

Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le de crédito al documento y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA
UNIVERSIDAD DE LA SABANA
Chía - Cundinamarca

UNIVERSIDAD DE LA SABANA



Proyecto para optar al título de ingeniero químico

**EVALUACIÓN DE UN TRATAMIENTO PARA DRENAJE
ÁCIDO PROVENIENTE DE UNA MINA DE CARBÓN**

Juan Camilo Estupiñan Barón

AUTOR

Manuel Fernando Valero

Luis Eduardo Díaz

PROFESOR DIRECTOR

2015

Chía-Colombia

DEDICATORIA

Dedicado a Dios por darnos la vida y la sabiduría para poder desempeñar con amor, verdad y actitud de servicio hacia los demás. A mi familia, a mis Padres por darme su apoyo motivacional y financiero, y a mis hermanos por su gran amor y respeto. A mi tierra Boyacá y a Tasco mi pueblo natal por enseñarme por medio de su cultura trabajadora a ser esforzado y valiente. Finalmente a la Universidad de La Sabana por enseñarme mediante su cultura institucional un significado práctico de servicio, familia y humanidad.

AGRADECIMIENTOS.

A mis padres por su gran apoyo motivacional y financiero. A Jorge Rodríguez, experto en biología molecular, un gran paisano y amigo personal por su apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto, he aprendido mucho de él y lo considero parte de este trabajo. A mis profesores Manuel Fernando Valero y Luis Eduardo Díaz por su monitoria en el desarrollo de este trabajo.

Contenido.

Dedicatoria.....	II
Agradecimientos.....	III
Lista de imágenes	V
Lista de gráficos.....	VI
Lista de tablas	VI
1. Resumen	9
2. Descripción del proyecto	10
2.1 Pregunta de investigación y justificación	
2.2 Revisión del estado de la arte	11
2.3 Marco Teórico	12
2.3.1 Formación y Caracterización del Drenaje ácido de mina	13
2.3.2 Marco legal para el tratamiento de los drenajes ácidos mina	13
2.3.3 Procesos físicos de tratamiento	14
2.3.4 Procesos biológicos de tratamiento	15
2.3.4.1 Las algas, biomasa empleada para remover metales	16
2.3.5 Determinación de hierro, sulfatos y Sólidos Suspendedos en una muestra de DAM	18
2.4 Objetivos.	19
2.4.1 General.	19
2.4.2 Específicos	19
2.5 Metodología.....	20
2.5.1 Análisis de Condiciones fisicoquímicas del DAM	20
2.5.2 Evaluación de proceso físico de tratamiento.	21
2.5.2.1 Variables de interés.	21
2.5.2.2 Determinación de sólidos suspendidos totales.	22
2.5.3 Evaluación de proceso biológico de tratamiento.	25
2.5.3.1 Selección de Biomasa de tratamiento.	25
2.5.3.2 Cultivo de biomasa de tratamiento.	28
2.5.3.3 Separación de la biomasa del medio.	30
2.5.3.4 Evaluación de proceso biológico para de tratamiento de DAM.	32

	2.5.3.4.1 Determinación de Hierro Total.	35
	2.5.3.4.2 Determinación de Sulfatos	36
	2.6 Cronograma de actividades.	36
	2.7 Análisis económico del proyecto.	38
3	Resultados y Discusión.	39
	3.1 Resultados.....	39
	3.1.1 Curva de Calibración de hierro.	39
	3.1.2 Curva de Calibración de Sulfatos.....	40
	3.1.3 Concentraciones iniciales de hierro y Sulfatos del DAM.	41
	3.1.4 Concentraciones de hierro y Sulfatos presentes en el DAM tratado.	41
	3.1.5 Resumen proceso físico de tratamiento.	46
	3.2 Discusión de resultados	46
	3.2.1 Absorción de hierro y sulfatos.	46
	3.2.2 Remoción de sólidos suspendidos totales (SST)	48
4	Conclusiones.	50
5	Bibliografía.	51

Lista de imágenes.

Imagen 1.	Sector Tirrá municipio de Tasco.	21
Imagen 2.	Filtro de arena.....	23
Imagen 3.	Filtro de arena desde una perspectiva superior.....	24
Imagen 4.	Filtros de diferentes mallas de material.....	25
Imagen 5.a	Chlorella Nativa	26
Imagen 5.b.	<i>Scenedesmus Quadricauda</i>	26
Imagen 5.c.	<i>Scenedesmus Quadricauda</i> Colección Utex.....	27
Imagen 5.d.	Chlorella Vulgaris colección Utex	27

Imagen 6. Medio de cultivo Bristol de 3 L con inoculo de microalgas.....	28
Imagen 7. Medio Bristol con cultivo de 20 L.....	30
Imagen 8.a. Decantación	30
Imagen 8.b. Decantación	30
Imagen 8.c. Separación del sobrenadante.....	30
Imagen 8.d. Biomasa centrifugada.....	30
Imagen 9. Conteo en cámara de Neubauer	31
Imagen 10. Introducción de biomasa a Erlenmeyer para tratamiento de DAM.....	33
Imagen 11. Introducción de biomasa a Erlenmeyer para tratamiento de DAM.....	34
Imagen 12. Tratamiento de DAM por medio de microalgas	34

Lista de gráficas.

Gráfica 1. Curva de calibración para determinación de concentración de hierro.....	39
Gráfica 2. Curva de calibración para determinación de concentración de Sulfatos	40

Lista de Tablas

Tabla 1. Microalgas y composición de pared celular.	17
Tabla 2. Grupos funcionales y metales con afinidad.....	18
Tabla 3. Métodos y Unidades.	20
Tabla 4. Composición de medio brístol para preparación de 1l.	29
Tabla 5. Conteo celular.....	31
Tabla 6. Composición de cultivo para tratamiento	32
Tabla 7. Concentración inicial de hierro	41
Tabla 8. Concentración inicial de Sulfatos.....	42

Tabla 9. Absorción de hierro por <i>Chlorella Vulgaris</i>	42
Tabla 10. Absorción de hierro por <i>Scenedesmus cuadriculada</i>	43
Tabla 11. Absorción de hierro por combinación 50% <i>Chlorella</i> /50%. <i>Scenedesmus</i> ...	43
Tabla 12. Absorción de Sulfatos por <i>Scenedesmus Quadricauda</i>	43
Tabla 13. Absorción de Sulfatos por <i>Chlorella Vulgaris</i>	44
Tabla 14. Absorción de Sulfatos por Combinación 50%-50%.....	45
Tabla 15. Resumen Proceso físico de tratamiento.....	45
Tabla 16. Resultados proceso biológico de tratamiento.....	45
Tabla 17. Resultados proceso físico de tratamiento.....	46

1. Resumen.

La constante demanda de carbón en la región Andina Colombiana hace que los niveles de explotación a pequeña y mediana escala crezcan notoriamente. El carbón es utilizado como recurso energético y materia prima para la creación de algunos productos metalúrgicos. Sin embargo, paralelamente a los procesos de explotación se tienen impactos sobre el medio ambiente que no dan espera, particularmente los efectos sobre los recursos hídricos los cuales se ven afectados por efluentes líquidos generados en el proceso de extracción del mineral.

El drenaje ácido de mina (DAM) es un efluente generado en la explotación de carbón que se caracteriza por poseer una cantidad elevada de sólidos disueltos, hierro y sulfatos. El uso agrícola, ganadero y de piscicultura que se le da a los recursos hídricos en la región andina, hace indispensable tratar de manera adecuada los DAM. Se han dado casos en los que un indebido tratamiento de los DAM ha conducido a la destrucción de industrias piscicultoras en los sitios adyacentes a socavones de carbón en donde las consecuencias no solo han sido socioambientales, sino que también han pasado al plano legal en donde los dueños de títulos mineros pueden perder su licencia ambiental para la extracción de carbón como ocurre en Boyacá (Medina, 2011). Adicional a esto, la carencia de leyes que protejan a los ecosistemas de páramo de las actividades mineras, ha permitido que estos ecosistemas sean afectados por los DAM provenientes de minería ilegal afectando su equilibrio natural. Por este motivo se busca un proceso que combine una etapa física (filtración) y una etapa biológica (biosorción) que se caracterice por ser económico operativamente. Este proyecto propone una estrategia físico-biológica de tratamiento de DAM para alcanzar los criterios de vertimiento propuestos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y publicados en el Código Federal de Regulaciones (CFR). La estrategia se propone teniendo en cuenta la situación técnico económica de la minería de carbón a pequeña y mediana escala ubicada en la región Andina colombiana para mejorar su situación actual de tratamiento de DAM

2. Descripción.

2.1 Pregunta de Investigación y justificación.

Hoy en día existe escasez de recursos técnico-económicos por parte de la minería de carbón a pequeña y mediana escala en Colombia (Fededesarrollo, 2011). A su vez existe una tendencia legal por tratar de forma adecuada el DAM provenientes de las minas de carbón. Actualmente los sistemas de tratamiento de DAM son demasiado costosos y poco eficientes. Debido a esto, los propietarios de títulos mineros se exponen a sanciones legales y socioambientales debido al precario tratamiento que se le da a la DAM proveniente de los socavones.

Ante la realidad socioeconómica de la industria extractiva del carbón a pequeña y mediana escala, un acople físico-biológico, sería una alternativa que se caracterizaría por ser eficiente y sostenible económicamente, y adicionalmente se podría generar un aprovechamiento del recurso hídrico tratado en fines principalmente agropecuarios. La tendencia legal a poner límites máximos permitidos de los valores fisicoquímicos para el vertimiento de DAM a cuerpos de agua se encuentra en el decreto 3930 de 2010 el cual establece en el artículo 28 la directriz para fijar valores fisicoquímicos para vertimientos (Decreto 3930, 2010).

Sin embargo hasta la fecha no se han establecido dichos valores, por este motivo la directriz de eficiencia de la evaluación del acople físico-biológico presentada en este trabajo, está regida por el título 40 del código federal de regulaciones de los Estados Unidos es cual la codificación de las normas generales y permanentes publicadas en el Registro Federal por los departamentos y agencias del Gobierno Federal tales como la agencia de protección ambiental (EPA) (U.S Publishing Government Office, 2015).

¿Es posible a través del uso de un proceso que costa de la combinación de una etapa física y una biológica para dar cumplimiento al CFR para tratamiento de DAM?

2.2 Revisión de la Literatura o Estado del Arte

Actualmente, los procesos que se tienen para el tratamiento de DAM son procesos activos que involucran la adición de sustancias químicas; estos por lo general son costosos debido al volumen de agua a descontaminar y a la naturaleza química de sus contaminantes. Un ejemplo representativo de sistema de tratamiento, propuesto por la Federación Nacional de Productores de Carbón (FENALCARBÓN), consta de un acople compuesto por un sistema de dosificación de cal y un proceso físico constituido por un lecho de secado y un vertedero (Fenalcarbón, 2011). Es un proceso costoso debido a los grandes caudales que se tienen que tratar constantemente y debido a que la cal de tratamiento no es reutilizable. En cuanto a la eficiencia, este proceso es poco eficiente debido a que solo está orientado a regular el pH y disminuir la turbiedad. Este proceso no tiene los mecanismos para disminuir la concentración de iones sulfatos y de metales pesados.

Los procesos a base de filtración son altamente eficientes para el acondicionamiento de parámetros físicos de la calidad como sólidos disueltos y turbidez, pero ineficientes para el acondicionamiento de parámetros químicos como pH, concentración de hierro y sulfatos. En contraste con los procesos de filtración, existen procesos químicos basados en la adición de agentes coagulantes y floculantes, sin embargo estos procesos son altamente costosos debido a los grandes volúmenes de DAM generados por las minas de carbón. Los procesos biológicos representan una considerable opción de tratamiento de DAM en cuanto es posible producir y utilizar y reutilizar la biomasa de tratamiento generando un proceso económico y eficiente a la vez (Areco, 2011). Un tratamiento compuesto por un acople físico y biológico representaría una alternativa económica y eficiente para el tratamiento de DAM. Los métodos de filtración utilizados actualmente en los lechos de secado, podrían ser utilizados para la remoción de Sólidos suspendidos totales (Fenalcarbón, 2011). Adicional a esto, los métodos de biosorción que usan biomasa para la remoción de metales, representan una alternativa de eficiente y económica debido a la posibilidad de reutilizar la biomasa en estos procesos (Areco, 2011).

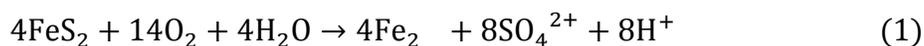
2.3 Marco Teórico.

2.3.1 Formación y Caracterización DAM.

El origen del DAM es ocasionado por la oxidación de minerales sulfurosos cuando son expuestos al aire y al agua, lo cual da por resultado acidez, sulfatos y disolución de metales (Peña & Ortiz, 2009). Debido a la necesidad de bombear agua de los proyectos mineros subterráneos hacia la superficie con el fin de favorecer las labores de extracción mineral, el DAM termina en las cuencas hídricas adyacentes al sitio de explotación.

Los DAM se caracterizan por ser turbios, con gran cantidad de sólidos disueltos, altos niveles de conductividad, elevados pH y altas concentraciones de iones metálicos particularmente hierro y sulfatos. En la formación del DAM se presentan fenómenos de tipos físico, químico y biológico. La formación del DAM se puede resumir en los siguientes procesos.

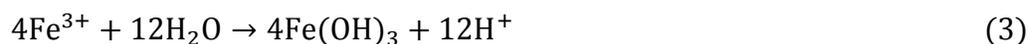
- Procesos de oxidación: Los sulfuros presentes en las rocas se oxidan y forman óxidos, generando también un medio ácido.



- Reacciones secundarias y disolución de metales.



El hierro ferroso se oxida transformándose en hierro férrico, a su vez el medio ácido contribuye a la disolución de otros metales. Por debajo de un pH de 3.5 existe la tendencia formarse hidróxido férrico el cual forma un precipitado de color amarillo (Peña & Ortiz, 2009).



- Arrastre a la superficie.

El DAM es bombeado hacia la superficie desde el interior de una mina subterránea. Este drenaje ácido termina entonces siendo vertido muchas veces en los cauces adyacentes a los sitios de explotación generando alteración en el equilibrio natural, perjudicando a la flora y fauna silvestre y/o el sector agropecuario que usan el agua dulce propia de los cauces de la región andina. También se pueden contaminar algunas cuencas hídricas de los ecosistemas de páramo donde las actividades mineras se desarrollan de forma ilegal.

2.3.2 Marco Legal del Tratamiento de drenajes ácidos.

En Colombia el Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible es la entidad encargada de regular los niveles máximos permitidos para realizar un vertimiento de DAM a un cuerpo de agua. El decreto 3930 de 2010 establece algunos términos de referencia para el vertimiento de DAM (Decreto 3930, 2010). Sin embargo el decreto 3930 aunque establece que en un término de dos meses se establecerá unos valores fisicoquímicos máximos para el vertido de aguas provenientes de minas de carbón. A la fecha de 30 de julio de 2014 el Ministerio de medio ambiente en Colombia no ha emitido ningún acto administrativo para fijar dichos valores máximos.

En Estados Unidos, la normativa que rige los vertimientos procedentes de minería de carbón está establecida en el título 40 del Código Federal de Regulaciones (CFR). El término drenaje ácido de mina significa en términos legales, drenaje de mina antes de algún tratamiento o bien drenaje con pH menor que 6 o con concentraciones mayores a $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de hierro (EPA, 2013). Los valores máximos permitidos en la normativa del CFR corresponden a $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de hierro, $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ TSS (sólidos suspendidos totales), $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de manganeso y pH entre 6 y 9.

Existen similitudes entre el régimen legal para vertimientos de Colombia y los Estados Unidos. La primera similitud entre los dos regímenes legales corresponde al hecho de que la rama ejecutiva establece los valores fisicoquímicos mínimos para vertimientos,

esto porque ha sido habilitada por una ley. También hay una similitud en cuanto que existe un organismo vinculado al ejecutivo que establece dichas regulaciones, en el caso Colombiano este organismo corresponde al Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible; y en el caso de los EE.UU, corresponde a la EPA. Sin embargo existe un gran contraste, el cual se presenta en hecho de que actualmente EE.UU presenta unos valores fisicoquímicos máximos permitidos, lo cual no ocurre en Colombia donde dichos valores no están definidos.

2.3.3 Procesos Físicos de Tratamiento.

Se entiende por filtración a la operación por la cual se separan los sólidos finamente de los fluidos en cuyo seno están suspendidos. El fluido en cuestión puede ser un líquido o un gas. El estudio de la filtración desde el punto de vista de diseño tiene las siguientes finalidades (Vian, 1976).

- a. Poder decidir de manera racional cual es el tipo de filtro más adecuado para la finalidad perseguida.
- b. Dimensionar este filtro.
- c. Establecer las condiciones de operación y de lavado.
- d. Poder predecir con suficiente exactitud el resultado que se ha de obtener al variar

Como ya se ha mencionado, los procesos de filtración no mejoran los parámetros químicos de calidad, pero son buenos predecesores para el mejoramiento de estos. Algunos de los medios filtrantes más comunes en el tratamiento de agua, lo constituyen la arena y el carbón activado, sin embargo en muchos procesos de tratamiento el proceso de filtración es una combinación de estos medios según la necesidad de los contaminantes a tratar (Orellana, 2015).

2.3.4 Procesos biológicos de Tratamiento.

Con respecto a los mecanismos biológicos de remoción de metales pesados de aguas contaminadas, se distinguen dos tipos de procesos. Procesos de **bioacumulación** en donde los metales pesados pueden ingresar y retenerse en el interior de la célula,

generando un gasto de energía. También se tienen procesos de **biosorción** en donde el metal contaminante se adhiere a la pared celular de la biomasa. Estos procesos tienen la ventaja de separar los metales adheridos a la célula usando medios acuosos por lo que es muy rentable. (Vullo, 2003)

Existe una gran variedad de materiales para remover metales contaminantes entre los que se encuentran bacterias, algas y microalgas (Tejada & Villabona, 2015). En una investigación llevada en Santa Catarina Brasil, se encontró que comunidades de microalgas encontrados en cauces contaminados con DAM adsorbían sustancias presentes en el DAM (Freitas, A.P.P., Schneider, I.A.H., & Schwartzbold, A., 2011). Entre los géneros de microalgas que se encontraron, estaban presentes los géneros *Microspora*, *Eunotia*, *Euglena*, *Mougeotia*, and *Frustulia* en donde el género que más eficiente en la remoción de contaminantes fue *Microspora*. Se puede inferir que microalgas presentes en DAM pueden ser utilizadas para tratamiento de este.

Existen dos factores a considerar en el estudio de remoción de metales de aguas contaminadas utilizando biomasa. La cinética y la termodinámica, la primera se determina la velocidad a la que un soluto puede ser absorbido por la biomasa y la segunda la concentración máxima de soluto que la biomasa tolera. En todo caso el proceso de biosorción para remoción de metales pesados consta de los siguientes pasos. (Plaza Cazón, 2012).

- Transporte del metal desde el seno de la solución a la capa límite alrededor de la pared celular.
- Transporte desde la capa límite a la pared celular.
- Transporte del metal desde la pared celular a los puntos activos del enlace.
- Fases del enlace

También es posible desarrollar los procesos de biosorción en diferentes sistemas de adsorción con respecto a las columnas en donde se desarrolla el proceso. Se pueden clasificar en reactores de lecho fijo y de lecho fluidizado (Cañizares, 2000)

El fenómeno de enlace puede estar dado por interacciones moleculares o por reacciones químicas efectuadas en los sitios activos de la membrana de la biomasa. En el caso de las algas, bien podría estar asociada a interacciones electrostáticas o más conocidas como interacciones moleculares de tipo ion-ion. Estas interacciones se pueden dar entre los metales pesados presentes en el DAM y los grupos funcionales presentes en las membranas celulares de las microalgas (Cañizares, 2000). Para este trabajo se utilizaron cepas de la especie *Chlorella* y *Scenedesmus* pertenecientes a la división de las *Chlorophytas*. Se escogieron estas especies para realizar esta investigación debido a que se encontraron cepas morfológicamente similares en una muestra de DAM tomada en el municipio de Tasco Boyacá. También se ha encontrado que las algas verdes tienen un gran potencial para remover metales pesados debido a los grupos funcionales que presentan en la pared celular (Ardila Forero, 2012)

2.3.4.1 Las algas, biomasa empleada para remover metales pesados.

Entre las principales ventajas de las algas frente otros biosorbentes, se encuentra la selectividad y alta capacidad de absorción. Los tipos de algas más utilizadas en los procesos de remoción de metales pesados, se encuentran las algas rojas, verdes, y marrones (Plaza Cazón, 2012). La tabla 1 muestra los grupos funcionales presentes en la pared celular responsables de la adsorción de metales pesados.

Tabla 1. Microalgas y composición de pared celular.

DIVISIÓN	NOMBRE COMÚN	COMPOSICIÓN DE LA PARED CELULAR
Chlorophyta	Algas verdes	Poseen clorofila a y b; α , β y γ carotenoides y varios xantófilos, producen amilosa y amilopectina en forma de

		almidón y su pared celular está constituida de celulosa (b-1,4-gluco-pirosida), grupos hidroxilo, oxo, carboxilo y amino, de la hidroxiprolina, xilanos y manosa.
Phacophyta	Algas marrones	Poseen clorofila a y c; β caroteno y varios xantófilos, producen manitol y su pared celular está constituida de celulosa, ácido algínico y mucopolisacaridos
Rhodophyta	Algas rojas	Contienen clorofila a y d y otros pigmentos como la ficocianina R y C, R y B ficoeritrina, b-caroteno and varios xantofilos. (Ardila Forero, 2012)

Los grupos funcionales presentes en las paredes celulares de los diferentes tipos de microalgas son ligandos o compuestos que interactúan con los diferentes cationes presentes en aguas con metales pesados. La tabla 2 muestra cationes con los diferentes grupos funcionales a los que se es a fin.

Tabla 2. Grupos funcionales y metales con afinidad (Plaza Cazón, 2012)

Tipos de grupo funcional	Grupos funcionales	Grupos de metales
1. Los que prefieren cationes tipo A.	F ⁻ , O ₂ ⁻ , OH ⁻ , H ₂ O, CO ₃ ²⁺ , SO ₄ ⁻ , RO ₃ ⁻ , NO ₃ ⁻ , HPO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻ , ROH, RCOO ⁻ , C=O, ROR	Cationes tipo A: Clase A: Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Sc, Rb, Sr, Y, La, Fr, Ra, Ac, Al, Lantánidos, Actínidos
2. Los que prefieren cationes de tipo intermedio.	Cl ⁻ , Br ⁻ , N ³⁻ , NO ₂ ⁻ , SO ₃ ²⁻ , NH ₃ , N ₂ , RNH ₂ , R ₂ NH, =N ⁻ , -CO-N-R, O ₂ , O ²⁻ , O ₂ ²⁻ .	Cationes tipo intermedio: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Cd, In, Sn, Sb, As
3. Los que prefieren cationes tipo B.	H ⁻ , I ⁻ , R ⁻ , CN ⁻ , CO, S ²⁻ , RS ⁻ , R ₂ S, R ₃ As.	Cationes tipo B: Rh, Pd, Ag, Lr, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi

2.3.5 Determinación de hierro, sulfatos y Sólidos Suspendidos en una muestra de DAM

Para caracterizar fisicoquímicamente al DAM, se realizaron pruebas para cuantificar la concentración de hierro, sulfatos y sólidos suspendidos totales. En el caso de la determinación del hierro, se utilizó la metodología descrita en la norma técnica colombiana (NTC) 4754. Para la determinación de sulfatos, se utilizó la NTC 4708 y finalmente para determinación de sólidos suspendidos totales se utilizó la NTC 897.

2.4 Objetivos.

2.4.1 General.

Determinar la eficiencia de un sistema para tratamiento de DAM proveniente de una mina de carbón utilizando dos fases, una física y otra biológica

2.4.2 Específicos.

- Evaluar el proceso de filtración a base de arenas clasificadas para tratamiento de DAM de una mina de carbón en función de los sólidos suspendidos totales (TSS) y la velocidad de flujo.
- Evaluar un proceso biosorción a base de microalgas para el tratamiento biológico de DAM proveniente de una mina de carbón en función de la remoción de los iones hierro y sulfato.
- Determinar si el sistema desarrollado cumple con la normatividad vigente para el tratamiento de DAM estipulado en el código federal de regulaciones aplicado por la EPA.

2.5 Metodología.

La metodología que se llevó a cabo para cumplir con los objetivos fue cuantitativa y soportada en análisis químicos. Esta metodología se llevó a cabo en las siguientes fases las siguientes fases.

- a. Análisis de condiciones fisicoquímicas del DAM.
- b. Evaluación de proceso físico de tratamiento.
- c. Evaluación de proceso biológico de tratamiento.

2.5.1 Análisis de Condiciones fisicoquímicas del DAM.

En esta fase se realizó un análisis de sólidos suspendidos totales (TSS), Hierro férrico y sulfatos. Los métodos para realizar análisis fisicoquímicos al DAM y sus unidades son presentados en la tabla 3.

Tabla 3. Métodos y Unidades de análisis para la evaluación de la eficiencia de los procesos biológico (Sulfatos, Hierro Férrico); y proceso físico TSS.

ANALITO	MÉTODO	UNIDADES
---------	--------	----------

TSS	Gravimétrico	Ppm
Sulfatos	Turbidimétrico	Ppm
Hierro férrico	De la fenantrolina	Ppm

Se tomó una muestra Drenaje ácido de mina de carbón en el sector Tirrá de la vereda el Pedregal del municipio de Tasco en el departamento de Boyacá. La imagen 1 muestra una fotografía satelital del lugar donde fueron tomadas las muestras encerrado con una circunferencia roja. Estas muestras se le realizaron los análisis mostrados en la tabla 1.

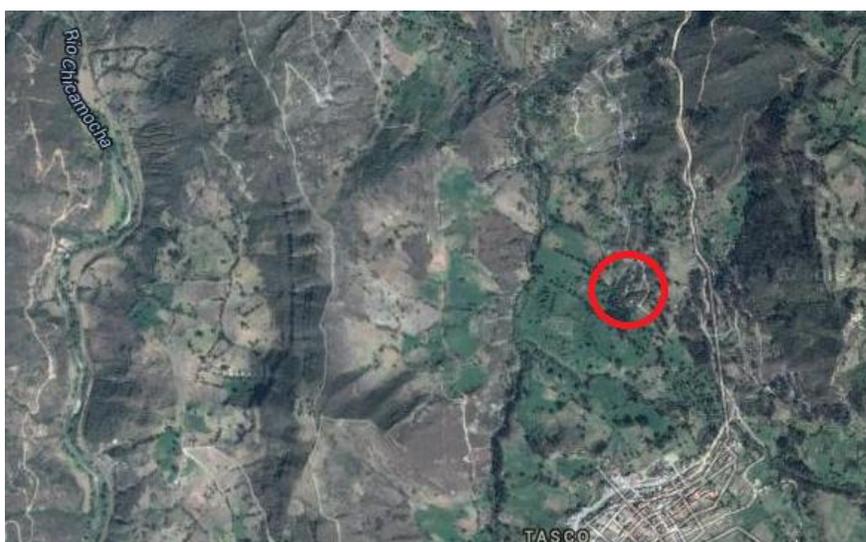


Imagen 1. Sector Tirrá municipio de Tasco

2.5.2 Evaluación de proceso físico de tratamiento.

La evaluación de del proceso físico se llevó a cabo utilizando arenas de diferentes tamices en filtros cilíndricos de aproximadamente 3 pulgadas de diámetro y 25 cm de alto. En este proceso se tienen la velocidad de flujo y la concentración final de TSS como variables de respuesta. Las arenas a utilizar clasificadas según su tamiz de proveniencia y retención son:

- 4-12
- 8-12

- 12-20
- 20-30

Se utilizará el método gravimétrico para determinar la concentración de TSS. Los tamices utilizados y su número de referencia son de carácter comercial. Aunque hay organizaciones de medidas como la American Society for Testing and Materials (ASTM) que tipifican estas referencias de clasificación. (Quiñones Villanueva, 2014)

2.5.2.1 Variables de interés

Para evaluar el proceso físico de tratamiento tenemos dos variables de medida velocidad de flujo y Remoción de sólidos suspendidos totales (TSS). La primera variable, la velocidad de flujo, surge de la necesidad de conocer cuál es el tiempo de residencia que puede tener el DAM en un filtro de arena para la remoción de TSS. En general se puede decir que el caudal de DAM generado por las minas de carbón es relativamente alto, de este modo las empresas mineras tienen gran interés en procesos de tratamiento con tiempos relativamente cortos. Los sólidos suspendidos totales la otra variable de interés surge de la necesidad de dar cumplimiento a los requisitos legales estipulados por la EPA.

2.5.1.2 Determinación de sólidos suspendidos totales.

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST), se consideran como la cantidad de residuos retenidos en un filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro nominal de 0.45 µm y hace referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual. Los sólidos suspendidos totales se calculan usando el método gravimétrico (Dane, 2003). El principio del método consiste en hacer pasar una muestra bien mezclada a través del filtro de vidrio pesado y el residuo contenido en el filtro se seca hasta obtener un peso constante entre 103 °C y 105 °C. El aumento de peso en el filtro representa el total de sólidos suspendidos totales y su cálculo se realiza usando la siguiente ecuación (Icontec, 2001)

$$\frac{mgSST}{L} = \frac{(A - B)X100}{Volumen\ de\ la\ Muestra\ (L)} \quad (4)$$

mg SST/L= Sólidos suspendidos Totales en mg/L

A=Peso del filtro en mg +residuo seco en mg.

B=Peso del filtro en mg.

Imagen 2. Filtro de arena



Imagen 3. Filtro de arena desde una vista superior



Imagen 4. Filtros de diferentes mallas de material.



2.5.3 Evaluación de proceso Biológico de Tratamiento de DAM

2.5.3.1 Selección de Biomasa de tratamiento.

Se tomó muestra de DAM en una mina de carbón ubicada en el departamento de Boyacá con presencia de microalgas. Seguidamente se identificó la presencia de dos tipos especies de microalgas (*Chlorella* y *Scenedesmus*). Una vez identificadas, se decidió utilizar la especie para el proyecto, la especie *Chlorella* de esa fuente. Esta microalga se aisló para su cultivo y posterior utilización en la evaluación de remoción de hierro y sulfatos. Con respecto a la especie *Scenedesmus*, se decidió utilizar inóculo presente en la colección de microalgas de la Universidad de La Sabana, esto debido a que la especie reportada como microalga con propiedades de absorción era la especie *Quadricauda* más que la especie *dimorphus* presente en la muestra de DAM.

A través del microscopio se puede observar la similitud de forma que posee la *chlorella* nativa con la *chlorella vulgaris* encontrada en la colección de microalgas de la Universidad de Texas (UTEX). Ver imágenes 5.a y 5.d. La cepa de *scenedesmus* perteneciente a la colección de la Universidad de La Sabana es muy similar a la *scenedesmus quadricauda* encontrada en la colección de la UTEX. Ver imágenes 5b y 5c.

Imagen 5a. Chlorella Nativa

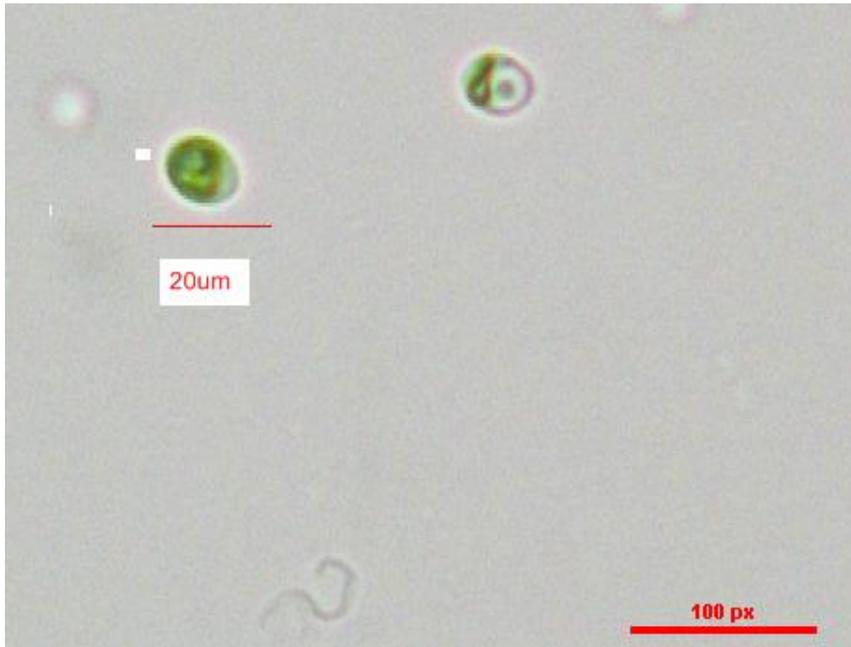
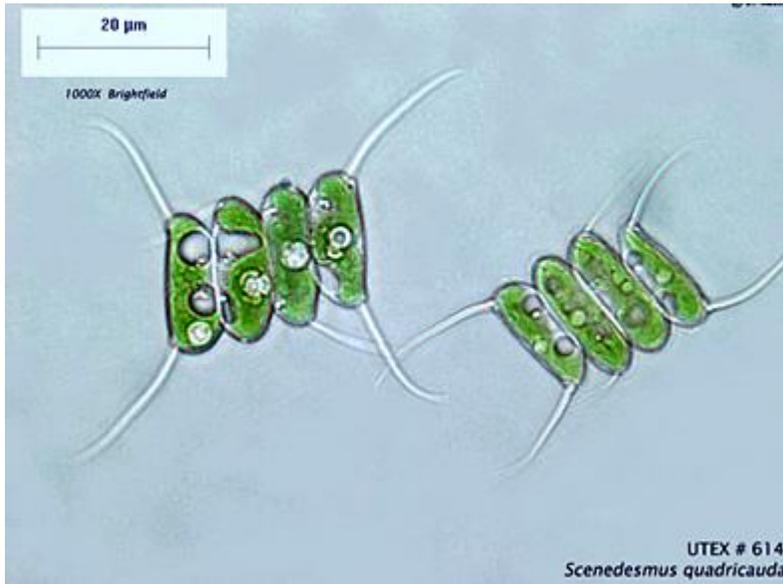


Imagen 5b. Scenedesmus Cuadricauda

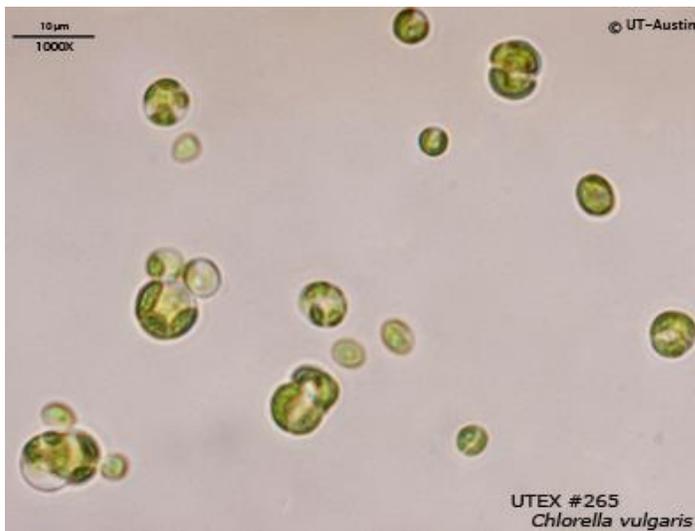


Imagen 5.c *Scenedesmus Quadricauda* colección Utex



(Utex, 2014)

Imagen 5d *Chlorella Vulgaris* Colección Utex

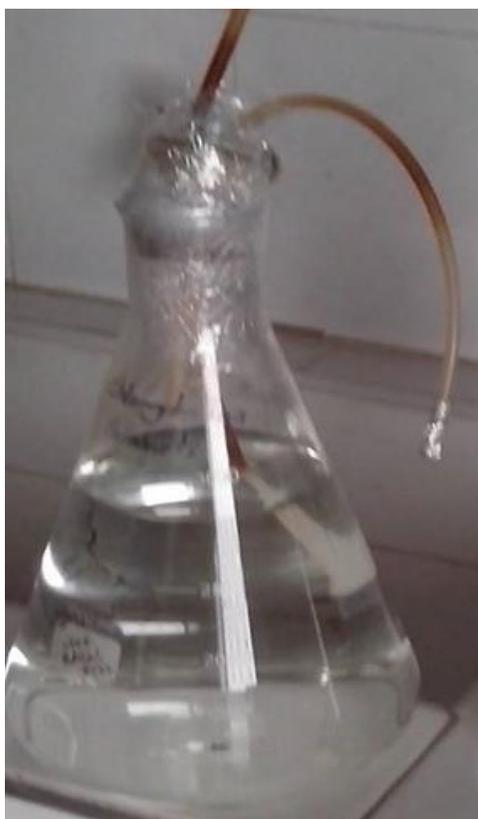


(Utex, 2014)

2.5.3.2 Cultivo de biomasa de tratamiento.

Se agregó 1ml de inóculo de las microalgas *Chlorella* Nativa y *Scenedesmus Quadricauda* a 3 litros de medio de Cultivo Bristol (Ver imagen 2: Medio de Cultivo Bristol con inóculo de microalgas).

Imagen 6. Medio de cultivo Bristol de 3 L con inóculo de microalgas



El medio de cultivo brístol es el recomendado para estas especies de microalgas, su composición para 1 l se muestra en la tabla 2. Composición de medio brístol para preparación de 1L. El cultivo de las microalgas se dio por dos semanas bajo condiciones de fotoperiodo de 18 horas de luz y seis de oscuridad y suministro de aire con 5% de CO₂.

Tabla 4. Composición de medio brístol Para preparación de 1L

#	Componente	Cantidad	Concentración
1	NaNO ₃ (Fisher BP360-500)	10 mL/L	10 g/400mL dH ₂ O
2	CaCl ₂ ·2H ₂ O (Sigma C-3881)	10 mL/L	1 g/400mL dH ₂ O
3	MgSO ₄ ·7H ₂ O (Sigma 230391)	10 mL/L	3 g/400mL dH ₂ O
4	K ₂ HPO ₄ (Sigma P 3786)	10 mL/L	3 g/400mL dH ₂ O
5	KH ₂ PO ₄ (Sigma P 0662)	10 mL/L	7 g/400mL dH ₂ O
6	NaCl (Fisher S271-500)	10 mL/L	1 g/400mL dH ₂ O (Utex,2014)

Pasadas dos semanas de sembrado el inoculo en el medio brístol de 3 litros se pasó a un medio de cultivo de 20 litros utilizando poncheras plásticas por 30 días y bajo condiciones de fotoperiodo de 18 horas de luz y seis horas de oscuridad.

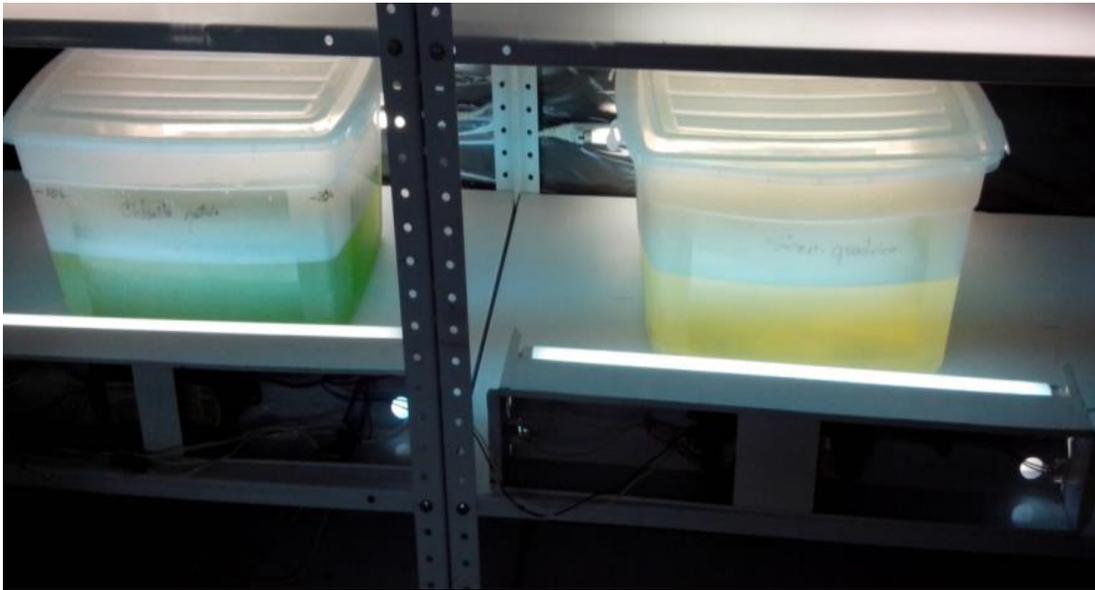


Imagen7. Cultivo de microalgas en medio de 20 L

2.5.3.2 Separación de la biomasa del medio.

Una vez pasarán los 30 días de cultivo en medio brístol de 20 litros, se procedió a dejar decantar de forma pasiva la biomasa resultante por dos semanas retirando el sobrenadante pobre en biomasa. Las imágenes 8a, 8b. Representan los procesos de decantación. La imagen 8c representa el sobrenadante separado. La imagen 8d representa la biomasa centrifugada.



Imagen 8a. Decantación



Imagen 8b. Decantación



Imagen 8c. Separación del sobrenadante



Imagen 8d. Biomasa Centrifugada

Una vez decantada la biomasa y separado el sobrenadante se procede a realizar un proceso de centrifugación para obtener una muestra más concentrada de biomasa. El proceso de centrifugación se llevó a cabo utilizando una centrifuga marca Universal 320 R a 6000 revoluciones durante 10 minutos.

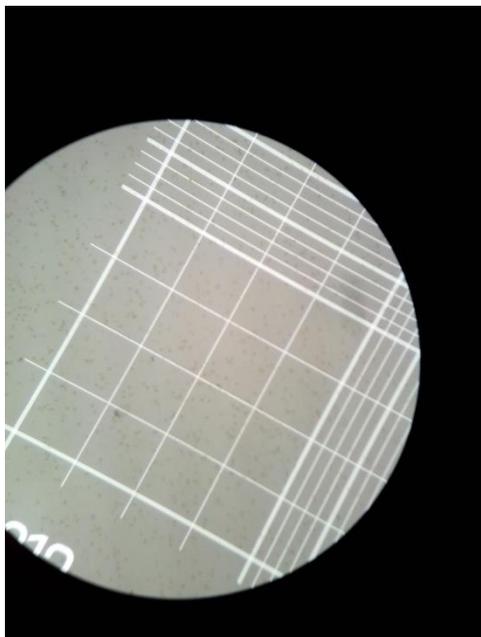
2.5.3.3 Conteo celular.

El conteo celular de la biomasa centrifugada se llevó a cabo por medio de microscopio utilizando una cámara de Neubauer. Se logró determinar que la concentración de células por mililitro utilizando una cámara de Neubauer fue:

Tabla 5. Conteo Celular

TIPO DE MICROALGA	CONCENTRACIÓN (Células/mL)
<i>Scenedesmus Quadricauda</i>	621.250.000,00
<i>Chlorella (nativa)</i>	157.000.000

Imagen 9. Conteo en cámara de Neubauer



2.5.3.4 Evaluación de proceso biológico para de tratamiento de DAM.

La evaluación del proceso biológico se llevó a cabo en recipientes de 3 litros con iluminación natural a condiciones estándar de iluminación y aireación. Las especies de microalgas con las cuales se evaluó el proceso fueron:

- Chorella (Nativa)*
- Scenedesmus Quadricauda.*

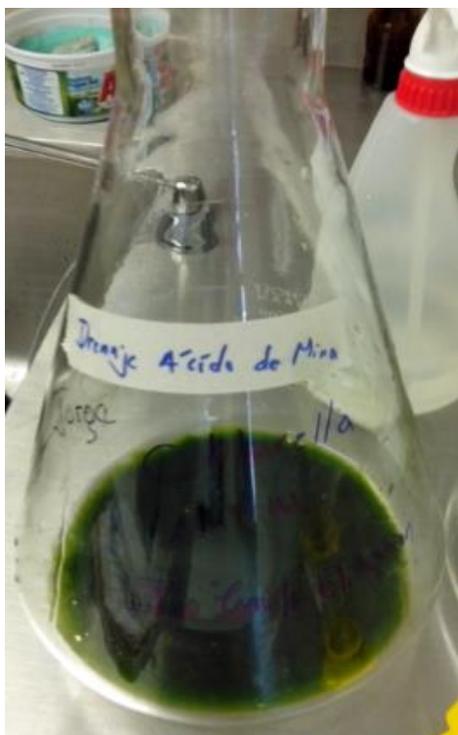
En cada recipiente se agregó una muestra con cuantificada de cultivo microalgal de la siguiente manera:

Tabla 6. Composición de cultivo para tratamiento.

Microalga	Erlenmeyer 1	Erlenmeyer 2	Erlenmeyer 3
<i>Chorella (Nativa)</i>	100%		50%
<i>Scenedesmus quadricauda.</i>		100%	50%

Se agregó el equivalente de 4.000.000 de células a cada Erlenmeyer.

Imagen 10. Introducción de biomasa a Erlenmeyer para tratamiento de DAM.



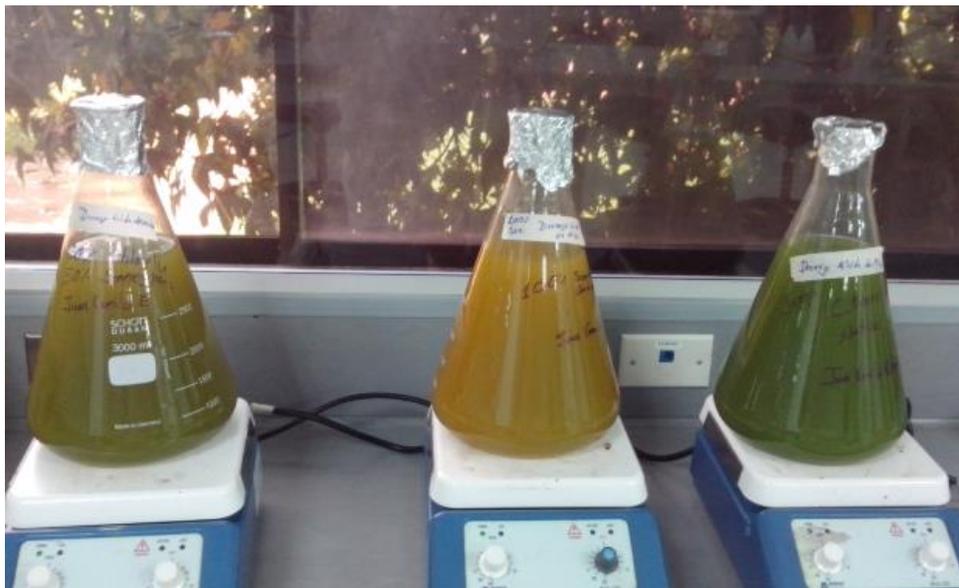
Una vez agregada la biomasa microalgal, se procedió a verter 3 litros de DAM al Erlenmeyer. Esta cantidad fue medida con una probeta de 1l.

Imagen 11. Preparación experimental para tratamiento de DAM.



Una vez agregado el DAM en el recipiente se coloca el recipiente sobre planchas de agitación magnética y se agita la mezcla de algas y DAM a agitación constante.

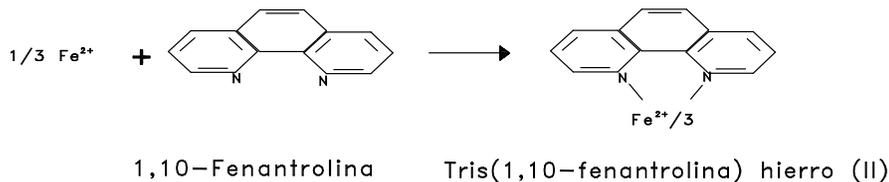
Imagen 12. Tratamiento de DAM por medio de microalgas



Se toma la absorbancia para la muestra inicial de cada Erlenmeyer. Seguidamente deja un tiempo de 24 horas en agitación y se toma la medición de la absorbancia para determinar la concentración final de hierro y sulfatos.

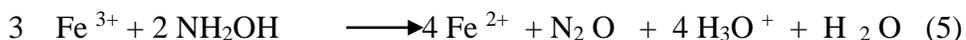
2.5.3.4.1 Determinación de Hierro Total.

El principio del método consiste en llevar una solución de hierro al estado ferroso mediante ebullición con ácido e hidroxilamina a un pH entre 3.2 a 3.3. Seguidamente se produce una reacción de quelación con fenantrolina para formar un complejo rojo naranja. La intensidad de esta solución sigue la ley de Lamber-Beer (Icontec, 2000). Si se mide la absorbancia usando celdas de paso óptico de 1 cm a 510 nm y realizando una interpolación con patrones de hierro puede determinarse la concentración de hierro en la muestra.



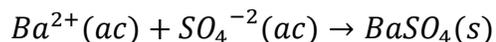
(Granada, 2014).

Para asegurarnos de que todo el hierro presente en la muestra se encuentra en forma de Fe^{2+} añadimos antes de la formación del complejo, un agente reductor como es el clorhidrato de hidroxilamina, el cual reduce el Fe^{3+} a Fe^{2+} según la reacción:



2.5.3.4.2 Determinación de Sulfatos.

El principio del método consiste en hacer precipitar los iones sulfato usando un medio de ácido acético con Cloruro de Bario y de esta forma obtener cristales de sulfato de Bario de tamaño uniforme. La absorbancia de la suspensión formada por el sulfato de Bario se mide a 420 nm y finalmente se mide la concentración de sulfatos usando una curva de calibración. (Icontec, 1999)



Los residuos de los desagües de la minería pueden contribuir en una gran cantidad de iones sulfatos por la oxidación de la piritita (Peña & Ortiz, 2009).. Para preparar la curva de calibración, bien se puede usar una solución de ácido sulfúrico 0,02 N o bien partir una solución de sulfato de sodio disolviendo 0,1479g de Sulfato de Sodio en 1000 ml de agua grado reactivo.

2.6.Cronograma de Actividades.

AÑO 2013		
Septiembre	Semana 1	Entrega Borrador anteproyecto al docente de Seminario Proyecto de grado
	Semana 2	Establecimiento de ubicación geográfica para desarrollo del trabajo
Octubre	Semana 1	Selección bibliográfica sobre filtración
	Semana 2	Selección bibliográfica sobre biosorción
	Semana 3	Recolección de muestra de biomasa en solución de DAM
	Semana 4	Diseño metodológico previo
Noviembre	Semana 1	Consulta de normatividad de vertimiento
	Semana 2	Establecimiento de niveles de eficiencia
	Semana 3	aislamiento de biomasa
	Semana 4	Identificación de biomasa
AÑO 2014		
Abril	Semana 2	Selección de métodos de caracterización fisicoquímica
	Semana 4	Evaluación de costos
Mayo	Semana 1	Ajuste metodológico

	Semana 2	Entrega primer borrador de anteproyecto
Julio	Semana 4	Entrega de anteproyecto a la facultad
Agosto	Semana 1	Purificación de cepa de Chlorella Nativa
	Semana 2	Preparación de medio de Cultivo de 3 litros para microalgas
	Semana 3	Cultivo de inóculo de microalgas
Septiembre	Semana 1	Traslado de cultivo a medio de 20 litros
Octubre	Semana 1	Proceso de decantación de biomasa
	Semana 2	Toma de muestra de DAM para tratamiento con microalgas
	Semana 3	Centrifugación de biomasa
Noviembre	Semana 1	Evaluación de proceso biológico de tratamiento
	Semana 2	Lavado de arenas
	Semana 3	Preparación de filtros de arena
	Semana 4	Pruebas iniciales
Diciembre	Semana 3	Evaluación de proceso físico de tratamiento
Enero	Semana 4	Redacción de documento final de trabajo de grado
Marzo	Semana 1	Entrega de documento de trabajo de grado a los directores de proyecto

2.7 Análisis económico del proyecto.

El valor total del desarrollo del proyecto asciende a un valor total de \$3'820.000. En la estructura de financiación del Proyecto participarán las empresas Maq&Equipos LTDA y la Universidad de La Sabana. Maq&Equipos LTDA financiará recursos técnicos por un valor de \$ 2'000.000; La Universidad de la Sabana financiará los recursos humanos por un valor de \$1'820.000.

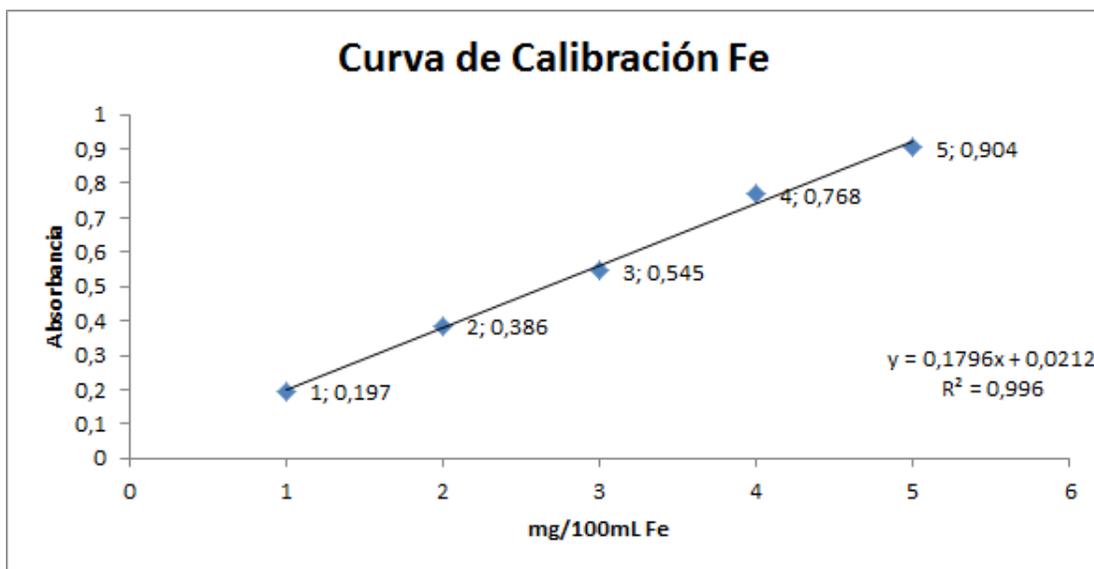
Tabla 2			
RECURSOS TÉCNICOS	<i>Financiado por Maq&Equipos LTDA</i>		
Ítem	Cantidad	Valor Unitario	Subtotal
KIT de análisis de agua	2	\$ 300.000	\$ 600.000
Accesorios de construcción	1	\$ 300.000,00	\$ 300.000,00
Pruebas de gravimetría	20	\$ 10.000	\$ 200.000
Transportes	15	\$ 60.000,00	\$ 900.000,00
		SUBTOTAL	\$ 2'000.000
RECURSOS HUMANOS	<i>Financiado por Universidad de La Sabana</i>		
Hora Técnico de laboratorio	20	\$ 15.000,00	\$ 300.000,00
Hora director Tesis	20	\$ 40.000,00	\$ 800.000,00
Hora investigador pregrado	60	\$ 12.000,00	\$ 720.000,00
		SUBTOTAL	\$ 1.820.000,00
		TOTAL	\$ 3'820.000,00

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Resultados.

3.1.1 Curva de Calibración de hierro.

Curva de calibración hierro



Gráfica 1. Curva de calibración para determinación de concentración de hierro.

La curva de calibración de hierro relaciona la absorbancia del hierro por cada mg de Fe en 100 ml de Solución. Esta curva de calibración se realizó utilizando una solución estándar de Sulfato ferroso amoniacal hexahidratado. El recíproco de la pendiente ($1/x$) se conoce como el factor de calibración el cual relaciona la concentración y la absorbancia de los estándares. Así pues para determinar la concentración de hierro en la muestra inicial de DAM se llevó un procedimiento similar al de los estándares y se calculó la concentración. De este modo la fórmula que nos permite calcular la concentración en la muestra de DAM es la siguiente:

$$\text{Hierro Total } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 1000(A - A_0) \frac{F}{V} \quad (6)$$

Dónde:

F=Factor de calibración, mg de hierro /absorbancia. 100ml.

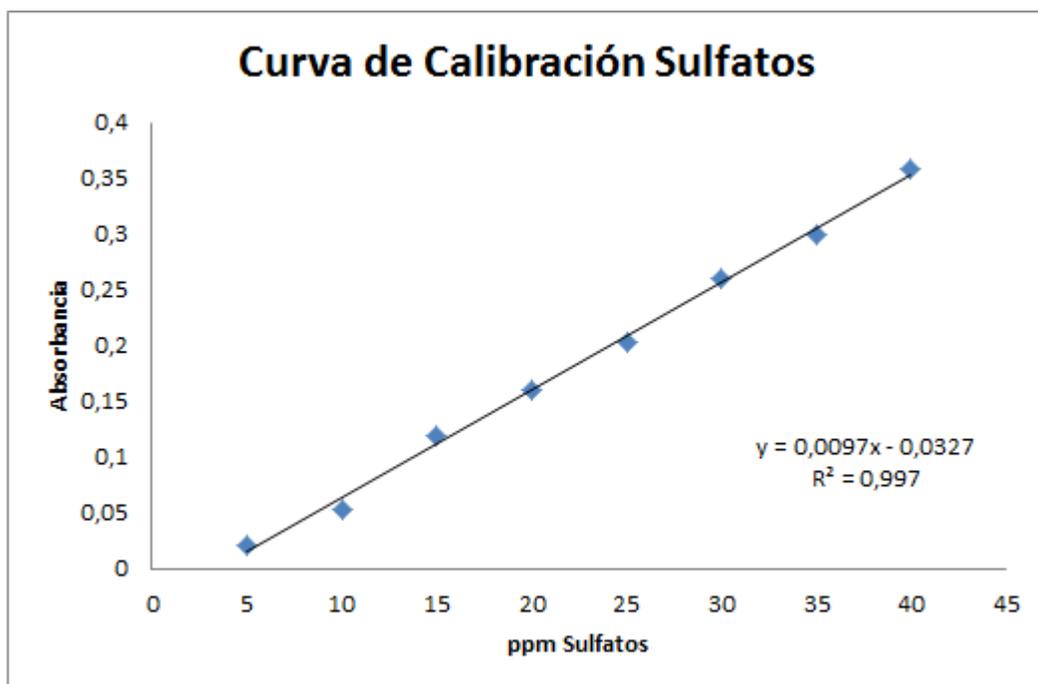
A= Absorbancia de la muestra

A0=Absorbancia del blanco de reactivos.

V=ml de muestra original presentes en 100 mL de solución

3.1.2 Curva de Calibración de sulfatos.

Curva de calibración sulfatos



Gráfica 2. Curva de calibración para determinación de sulfatos

Curva de calibración para determinación de sulfatos se obtiene similarmente a la curva de calibración para hierro. La curva de calibración de sulfatos se construye a partir de un estándar de sulfato de sodio Na_2SO_4 . Para el cálculo de la concentración de sulfatos de la muestra inicial y finales del DAM se tiene la siguiente formula:

$$\text{Sulfato } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{\text{mg } SO_4^{-2}}{\text{mL de muestra}} \times 1000 \quad (7)$$

En donde los $\text{mg } SO_4^{-2}$ se obtienen de forma directa de la curva de calibración. Dado que los mL de muestra corresponden a la misma cantidad de los estándares, se tiene

que para la determinación de la concentración de iones sulfato se toma directamente de la relación mostrada en la curva de calibración entre absorbancia y ppm de sulfatos.

3.1.3 Concentraciones iniciales de hierro y Sulfatos del DAM.

Cabe resaltar que debido a las altas concentraciones de iones hierro presentes en el DAM, se procedió a realizar una dilución $d= (1/20)$ para poder utilizar efectivamente la curva de calibración en la determinación de la concentración de hierro.

Para efectos del cálculo de la concentración de hierro se tuvo un volumen de muestra $V= 50\text{ml}$ y un factor de calibración $F=5,56$

HIERRO

Tabla 7. Concentración inicial de hierro

	Absorbancia	Concentración de muestra diluida	Concentración de muestra DAM	Promedio (ppm)
Replica 1	0,016	1,78	35,58	36,92
Replica 2	0,016	1,78	35,58	
Replica 3	0,018	2,00	40,03	
Replica 4	0,017	1,89	37,81	
Replica 5	0,016	1,78	35,58	
Desviación estándar				1,99

SULFATOS

Cabe resaltar que debido a las altas concentraciones de iones hierro presentes en el DAM, se procedió a realizar una dilución $d= (1/200)$. La concentración en ppm o mg/L se obtuvo relacionando la absorbancia con la concentración obtenida

Tabla 8. Concentración inicial de sulfatos

	Absorbancia inicial	Concentración de muestra diluida	Concentración de muestra de DAM	Promedio
Replica 1	0,156	16,08247423	3216,494845	
Replica 2	0,155	15,97938144	3195,876289	
Replica 3	0,171	17,62886598	3525,773196	
Replica 4	0,172	17,73195876	3546,391753	
Replica 5	0,167	17,21649485	3443,298969	3385,57
Desviación estándar				168,39

Así pues se tiene que en promedio las concentraciones iniciales de hierro y sulfatos son de 36,92 ppm y 3385,57ppm respectivamente.

3.1.4 Concentraciones de hierro en el DAM tratado.

Una vez obtenida la concentración inicial de hierro y sulfatos, se procedió a agregar la biomasa de tratamiento. Se realizaron 5 réplicas para cada prueba de las diferentes combinaciones de biomasa de la siguiente manera:

Prueba 1: Biomasa compuesta 100% de *Chlorella Vulgaris* nativa.

Prueba 2: Biomasa compuesta al 100% de *Scenedesmus Quadricauda*.

Prueba 3: Biomasa compuesta por *Chlorella Vulgaris* nativa y *Scenedesmus Quadricauda* en proporción 50%/50%.

Tabla 9. Absorción de hierro por *Chlorella Vulgaris*

	Absorbancia	Concentración de muestra diluida	Concentración de muestra DAM	Promedio
réplica 1	0,001	0,11	2,22	4,89
réplica 2	0,002	0,22	4,45	
réplica 3	0,003	0,33	6,67	
réplica 4	0,003	0,33	6,67	
réplica 5	0,002	0,22	4,45	
Desviación estándar				0,22

Tabla 10. Absorción de hierro por *Scenedesmus quadriculada*

	Absorbancia	Concentración de muestra diluida	Concentración de muestra DAM	Promedio
réplica 1	0,001	0,11	2,22	2,67
réplica 2	0,002	0,22	4,45	
réplica 3	0,001	0,11	2,22	
réplica 4	0,001	0,11	2,22	
réplica 5	0,001	0,11	2,22	
Desviación estándar				0,99

Resultados concentración de hierro en prueba 3, 50%/50%.

Tabla 11. Absorción de hierro por combinación 50% *Chlorella* /50%.*Scenedesmus*

	Absorbancia	Concentración de muestra diluida	Concentración de muestra DAM	Promedio
réplica 1	0,004	0,44	8,90	11,56
réplica 2	0,005	0,56	11,12	
réplica 3	0,005	0,56	11,12	
réplica 4	0,006	0,67	13,34	
réplica 5	0,006	0,67	13,34	
Desviación estándar				0,99

3.1.4 Concentraciones de Sulfatos en el DAM tratado.

Una vez obtenida la concentración inicial de hierro y sulfatos, se procedió a agregar la biomasa de tratamiento. Se realizaron 5 réplicas para cada prueba de las diferentes combinaciones de biomasa de la siguiente manera:

Tabla 12. Absorción de Sulfatos por *Scenedesmus Quadricauda*

	Absorbancia inicial	Concentración de muestra diluida	Concentración de muestra de DAM	Promedio (ppm)
réplica 1	0,161	16,59793814	3319,588	
réplica 2	0,156	16,08247423	3216,495	
réplica 3	0,162	16,70103093	3340,206	
réplica 4	0,162	16,70103093	3340,206	
réplica 5	0,162	16,70103093	3340,206	3311,34
Desviación estándar				53,77

Tabla 13. Absorción de Sulfatos por *Chlorella Vulgaris*.

	Absorbancia inicial	Concentración de muestra diluida	Concentración de muestra de DAM	Promedio
réplica 1	0,165	17,01030928	3402,062	
réplica 2	0,155	15,97938144	3195,876	
réplica 3	0,155	15,97938144	3195,876	
réplica 4	0,155	15,97938144	3195,876	
réplica 5	0,155	15,97938144	3195,876	3237,11
Desviación estándar				15,98

Tabla 14. Absorción de Sulfatos por Combinación 50% *Chlorella* /50%.*Scendesmus*

	Absorbancia inicial	Concentración de muestra diluida	Concentración de muestra de DAM	Promedio
réplica 1	0,159	16,39175258	3278,350515	
réplica 2	0,155	15,97938144	3195,876289	
réplica 3	0,154	15,87628866	3175,257732	
réplica 4	0,154	15,87628866	3175,257732	
réplica 5	0,151	15,56701031	3113,402062	3187,63
Desviación estándar				59,40

3.1.5 Resumen proceso físico de tratamiento.

Se realizó el análisis de sólidos suspendido totales a una muestra de DAM tomada a la salida de una mina de carbón en Boyacá. La muestra reportó una concentración de SST de 78 mg/L. La tabla 16 muestra la concentración de SST del DAM tratado por los diferentes tipos de arena junto con su respectivo flujo volumétrico. Los análisis de SST fueron realizados por el laboratorio conocer LTDA.

Tabla 15. Resumen Proceso físico de tratamiento

Referencia material	Concentración final SST en mg/L	Flujo Volumétrico L/s
Malla 4-8	71	0,030
Malla 8-12	38	0,030
Malla 12-20	59	0,013
Malla 20-30	62	0,020

3.2 Discusión de resultados.

3.2.1 Absorción de hierro y Sulfatos.

En general el proceso biológico de absorción tuvo un alto rendimiento con respecto al hierro, pero tuvo un casi nulo efecto en cuanto a la concentración de iones sulfatos. Se tiene que la normativa ambiental de la EPA exige en cuanto al vertimiento del DAM a cuerpos de agua una concentración inferior a las 7 ppm de hierro total. Se Partió de una concentración de 36,92 ppm de Hierro.

Tabla 16. Resultados proceso biológico de tratamiento.

<i>Parámetro</i>	<i>ANÁLISIS INICIAL</i>		<i>TRATAMIENTO BIOLÓGICO</i>			
	<i>DAM</i>	<i>Chlorella 100%</i>	<i>% de remoción</i>	<i>chlorella 50%-Scenedesmus 50%</i>	<i>% de remoción</i>	<i>Sc</i>
<i>Hierro Total (ppm)</i>	36,92	4,89	86,75	11,56	68,68	
<i>Sulfatos (ppm)</i>	3385,56	3237,11	4,38	3187,63	5,85	

En general los tipos de biomasa *Chlorella* y *Scenedesmus* tuvieron la capacidad de remover el 86,75% y 92,77% de hierro respectivamente obteniéndose un DAM con una concentración inferior a las 7 ppm exigidos por la norma de vertimiento de la EPA. La combinación de biomasa de *chlorella* y *Scenedesmus* demostró tener una menor eficiencia para la remoción de hierro, esto pudo deberse a una competencia realizada entre los dos tipos de biomasa que ocasionó una absorción efectiva por cada tipo de célula. Con la combinación de las especies *chlorella* y *Scenedesmus* no fue posible dar cumplimiento a la normatividad de la EPA.

La afinidad de la biomasa utilizada por el hierro puede estar asociada por la presencia de grupos funcionales hidroxilo y carboxilo con los cuales están presentes en la pared celular de las algas verdes (Ardila Forero, 2012). Se han realizado estudios de biosorción de metales pesados en donde se propone la formación de complejos electrostáticos entre los grupos funcionales carboxilo e hidroxilo con metales pesados en algas de la especie *Chlorella* (Jiang, 2012). Similarmente la especie *Scenedesmus* posee grupos funcionales tales como aminos, carboxilos, sulfidrilos, tioles y otros con afinidad a los iones de metales pesados (Cetinkaya, 1998). La poca afinidad de las microalgas por la absorción de iones sulfato se puede deber a la naturaleza aniónica de los grupos funcionales presentes en la pared celular de las microalgas.

3.2.2 Remoción de Sólidos suspendidos totales (SST)

Tabla 17. Resultados proceso físico de tratamiento.

<i>Parámetro</i>	<i>Análisis inicial</i>	<i>TRATAMIENTO FÍSICO</i>							
		<i>malla 4-8</i>	<i>% de remoción</i>	<i>malla 8-12</i>	<i>% de remoción</i>	<i>malla 12-20</i>	<i>% de remoción</i>	<i>malla 20-30</i>	<i>% de remoción</i>
<i>Sólidos Suspendidos Totales (ppm)</i>	<i>78,00</i>	<i>71,00</i>	<i>8,97</i>	<i>39,00</i>	<i>50,00</i>	<i>59,00</i>	<i>24,36</i>	<i>62,00</i>	<i>9,00</i>

A excepción de la malla 4-8 todos los demás tipos arenas tuvieron un efecto en la remoción de SST tal que se cumplió con el requisito de SST el cual deber ser inferior a 70 ppm. Se destaca la arena de malla 8-12 como el material óptimo para llevar a cabo el proceso físico de tratamiento debido a su potencial removedor de SST que tuvo una eficiencia de aproximadamente del 50% y un flujo volumétrico de 0,030 L/s. Aunque aparentemente puede ser más efectivo utilizar arenas de menor diámetro como las mallas 12-20 y 20-30 para remover sólidos su contenido de sólidos en este material reduce su potencial removedor. Estos sólidos presentes en las arenas de menor diámetro están presentes desde su extracción en los yacimientos minerales y se adicionan a los sólidos presentes en el DAM reduciendo su eficiencia.

4. CONCLUSIONES

Al finalizar este trabajo podemos concluir qué:

- Es posible utilizar microalgas en procesos de biosorción para remover iones de hierro presentes en el DAM dando cumplimiento a los requisitos legales estipulados por la EPA en cuando a la concentración de hierro total presentes en el DAM para vertimientos en cuerpos de agua.
- Las microalgas de la especie *chlorella* y *scenedesmus quadricauda* pertenecientes a la división chlorophyta tienen un gran potencial en la remoción de iones hierro cuando la biomasa de absorción está compuesta por una sola especie a la vez.
- La biomasa de microalgas de la división *Chlorophyta* tienen un efecto prácticamente nulo en la absorción de iones sulfato debido probablemente a la composición química de la membrana celular de las microalgas. Ya que por lo general la membrana celular de estas microalgas contiene por lo general aniones en sus grupos funcionales.
- Es posible dar cumplimiento a la normativa para SST establecida por la EPA utilizando arena para la remoción de SST. La arena de referencia malla 8-12 presenta una eficiencia de cerca de 50% en la remoción de SST, lo cual representa un gran potencial para la remoción de SST presentes en el DAM.
- En general el sistema de tratamiento físico y biológico podría representar una alternativa económica y eficiente para ser utilizada en los procesos de tratamiento de DAM proveniente de los proyectos mineros a pequeña y mediana escala.

5. BIBLIOGRAFIA.

- [1] FEDESARROLLO. (2011). Pequeña y mediana minería de carbón del interior del país: alternativa de comercialización y financiación a partir de la conformación de alianzas estratégicas.
- [2] FENALCARBÓN. (2011). Viabilidad minera bajo un cambiante entorno económico y socio ambiental: Viabilidad minera bajo un cambiante entorno económico y socio ambiental: 1st (2013).
- [3] Freitas, A. P. P., Schneider, I. A. H., & Schwartzbold, A. (2011). Biosorption of heavy metals by algal communities in water streams affected by the acid mine drainage in the coal-mining region of Santa Catarina state, Brazil. *Minerals Engineering*, 24(11), 1215-1218. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.04.013>
- [4] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2013). Coal mining effluent guidelines. Retrieved 11/19, 2013, from <http://water.epa.gov/scitech/wastetech/guide/coal/>.
- [5] Ministerio De Medio Ambiente Y Desarrollo Sostenible. Decreto 3930 de 2010, (2010).
- [6] Peña, J., & Ortiz, W. (2009). Manejo de drenajes ácidos de mina. Universidad Industrial de Santander.
- [7] Vian, A. (1976). Elementos de Ingeniería Química. Madrid : Aguilar S.A Ediciones.
- [8] Plaza Cazón, J. (2012). Remoción de metales pesados empleando algas marinas . Buenos Aires, Argentina: UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA .
- [9] UNIVERSIDAD DE GRANADA. (s.f.). Departamento de Química Analítica. Recuperado el 15 de 09 de 2014, de www.ugr.es/~clinares/webfarm/Practicas/practica3.doc
- [10] UNIVERSIDAD DE GRANADA. (s.f.). *Departamento de Química Analítica*. Recuperado el 15 de 09 de 2014, de www.ugr.es/~clinares/webfarm/Practicas/practica3.doc
- [11] University, T. (1 de 12 de 2014). *Utex the culture Collection of algae*. Obtenido de <http://www.utex.org/>
- [12] U.S Publishing Government Office. (12 de 05 de 2015). *Code of Federal Regulations (annual edition)*. Obtenido de <http://www.gpo.gov/fdsys/browse/collectionCfr.action?collectionCode=CFR>

- [13] Areco, M. d. (2011). Métodos alternativos para el tratamiento de la contaminación ambiental por metales pesados. Buenos Aires, Argentina: Biblioteca Digital FCEN-UBA.
- [14] Orellana, J. (12 de 04 de 2015). *Tratameinto de Aguas*. Obtenido de Universidad Tecnológica Nacional:
http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf
- [15] Vullo, D. (2003). MICROORGANISMOS Y METALES PESADOS: UNA INTERACCIÓN EN BENEFICIO DEL MEDIO AMBIENTE. *Química Viva*.
- [16] Cañizares, R. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa. Mexico: Revista Latinoamericana de microbiología.
- [17] Icontec. (19 de 01 de 2000). NTC 4754. *Determinación de Hierro (Método de la fenatrolina)*. Colombia: Icontec.
- [18] Dane. (2003). *Sistema de Información del Medio Ambiente*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf
- [19] Icontec. (24 de 11 de 1999). NTC 4708. *Determinación de Sulfato (Método turbidimétrico)*. Colombia: Icontec.
- [20] Icontec. (28 de 11 de 2001). NTC 897. *Determianción el contenido de sólidos*. Colombia: Icontec.
- [21] Ardila Forero, L. (2012). Medición de la capacidad de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus* para la remoción de cromo de aguas de curtiembre. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [22] Jiang, J. (2012). Document Biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by *Chlorella pyrenoidsa* and its influential factors. China: Zhejiang University of Technology.
- [23] Cetinkaya, D. (1998). A comparative study on heavy metal biosorption characteristics of some algae. Ankara, Turquía: Ankara University.
- [24] Quiñones Villanueva, A. (19 de 04 de 2014). *Taller de Mecánica de suelos*. Obtenido de http://www.lms.uni.edu.pe/EXPOSICIONES/Granulometria_Tamizado_ATQ.pdf

[25] Medina, H. (14 de 1 de 2011). Agua contaminada acabó con las truhas en Socotá. *El tiempo*.