62, 2015.

[33] Insitituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, "Instructivo Para La Toma De Muestras De Aguas Residuales," *Minist. Ambient. vivienda y Desarro. Territ.*, p. 17, 2007.

[34] IDEAM, *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua: conocimiento hidrológico para el bienestar de la población*, vol. 214. 2007.

[35] Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, *Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico*. 2014.

[36] earth.google, "data=CkwaShJECiUweDhlMzA4Nzg4MjU3YjkwOGY6MHhkY2FlMGE5ODF

hOWJmYTA4GVBMg0fAHQhAIRjJw-fzJlPAKglSw61vIFRldGEYASAB @ earth.google.com.” .

[37] y L. L. G. A. P.A.Coral Ceballos, “Evaluación de la eficiencia de la especie heliconia psittacorum en la remoción de mercurio proveniente de los efluentes mineros en un entable de Suárez Cauca.” .

[38] U.S. EPA – REGION 6, “Guía para el diseño y construcción de un Humedal, construido con flujos subsuperficiales”, División de manejo de agua, rama de instalaciones municipales. sección técnica, agosto de 1993.” 1993.

[39] B.-S. M. S. Ramos-Franco Albaluz, Prieto-Naranjo Jeffrey Mauricio, Cárdenas-Nieto Diana Milena, “Implementación de un sistema de fitorremediación en zona aledaña a reserva forestal protectora El Malmo , Boyacá , Colombia Implementation of a system of phytoremediation in area surrounding to forest protective reserve,” pp. 93–103, 2017.

[40] CRC, “Corporación Autonoma Regional del Cauca. Reporte de resutados - prueba de agua.” 2019.

[41] Óscar Raúl MANCILLA-VILLA, “METALES PESADOS TOTALES Y ARSÉNICO EN EL AGUA PARA RIEGO DE PUEBLA Y VERACRUZ, MÉXICO.,” vol. 28, no. 1, pp. 93–97, 2012.

[42] R. Lecca and R. Lizama, “Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno,” *Ind. Data*, vol. 17, no. 1, p. 11, 2014.

[43] CAROLINA HOYOS DAZA, “Fitorremediación De Metales Pesados Presentes En El Suelo De La Ladera Del Río Bogotá Caro.Universidad De Los Andes Facultad De Ingenieria Departamento De Ingenieria Civil y Ambiental.,” 2005.

.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de concentración, pH, DBO5, DQO, Hg y CN

pH	DBO5	DQO	Mercurio	Cianuro
7,34	<10	<15	290	0,002
7,43	<10	<15	111	0,002
7,26	<10	<15	77	34,2
7,09	<10	<15	100	0,002
7,02	<10	<15	90,2	0,002
6,90	<10	<15	8,75	0,002
7,01	<10	<15	18,8	0,002
6,99	<10	<15	47,5	0,002
6,86	<10	<15	139	0,002
6,87	<10	<15	93,3	0,002
7,11	<10	<15	42,3	47,0
7,29	<10	<15	6,7	0,002
7,15	<10	<15	29,3	0,002
7,04	<10	<15	65	0,002
6,92	<10	<15	130	0,002
7,11	<10	<15	26	0,002
7,10	<10	<15	77,5	0,002
7,31	<10	36,1	26,2	0,002
7,30	<10	<15	2875	0,002
7,43	<10	<15	177	0,002
7,37	<10	<15	4,21	0,002

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Resultados de laboratorio

Bitácora N° 478

	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL **REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA**	Código: FT-PDPA-LA027 Fecha: 13/02/2013 Versión: 3 Página 1 de 1

Fecha: Noviembre 19 de 2018.

Cliente: Subdirección Defensa del Patrimonio Ambiental Dirección: Carrera 7 N° 1N-28, Popayán Teléfono: 8333232	Solicitud N°: 386
Municipio de muestreo: Buenos Aires	Fecha de Recepción: Noviembre 1 de 2018. Fecha de Análisis: Noviembre 1 a noviembre 16.

Muestreo:

Plan de Muestreo N°	N/A
Fecha de Muestreo	N/A
Lugar de Muestreo	Buenos Aires
Procedimiento de muestreo	N/A
Condiciones ambientales	N/A

Identificación de la muestra

Código Muestra	Sitio de Muestreo
1294	Entable 1
1295	Entable 2

Resultados laboratorio:

Variable	Método	Unidad	Resultados	
			1294	1295
pH	SM4500-H B	Unidad	6.53	6.06
Conductividad	SM 2510 B	µS/cm.	645	236
DQO	SM5220D	mg/L	30.3	51.2
SST	SM2540D	mg/L	659	487
Cianuro	SM4500-CN⁻ E, modificado	mg/L	< 0.002	< 0.002
Mercurio	SM 3112 B	µg/L	128	8.71

Observaciones:

-Los resultados que se relacionan en este informe hacen referencia únicamente a las muestras analizadas.
-Este documento no puede ser reproducido parcial o totalmente sin la debida autorización del Laboratorio Ambiental.

DIEGO ZULUAGA VERA
Responsable Laboratorio Ambiental

	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL **REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA**	Código: FT-PDPA-LA027 Fecha: 13/02/2013 Versión: 3 Página 1 de 2

Fecha: Octubre 3 de 2019.

Cliente: UNIAUTONOMA	Solicitud N°: 289
Dirección: Popayán	Teléfono: 3154073930
Municipio de muestreo: Buenos Aires	Fecha de Recepción: Septiembre 17 de 2019.
	Fecha de Análisis: septiembre 17 a Octubre 1.

Muestreo:

Plan de Muestreo N°	N/A
Fecha de Muestreo	N/A
Lugar de Muestreo	Sector La Paila
Procedimiento de muestreo	N/A
Condiciones ambientales	N/A

Identificación de la muestra

Código Muestra	Sitio de Muestreo
0920	Estanque # 1, agosto 1
0921	Estanque # 1, agosto 15
0922	Estanque # 1, agosto 16
0923	Estanque # 1, agosto 22
0924	Estanque # 1, agosto 29
0925	Estanque # 2, agosto 1
0926	Estanque # 2, agosto 15
0927	Estanque # 2, agosto 16
0928	Estanque # 2, agosto 22
0929	Estanque # 2, agosto 29
0930	Estanque # 3, agosto 1
0931	Estanque # 3, agosto 5
0932	Estanque # 3, agosto 16
0933	Estanque # 3, agosto 22
0934	Estanque # 3, agosto 29
0935	Estanque # 4, agosto 1
0936	Estanque # 4, agosto 15
0937	Estanque # 4, agosto 16
0938	Estanque # 4, agosto 22
0939	Estanque # 4, agosto 29
0940	Río Teta, agosto 1

Reporte N° 358

CRC	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL **REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA**	Código: FT-PDPA-LA027 Fecha: 13/02/2013 Versión: 3 Página 2 de 2

Variable/Método/Unidad:

Variable	Método	Unidad
pH	SM4500-H B	Unidad
DBO_5	SM5210B/SM4500-OG	mg/L
DQO	SM5220D	mg/L
Cianuro	SM4500-CN^- E, modificado	mg/L
Mercurio	SM 3112 B	µg/L

Resultados laboratorio:

Código Muestra	pH	DBO_5	DQO	Cianuro	Mercurio
0920	7.34	< 10	< 15	< 0.002	290
0921	7.43	< 10	< 15	< 0.002	111
0922	7.26	< 10	34.2	< 0.002	77.0
0923	7.09	< 10	< 15	< 0.002	100
0924	7.02	< 10	< 15	< 0.002	90.2
0925	6.90	< 10	< 15	< 0.002	8.75
0926	7.01	< 10	< 15	< 0.002	18.8
0927	6.99	< 10	< 15	< 0.002	47.5
0928	6.86	< 10	< 15	< 0.002	139
0929	6.87	< 10	< 15	< 0.002	93.3
0930	7.11	< 10	47.0	< 0.002	42.3
0931	7.29	< 10	< 15	< 0.002	6.70
0932	7.15	< 10	< 15	< 0.002	29.3
0933	7.04	< 10	< 15	< 0.002	65.0
0934	6.92	< 10	< 15	< 0.002	130
0935	7.11	< 10	< 15	< 0.002	26.0
0936	7.10	< 10	< 15	< 0.002	77.5
0937	7.31	< 10	36.1	< 0.002	26.2
0938	7.30	< 10	< 15	< 0.002	2875
0939	7.43	< 10	< 15	< 0.002	177
0940	7.37	< 10	< 15	< 0.002	4.21

Reporte N° 371

CRC	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL **REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA**	Código: FT-PDPA-LA027 Fecha: 13/02/2013 Versión: 3 Página 1 de 1

Fecha: Octubre 3 de 2019.

Cliente: UNIAUTONOMA	Solicitud N°: 302
Dirección: Popayán	Teléfono: 3154073930
Municipio de muestreo: Buenos Aires	Fecha de Recepción: Septiembre 23 de 2019.
	Fecha de Análisis: septiembre 23 a Octubre 1.

Muestreo:

Plan de Muestreo N°	N/A
Fecha de Muestreo	N/A
Lugar de Muestreo	Sector La Paila
Procedimiento de muestreo	N/A
Condiciones ambientales	N/A

Identificación de la muestra

Código Muestra	Sitio de Muestreo
0978	Acuario N° 1
0979	Acuario N° 2
0980	Acuario N° 3
0981	Acuario N° 4

Resultados laboratorio:

Variable	Método	Unidad	Resultados			
			0978	0979	0980	0981
pH	SM4500-H B	Unidad	6.55	6.60	6.67	6.82
DBO_5	SM5210B/SM4500-OG	mg/L	< 10	< 10	< 10	< 10
DQO	SM5220D	mg/L	17.9	16.3	20.7	17.3
Cianuro	SM4500-CN^- E, Mod	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Mercurio	SM 3112 B	µg/L	198	111	82.3	251

Fuente: Propia