

**PROTOTIPO DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN ABASTECIDA CON
ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN
LA INDUSTRIA MINERA**

**PABLO STEVEN RUIZ BELLO
ID: 000253403**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ
2017**

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS

**PROTOTIPO DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN ABASTECIDA CON
ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN
LA INDUSTRIA MINERA**

**Trabajo de Grado para optar al título
Ingeniero Industrial**

PABLO STEVEN RUIZ BELLO

ID: 000253403

Qco. Esp. Mg. Ing. FREDDY LEONARD ALFONSO MORENO

**DIRECTOR TRABAJO DE GRADO
COORDINADOR DEL SEMILLERO DE PRODUCCIÓN Y USO DE ENERGÍAS
ALTERNATIVAS EN PROCESOS INDUSTRIALES - DIPIERA**

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

BOGOTÁ

2017

DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD

“El presente trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial de la Corporación Universitaria Minuto de Dios no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de calificación alguna, ni de título, o grado diferente o adicional al actual. El trabajo de grado es resultado de la investigación del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas”

Pablo Steven Ruiz Bello

ID: 000253403

C.C. 1.015.448.947

Nota de Aceptación

Firma Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Ciudad y Fecha (día, mes, año)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por brindarme su apoyo incondicional para salir adelante en este camino, por siempre confiar en mis habilidades y conocimientos, por estar siempre dispuestos a ayudarme y por su inmensa paciencia.

Al profesor Freddy Alfonso, por ser un excelente guía al compartirme sus conocimientos y experiencia para desarrollar esa investigación.

A mi familia en general, por ayudarme a encontrar fuerzas para seguir día tras día.

CONTENIDO

1. OBJETIVOS.....	27
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	27
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
2. MARCO TEÓRICO	28
2.1. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN.....	28
2.2. ELECTROQUÍMICA.....	28
2.3. ELECTROCOAGULACIÓN.....	29
2.3.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS	30
2.3.2. APLICACIONES	31
2.4. ELECTROFLOCULACIÓN Y ELECTROFLOTACIÓN	31
2.5. AGUAS RESIDUALES.....	32
2.5.1. AGUAS RESIDUALES DE LA MINERÍA DE CARBÓN.....	33
2.6. ANTECEDENTES.....	33
2.6.1. ANTECEDENTES EN COLOMBIA	33
2.6.2. ANTECEDENTES ALREDEDOR DEL MUNDO.....	34
2.7. ENERGÍAS RENOVABLES	36
2.7.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	37
3. METODOLOGÍA	40
3.1. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	41
3.2. MONTAJE EXPERIMENTAL	42
3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROTOTIPO	44
4.2. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL AFLUENTE	47
4.3. TRATAMIENTO CON ELECTROCOAGULACIÓN DEL AGUA RESIDUAL	48
4.4. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA.....	49
5. CONCLUSIONES	57

6. RECOMENDACIONES.....	58
7. REFERENCIAS	59

LISTA DE IMAGENES

IMAGEN 1. TANQUE DE SEDIMENTACIÓN DE LA MINA DE CARBÓN	41
IMAGEN 2. DISPOSICIÓN DE LOS ELECTRODOS DENTRO DEL ELECTROCOAGULADOR.....	42
IMAGEN 3. PROTOTIPO CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	45
IMAGEN 4. PROTOTIPO CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	46
IMAGEN 5. PROCESO DE TRATAMIENTO DEL AGUA CON EL PROTOTIPO	48
IMAGEN 6. AGUA RESIDUAL DE LA MINA DE CARBÓN DESPUÉS DEL TRATAMIENTO.....	55

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. ANTECEDENTES EN COLOMBIA	33
TABLA 2. ANTECEDENTES EN EL MUNDO	34
TABLA 3. VENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.	37
TABLA 4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS GENERALES DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	39
TABLA 5. CARACTERIZACIÓN AGUA RESIDUAL MINA DE CARBÓN.....	48
TABLA 6. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA PROCESADA	49

LISTA DE GRÁFICOS

GRAFICO 1. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO SÓLIDOS TOTALES	50
GRAFICO 2. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO SÓLIDOS SEDIMENTADOS...	50
GRAFICO 3. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO PH	51
GRAFICO 4. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO TURBIDEZ	51
GRAFICO 5. COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DUREZA CÁLCICA Y DUREZA TOTAL	52
GRAFICO 6. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO SULFATOS	53
GRAFICO 7. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	53
GRAFICO 8. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO O ₂ DISUELTO.....	54
GRAFICO 9. COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS ESTUDIADOS Y SUS VARIACIONES.....	54

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN DE DOS ELECTRODOS.....	29
FIGURA 2. ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	40
FIGURA 3. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CELDA DE EC CON ELECTRODOS CONECTADOS EN PARALELO.	44
FIGURA 4. DIMENSIONES Y DISPOSICIONES DE ÁREAS DEL REACTOR.....	45

RESUMEN

El artículo plantea cómo la técnica de electrocoagulación es un mecanismo apropiado para reducir la contaminación de las aguas residuales generadas en la industria minera, en particular la minería de carbón al emplearse en un prototipo de celda electrolítica abastecida con energía fotovoltaica y diseñada con electrodos de aluminio y hierro, que interactúan al paso de una corriente generada de manera fotovoltaica que provoca la formación de flóculos que se sedimentan atrapando los contaminantes contenidos en las aguas residuales. El diseño y la construcción del prototipo de celda permitió evaluar analíticamente la calidad del agua procesada respecto a los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua establecidos para vertimientos en Colombia, encontrando que se generan cambios significativos en la turbiedad, dureza, demanda química de oxígeno (DQO) y oxígeno disuelto entre otros parámetros, mejorando la calidad del agua y permitiendo la reutilización del recurso hídrico por parte de las comunidades asociadas a la actividad minera al involucrarse en actividades alternas como la agricultura, que propenden por el bienestar al tener un alto impacto sociocultural.

El uso de la energía solar en el sistema fotovoltaico hace del prototipo un artefacto autosuficiente a largo plazo que permite el aprovechamiento de los recursos renovables y acerca las tecnologías limpias a la cotidianidad del sector industrial.

Palabras clave:

Tratamiento de aguas residuales. Electrocoagulación. Mina de carbón. Energía fotovoltaica. Demanda Química de Oxígeno.

ABSTRACT

The article discusses how the electrocoagulation technique is an appropriate mechanism to reduce the pollution of wastewater generated in the mining industry, particularly coal mining when used in a prototype electrolytic cell supplied with photovoltaic energy and designed with aluminum and iron electrodes, which interact with the passage of a photovoltaic generated current that causes the formation of flocs that settle by trapping the contaminants contained in the wastewater. The design and construction of the cell prototype allowed the analytical evaluation of the quality of the water processed with respect to the physicochemical parameters of water's quality established for shedding in Colombia, finding that significant changes in turbidity, hardness, Chemical Oxygen Demand (COD) and dissolved oxygen among other parameters, improving the water's quality and allowing the recycling of the water resource by the communities associated to the mining activity by being involved in alternative activities such as agriculture that promote welfare by having a high socio-cultural impact.

The use of solar energy in the photovoltaic system makes the prototype a self-sufficient long-term device that allows the use of renewable resources and brings clean technologies to the daily life of the industrial sector.

Key words:

Sewage treatment. Electrocoagulation. Coal mine. Photovoltaic energy. Chemical Oxygen Demand (COD).

INTRODUCCIÓN

Se presenta en este documento una propuesta de contenido y metodología, con el fin de construir un prototipo de una celda de electrocoagulación que se abastezca con energía fotovoltaica, funcional para el tratamiento de aguas residuales en la industria de la minería, particularmente los drenajes de mina de carbón, problemática que será estudiada en el municipio de Cucunubá –Colombia (municipio donde la economía está basada en la minería de carbón). El diseño de la celda de electrocoagulación permite el tratamiento de estas aguas residuales, al ser una alternativa para el rescate del agua en vista la de problemática mundial de escasez del recurso agua y sus diferentes repercusiones al medio ambiente, como ocurre en los drenajes residuales de las minas de carbón que son contaminados con residuos procedentes del proceso de oxidación natural de la pirita, caracterizados por niveles bajos de pH, alto contenido de sulfatos y metales como el hierro, zinc y manganeso (Pantoja, 2012). Debido al contenido de estas aguas, se tienen unos impactos ambientales que deben ser tenidos en cuenta como consecuencia directa de la producción minera y aunque se han estudiado ciertos tratamientos para las aguas residuales, ciertamente no son implementados ya que suponen una implementación compleja y costosa (Martínez, 2007).

La electrocoagulación (EC) se ha estudiado como método alternativo para el tratamiento de aguas residuales y así poder solucionar los inconvenientes presentados con las tecnologías de tratamiento convencionales. Merzouk et al (2008) demostraron que se pueden alcanzar tasas de extracción de hasta el 95% de los contaminantes con tiempos de tratamiento por debajo de los 15 minutos. Por otra parte, para el proceso de EC deben tenerse en cuenta diferentes variables que tendrán influencia directa en la efectividad del proceso, la EC está acotada por una serie de parámetros, como la concentración y composición del contaminante, el pH, la conductividad, el material del electrodo y la densidad de corriente (Heidmann & Calmano, 2007). Sin embargo, aunque se muestran excelentes resultados en cuanto a niveles de remoción, la técnica ha tenido ciertos inconvenientes para su implementación, debido a la inversión necesaria para su montaje, aunque en la

bibliografía se afirma que los costos operativos del proceso de EC son más bajos en comparación a los procesos físico-químicos convencionales. Los tratamientos electroquímicos son recomendados para plantas de pequeño tamaño por su sencillez de operación (Martínez, 2007). Algunos de los ejemplos de aplicación de la EC a casos reales son:

- Tratamiento de aguas residuales de los restaurantes (Chen et al, 2000; Qin et al, 2013)
- Remoción de colorantes de las aguas residuales de la industria textil (Daneshvar et al, 2002; Can et al, 2005)
- Aguas residuales urbanas (Jiang et al, 2002)
- Remoción de colorantes en soluciones acuosas de la industria de alimentos, farmacéuticos y productos cosméticos (Arango, 2011)

Esta investigación utiliza la energía solar para proporcionar la energía suficiente para el correcto funcionamiento de la celda de EC y de esta manera solventar el consumo energético del proceso, lo que se reflejaría en una mejora en términos de costo-beneficio para su implementación.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo a escala de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de las minas de carbón en el municipio de Cucunubá, Cundinamarca. De esta manera poder generar un acercamiento a una propuesta metodológica de diseño y construcción de un mecanismo para el tratamiento industrial de estos afluentes industriales.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar una revisión bibliográfica de la evidencia científica existente sobre este tipo de tratamientos para diferentes tipos de aguas residuales.
- Diseñar un prototipo para el tratamiento a escala de las aguas residuales de las minas de carbón ubicadas en el municipio de Cucunubá.
- Construir un prototipo con base en los diseños preliminares para el tratamiento a escala de las aguas residuales de las minas de carbón ubicadas en el municipio de Cucunubá.
- Caracterizar el agua residual tomada de las minas de carbón, las cuales son procedentes de los drenajes cotidianos y las actividades productivas de la mina.
- Realizar el proceso experimental con el prototipo y las aguas residuales de la mina de carbón para evidenciar los resultados obtenidos con el proceso de electrocoagulación.
- Evaluar los resultados obtenidos posteriores al tratamiento con la celda de electrocoagulación, contrastando la caracterización del agua sin tratar con la caracterización del agua procesada en la celda de electrocoagulación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

Aunque este concepto concibe una interpretación diferente dependiendo del autor que lo maneje, se han hecho diferentes esfuerzos por llegar a un consenso entre la diversidad de conceptos. De acuerdo con Aguilar et al (2002) se concibe en general la coagulación como el proceso por el cual los componentes de una suspensión o disolución estable son desestabilizados por cuenta de una superación de las fuerzas que los mantienen en un estado de estabilidad. Generalmente, el proceso de coagulación se da por la agregación de sustancias químicas al agua que producen una reducción de las fuerzas repelentes (las mismas que estabilizan las partículas coloidales) lo que permite la formación de partículas de mayor tamaño y mayor densidad.

En relación con la coagulación, existe otro proceso inherente a este, llamado floculación. La floculación es un proceso por el que las partículas desestabilizadas se unen para formar grandes partículas estables o aglomeradas (Aguilar et al, 2002). Esta tiene como objetivo básico reunir flóculos para formar partículas menos densas que el agua y de esta forma compactarse, lo que genera una mayor facilidad a la hora de la sedimentación y la filtración.

2.2. ELECTROQUÍMICA

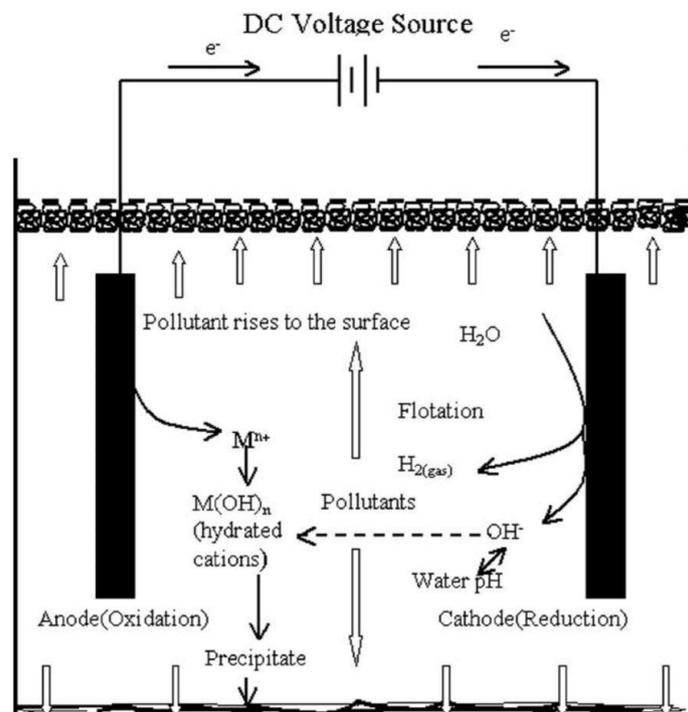
La electroquímica se dedica fundamentalmente al estudio de las reacciones químicas que dan origen a la producción de una corriente eléctrica o que son producidas por el paso de una corriente eléctrica (Hepler, 1968). Adicionalmente, la electroquímica también tiene otros campos de estudio, desde la conductividad eléctrica de diferentes sustancias, pasando por las disoluciones de electrolitos, hasta llegar a la conductividad de los sólidos y las sales fundidas.

La electroquímica ha cobrado gran relevancia en el tratamiento de aguas residuales. De acuerdo con Arango & López (2008) las tecnologías electroquímicas más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales son: electrodisposición, electroflotación, electrooxidación y electrocoagulación.

2.3. ELECTROCOAGULACIÓN

Es un método simple y eficiente para el tratamiento de aguas residuales. Se ha probado con éxito para el tratamiento de agua potable, aguas residuales textiles, aguas residuales de arena de alquitrán y petróleo de esquisto, las aguas residuales de la alfombra, las aguas residuales urbanas, aguas residuales de fibra química y emulsión de agua y aceite (Chen et al, 2000). La electrocoagulación también se ha utilizado para eliminar suspensiones de arcilla, bentonita y colorantes de las aguas residuales de algunos procesos en particular. Este proceso se caracteriza por una tasa alta de eliminación de contaminantes en un tiempo rápido, el tamaño práctico del equipo ajustable a las necesidades del tratamiento, la simplicidad en la operación, bajo capital y coste operativo; demostrando ser eficaz en el tratamiento de las aguas residuales que contienen pequeñas y ligeras partículas en suspensión.

Figura 1. Diagrama esquemático de una celda de electrocoagulación de dos electrodos.



Fuente: Mollah et al (2004).

Una celda de electrocoagulación simple está hecha con un ánodo y un cátodo (Figura 1). Cuando un potencial es aplicado por una fuente de poder externa, el material del ánodo sufre una oxidación, mientras que el cátodo se someterá a reducción (Mollah et al, 2004). Las reacciones electroquímicas con un metal M como ánodo pueden

resumirse así:

En el ánodo

- $M_{(s)} \rightarrow M_{(aq)}^{n+} + ne^{-}$
- $2H_2O_{(l)} \rightarrow 4H^{+}_{(aq)} + O_{2(g)} + 4e^{-}$

En el cátodo

- $M_{(aq)}^{n+} + ne^{-} \rightarrow M_{(s)}$
- $2H_2O_{(l)} + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^{-}$

Si electrodos de hierro o aluminio son usados, los iones generados de $Fe_{(aq)}^{3+}$ o $Al_{(aq)}^{3+}$ se someterán a reacciones espontáneas para producir hidróxidos (Mollah et al, 2004).

2.3.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La electrocoagulación es un proceso que presenta una serie de ventajas y desventajas notables. En relación con lo expresado por Arango, Restrepo, & Garcés (2006) las ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación son las siguientes:

Ventajas del proceso de electrocoagulación:

- Los costos operativos son menores respecto con otros procesos convencionales,
- Requiere de equipos simples y de fácil operación,
- Elimina el alto requerimiento de productos químicos y su respectivo almacenamiento,
- Se produce menor cantidad de lodos y estos son más compactos, lo que disminuye sustancialmente los inconvenientes en el proceso de disposición y sus derivados,
- Generación de flóculos más grandes en comparación con la coagulación química,
- Alta efectividad en cuanto a la remoción de una amplia cantidad de contaminantes (versatilidad y funcionalidad),
- Purificación de agua y su posterior reciclaje,

- Se favorece la coagulación gracias al paso de corriente eléctrica y la generación de movimiento de partículas contaminantes,
- Dependiendo el tipo de agua y sus contaminantes, se puede obtener incluso aguas potables, incoloras e inodoras,
- Debido a la flotación, los contaminantes son arrastrados por burbujas a la superficie del agua, lo que permite una disposición más sencilla.

Desventajas del proceso de electrocoagulación:

- Debido a los procesos físico-químicos generados dentro de la celda electrolítica, su uso normal requiere de una sustitución de los electrodos debido a su desgaste,
- Dependiendo del tipo de material del cual este hecho el electrodo de sacrificio, los lodos van a contener altas concentraciones de este metal,
- Debido a su consumo energético, su uso puede llegar a ser costoso en regiones donde el costo de la energía eléctrica es elevado,
- El óxido formado en el ánodo puede disminuir su eficiencia pues este actúa como una capa aislante que impide el paso de corriente a través de este.

2.3.2. APLICACIONES

Gracias a que la electrocoagulación es un proceso de una alta versatilidad, debido a sus grandes ventajas y su amplio rango de acción, sus aplicaciones pueden variar en diferentes sectores. Estas se distribuyen desde el tratamiento de aguas residuales del sector industrial (textiles, curtiembre, manufactura, etc.) hasta el tratamiento de aguas residuales urbanas, permitiendo en muchos casos su reúso, reciclaje e incluso su potabilización (dependiendo del tipo y la cantidad de contaminantes del agua residual).

2.4. ELECTROFLOCULACIÓN Y ELECTROFLOTACIÓN

En el interior de la celda de EC la carga de los coloides facilita el movimiento por el campo eléctrico generado por los electrodos, y la evolución electródica de gases

genera una mezcla suave. Como consecuencia, se favorece el choque entre coloides y por lo tanto la floculación en el interior de la celda electroquímica sin necesidad de agitación mecánica (Martínez, 2007). A este proceso se le denomina *electrofloculación* y puede llegar a tener la misma efectividad que los procesos convencionales en volúmenes muy superiores.

De la misma manera, la *electroflotación* es un proceso secundario inherente a todos los procesos de electrocoagulación. Este se da cuando los gases generados en los electrodos se adhieren a la superficie de los flóculos disminuyendo su densidad, provocando su ascenso a la superficie gracias a su tendencia a flotar.

2.5. AGUAS RESIDUALES

Se consideran aguas residuales a todas aquellas aguas que provienen del uso del hombre en sus actividades y por ello son contaminadas con sustancias y/o microorganismos, lo que genera la necesidad de desecharlas. De acuerdo con el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua de la Universidad de Salamanca, las aguas residuales pueden tener distintos orígenes, aunque se resaltan los siguientes:

- **Aguas Residuales Domésticas o Aguas Negras:** Su generación se da por la suplección de las necesidades básicas de los seres humanos. Proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas (Espigares & Pérez, s.f)
- **Aguas Residuales Industriales:** Su generación se da por el desarrollo de las actividades de las fábricas industriales. Contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal (Espigares & Pérez, s.f). En general, su composición dependen de la actividad industrial que desarrolle la empresa.
- **Aguas Residuales Agrícolas:** Procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, en las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con

o sin un tratamiento previo (Espigares & Pérez, s.f).

2.5.1. AGUAS RESIDUALES DE LA MINERÍA DE CARBÓN

Las aguas residuales de la minería de carbón son aguas industriales, provenientes del interior de la tierra y que contienen una gran cantidad de metales pesados. En este contexto, estas aguas residuales son uno de los problemas contaminantes más graves de la minería, puesto que tales aguas contienen un alto contenido de sales disueltas, un pH ácido y altos contenidos de metales pesados como el hierro, el aluminio, el manganeso y el zinc (Pantoja, 2012).

Por otra parte, dependiendo del territorio donde se ubica la mina, Pantoja (2012) afirma que se presentan ciertas concentraciones de sustancias tóxicas, entre ellos metales como el cobre, el níquel, el cromo, el plomo y el arsénico. Tales sustancias representan una amenaza para el medio ambiente cuando su disposición no es la adecuada, haciendo evidente su impacto ambiental en la calidad del agua, en la composición de los suelos y la atmósfera.

2.6. ANTECEDENTES

2.6.1. ANTECEDENTES EN COLOMBIA

Tabla 1. Antecedentes en Colombia

AUTORES	PROCESO CONTAMINANTE	CONTAMINANTE
<ul style="list-style-type: none">● Arango & Garcés (2007).● Arango, Garcés, Molina & Piedrahíta (2008).● Arango (2012).	Procesamiento lácteo	Grasas y aceites.

<ul style="list-style-type: none"> • Arango & López (2008). 	Desgrase de autopartes.	Grasas y aceites.
<ul style="list-style-type: none"> • Arango (2011). 	Adición de colorantes en industria alimenticia, farmacéutica y cosmética.	Colorante azoico tartrazina.
<ul style="list-style-type: none"> • Aristizábal & Castrillón (2007). 	Lavanderías industriales	Colorantes textiles, jabones y productos para lavado de prendas.
<ul style="list-style-type: none"> • Mercado, González & Valencia (2013). 	Industria automotriz.	Remoción de níquel y DQO.
<ul style="list-style-type: none"> • Morales & Acosta (2010). 	Galvanoplastia.	Cobre, Plomo, Cobalto, Zinc, Cromo, Plata y Níquel.

Fuente: Autor (2017)

2.6.2. ANTECEDENTES ALREDEDOR DEL MUNDO

Tabla 2. Antecedentes en el mundo

AUTORES	PROCESO CONTAMINANTE	CONTAMINANTE
<ul style="list-style-type: none"> • Adhoum et al (2004). • Gao, Chen, Shen & Chen (2004). • Heidmann & Calmano (2007). • Hussain et al (2013). 	Galvanoplastia	Cobre, Cobalto, Zinc, Cromo, Plata y Níquel.

<ul style="list-style-type: none"> • Bayramoglu et al (2003). • Kim et al (2002). • Kobya, Can & Bayramoglu (2013). 	Adición de colorantes en la industria textil.	Colorantes textiles.
<ul style="list-style-type: none"> • Brahmi et al (2004) 	Aguas residuales sintéticas y fosfatadas.	Cadmio.
<ul style="list-style-type: none"> • Can et al (2006) 	Aguas residuales de la industria textil.	Colorantes textiles, jabones y productos para lavado de prendas.
<ul style="list-style-type: none"> • Castañeda, Pavón & Colín (2015) 	Adición de colorantes	Colorantes verde malaquita y remazol amarillo.
<ul style="list-style-type: none"> • Chen, Chen & Yue (1999). • Chen, Chen & Yue (2000). 	Aguas residuales de restaurantes.	Aceites, grasas y jabones de lavado.
<ul style="list-style-type: none"> • Daneshvar, Ashassi & Tizpar (2002). • Daneshvar, Ashassi & Kasiri (2004). • Daneshvar, Oladegaragoze & Djafarzadeh (2005). 	Descolorización.	Colorante Anaranjado 2, rojo ácido 14, rojo básico 46, azul básico 3.
<ul style="list-style-type: none"> • Priego, Callejas, 	Procesamiento lácteo	Grasas y aceites.

Reyes & Marmolejo (2012)		
<ul style="list-style-type: none"> Larue, Vorobiev, Vu & Durand (2002). 	Aguas residuales	Partículas de látex en suspensiones acuosas.
<ul style="list-style-type: none"> Merzouk et al (2009). 	Aguas residuales	Turbiedad y separación de metales pesados.

Fuente: Autor (2017)

2.7. ENERGÍAS RENOVABLES

Las fuentes de energía renovable han sido aprovechadas a lo largo de la historia por los seres humanos acompañadas de la energía animal y hasta la llegada de la revolución industrial, donde la aparición del carbón, con una tasa energía más alta y a un menor precio desplazo a estas. Con la posterior aparición del petróleo y el gas natural, estas quedaron aún más atrás en la historia; pero con las actuales y futuras crisis de los combustibles fósiles, están empezando a renacer las energías renovables.

Las energías renovables son aquellas que se producen de manera continua y son inagotables a escala humana (Méndez & Cuervo, 2007). Estas energías son respetuosas con el medio ambientes, ya que el impacto ambiental de estas es mucho menor que el de las energías convencionales. Entre las energías renovables se encuentran la eólica, la hidráulica, las biomasas, la geotérmica y la energía solar, entre otras.

En particular, la *energía solar* es la energía del sol sin transformaciones, que calienta e ilumina. Para fines particulares de esta investigación, se utiliza la *energía solar fotovoltaica* que permite transformar en electricidad la radiación solar por medio de células fotovoltaicas integrantes de módulos solares (Méndez & Cuervo, 2007). Esta electricidad se puede utilizar directamente o se puede almacenar en acumuladores para su uso posterior.

2.7.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica es la energía solar transformada en energía eléctrica y aprovechada para los fines que se utiliza esta. Esta se obtiene mediante un efecto fotovoltaico a través de sistemas solares definidos como un conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar y transformarla en utilizable (Méndez & Cuervo, 2007).

2.7.1.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Particularmente, el caso colombiano presenta una serie de ventajas frente a las energías renovables, especialmente en la energía solar fotovoltaica. Aunque es un sector poco desarrollado, Colombia tiene un potencial energético solar a lo largo de todo el territorio nacional, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m² (Toledo, 2013, p. 7). Adicionalmente, Guevara & Pérez (2015) mencionan las ventajas más notables de la tecnología solar fotovoltaica en Colombia, estas se pueden apreciar en la tabla 3.

Tabla 3. Ventajas de la energía solar fotovoltaica.

VENTAJAS	COMENTARIOS
Gran potencial solar en Colombia	El potencial solar en Colombia varía entre el 84% y el 58% del valor promedio anual máximo en el mundo (6,8 kWh/m ² en Arabia Saudita)
Es una tecnología limpia.	Los sistemas fotovoltaicos no generan residuos, emisiones, ruido durante su funcionamiento. No utilizan combustibles eliminando la peligrosidad de almacenamiento.

Se manejan amplios rangos de potencia.	Desde un vatio hasta cientos de Megavatios.
Los sistemas fotovoltaicos (SFV) son modulares.	Permite fácilmente incrementar o disminuir la potencia, dependiendo cómo varía la demanda y corregir problemas de sub o sobredimensionamiento.
Los SFV son móviles	Permite su fácil traslado, transporte e instalación.
Los SFV son de fácil manejo	Permiten una fácil aceptación por parte de todo tipo de usuario con un entrenamiento básico.
Los SFV requieren de poco mantenimiento	Se limita a la limpieza de módulos y mantenimiento de instalaciones de acuerdo al tipo de SFV utilizado.
Los módulos tienen una larga vida útil.	Esta oscila entre 20 y 30 años. En la actualidad algunos fabricantes están garantizando una vida útil de 20 años para módulos industriales y 10 años para rurales.
Tiene costos de mantenimiento y operación bajos	Se limita al pago en comparación con otras alternativas energéticas de máximo un operario cuando el sistema lo amerite.
Es cada vez más rentable frente a otras alternativas.	Podrían servir para abrir mercado a la futura interconexión cuando la demanda lo justifique. El número de casos en que la alternativa fotovoltaica es más rentable depende de las diferentes condiciones de potencia instalada, número de usuarios y distancia a la red

	de interconexión. Ha crecido en los últimos años debido a la reducción de los costos de los módulos
--	---

Fuente: (Guevara & Pérez, 2015).

Adicionalmente, la tabla 4 muestra algunas de las ventajas y desventajas generales de los sistemas de energía solar fotovoltaica.

Tabla 4. Ventajas y desventajas generales de la energía solar fotovoltaica

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Escaso impacto ambiental ▪ No produce residuos perjudiciales para el medio ambiente ▪ Distribuida por todo el mundo ▪ No hay dependencia de compañías suministradoras ▪ Costes de mantenimiento bajos ▪ Es una de las energías renovables con mayor posibilidad
DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Son necesarios acumuladores (baterías) que contienen agentes químicos peligrosos. ▪ Impacto visual negativo

Fuente: (Méndez & Cuervo, 2007).

2.7.1.2. MONTAJE CONVENCIONAL

Figura 2. Esquema básico de un sistema de energía solar fotovoltaica



Fuente: Recuperado de: <http://www.atmosferis.com/wp-content/uploads/2011/07/solar.jpg>

Existen diferentes formas de montaje de un sistema de energía solar fotovoltaica, sin embargo, los elementos esenciales y más utilizados que se deben tener en cuenta son: generador fotovoltaico, acumuladores o baterías, regulador de carga, inversor o acondicionador y los elementos de protección del circuito (Méndez & Cuervo, 2007). Lo anterior se puede visualizar gráficamente en la figura 2.

3. METODOLOGÍA

Se da inicio con una investigación exhaustiva de la evidencia científica existente sobre el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales, evidencia que fue obtenida de numerosos artículos científicos publicados en revistas científicas de alta relevancia mundial; también, se utilizaron algunas tesis de pregrado y postgrado encontradas en repositorios de Colombia, Ecuador, España, entre otros. Lo anterior se realizó con el propósito de solucionar una problemática que aqueja a la población del municipio de Cucunubá.

Imagen 1. Tanque de sedimentación de la mina de carbón



Fuente: Autor (2017).

Las aguas escogidas para realizar la investigación, son aquellas provenientes de las actividades productivas de una mina de carbón ubicada en el municipio de Cucunubá-Cundinamarca, debido a que se evidencia que la disposición y tratamiento de estos afluentes se realiza en tanques de sedimentación contruidos en hoyos sobre la tierra (Imagen 1), lo que genera contaminación debido a que los sedimentos se filtran directamente al suelo, afectando tanto los afluentes superficiales, como subterráneos.

3.1. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

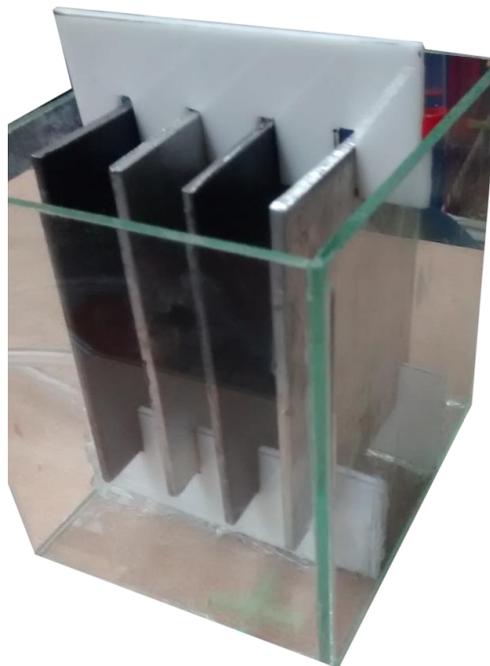
El residual se obtuvo directamente del tanque de sedimentación dispuesto por la mina de carbón ubicada en el municipio de Cucunubá-Cundinamarca. Las aguas se transportaron hasta la ciudad de Bogotá D.C. y se llevaron al laboratorio para la medición de parámetros como los sólidos totales, sólidos sedimentados, pH, turbidez, acidez, dureza total, dureza cálcica, sulfatos, DQO y O₂ disuelto.

3.2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de los experimentos se construyó una celda de electrocoagulación en vidrio, en la cual se dispusieron de 4 electrodos conectados en paralelo. En el desarrollo de esta investigación se llegó hasta el punto en que el proceso de electrocoagulación desarrolla flóculos.

Para permitir el paso de corriente a través del medio, se utilizó una inicialmente un adaptador de corriente que permitió el paso de 5 W de potencia, esto debido a que uno de los objetivos de esta investigación es utilizar la energía solar fotovoltaica para suplir de energía eléctrica el proceso de electrocoagulación. En este sentido, los 5 W de potencia se eligieron en concordancia con los niveles de potencia que pueden ser generados por un sistemas de paneles solares.

Imagen 2. Disposición de los electrodos dentro del electrocoagulador.



Fuente: Autor (2017).

A continuación se describen los detalles de los elementos del prototipo de celda de electrocoagulación que se construyó para esta investigación:

- El prototipo de celda de electrocoagulación es un cubo en vidrio sin tapa superior, construido en vidrio de 3 milímetros de espesor, con capacidad para 1 litro de agua.
- Los electrodos están compuestos por dos placas de hierro y dos placas de

aluminio ubicadas y conectadas en paralelo.

- Los electrodos están soportados por acrílicos en la parte superior e inferior para garantizar que estas no sea muevan durante el proceso.
- Se dispone de un sistema de evacuación de aguas tratadas y residuos, formado por mangueras en la parte media e inferior de la celda de electrocoagulación.
- Para la fuente de poder se utilizó un adaptador que permite suministrar 5 W de potencia al sistema (alrededor de 5 voltios y 1 amperio)

3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La celda de electrocoagulación es llenada inicialmente con las aguas residuales de la mina de carbón que se obtuvieron previamente. Se vierte dentro de la celda 1 litro de agua sin tratar, permitiendo que el área superficial de tratamiento sea de 7500 milímetros². Bajo este contexto, se calcula el tiempo de con base en una carga de 150 c/L y una densidad de corriente de 0,28 mA/cm². Lo anterior se calcula con base en la ecuación 1 utilizada para calcular en tiempo en la investigación desarrollada por Pantoja (2012).

$$t = \frac{Cv}{JA} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- C = Carga (sA)
- v = Volumen a tratar (L)
- J = Densidad de corriente (mA/cm²)
- A= Área activa de tratamiento

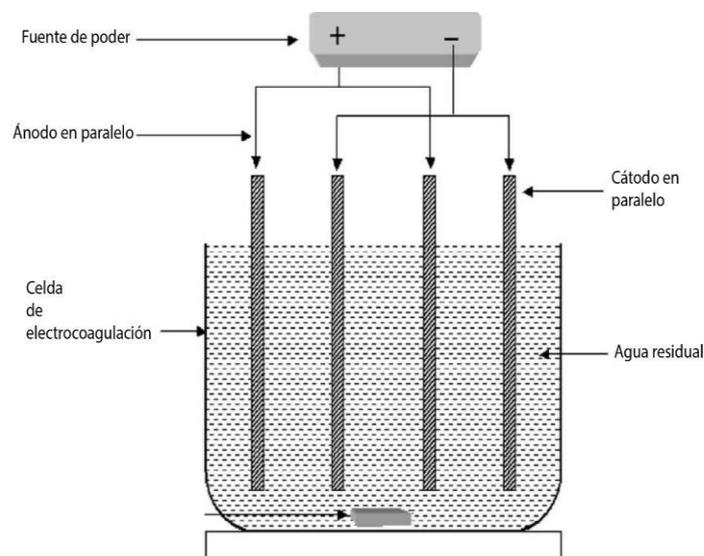
Bajo estos parámetros, se utiliza un tiempo aproximado de 15 minutos de tratamiento, sin diferenciación entre las distintas fases de la electrocoagulación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROTOTIPO

El diseño de la celda de electrocoagulación tomó como referencia la revisión bibliográfica y los resultados presentados por los autores en sus documentos. La celda de electrocoagulación utilizada en esta investigación emplea electrodos monopolares, ya que Mollah et al (2004), Daneshvar et al (2004), entre otros, reportan que las celdas de electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales con dos electrodos no son eficientes, ya que necesitan electrodos con áreas superficiales grandes.

Figura 3. Diagrama esquemático de la celda de EC con electrodos conectados en paralelo.

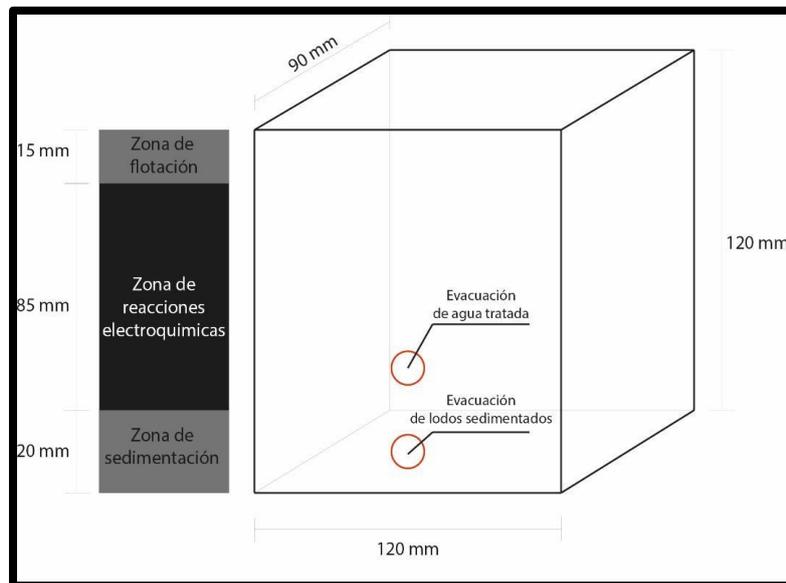


Fuente: Mollah et al (2004)

En cuanto a la construcción del prototipo, se orienta hacia una celda conectada en paralelo (Figura 3) con dos ánodos y dos cátodos de Aluminio y Hierro respectivamente (se utilizan estos materiales debido a la facilidad para la adquisición de estos, su bajo costo y los resultados reportados por numerosos referentes en cuanto a la efectividad de estos materiales en el proceso de EC, son los metales más utilizados en el proceso (Chen et al, 2002; Kobya et al, 2003)), estos electrodos son placas de 3 milímetros de espesor y con un área superficial de 7125 milímetros². El prototipo se construye en vidrio de 3 milímetros de espesor, con soportes para los

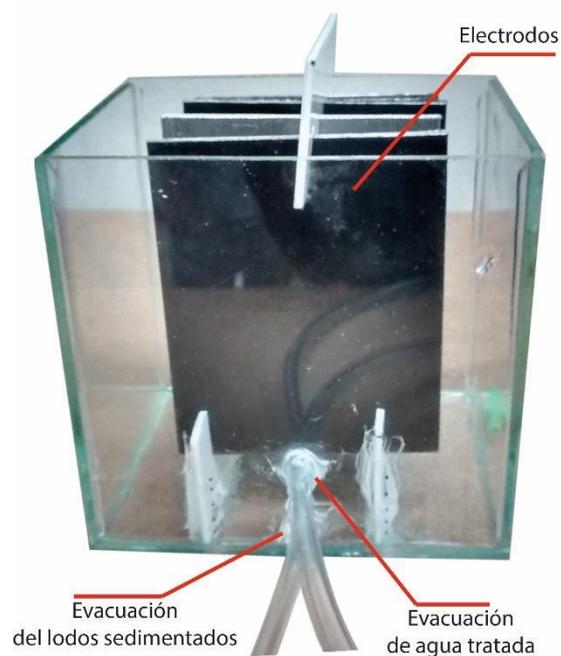
electrodos en acrílico de 4 milímetros de espesor. Se dispone de una manguera inferior y una manguera superior, estas para disposición del lodo resultante del proceso y del agua tratada respectivamente. La cubeta del reactor tiene una capacidad para tratar 1 litro de agua residual. Las dimensiones y disposición de áreas del reactor se muestran en la figura 4.

Figura 4. Dimensiones y disposiciones de áreas del reactor.



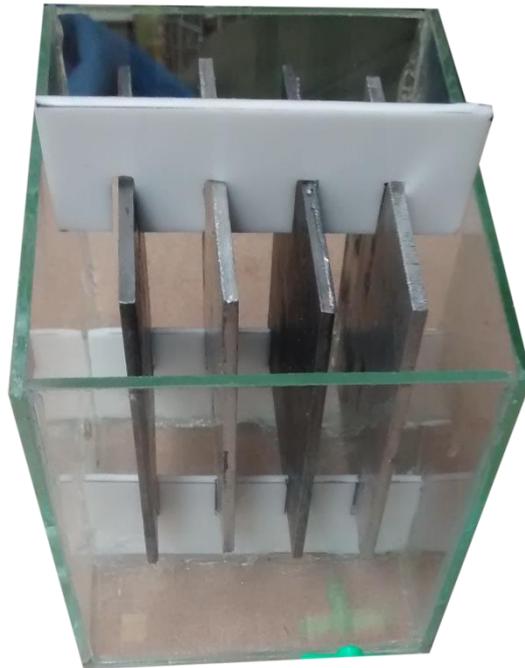
Fuente: Autor (2017).

Imagen 3. Prototipo celda de electrocoagulación.



Fuente: Autor (2017).

Imagen 4. Prototipo celda de electrocoagulación.



Fuente: Autor (2017).

El prototipo se probó con agua residual de mina de carbón extraída de manera directa de la tubería dispuesta para la extracción de dicha agua a la superficie. Dicha agua fue transportada del municipio de Cucunubá a la ciudad de Bogotá refrigerada y en la mayor brevedad para que los componentes orgánicos no sufrieran cambios drásticos y pudieran afectar los resultados del tratamiento. Las muestras de agua tomadas fueron caracterizadas según se muestra la tabla 5.

Para la caracterización del agua se tomaron en cuenta diferentes variables, entre estas se destacan los sólidos totales, sólidos sedimentados, pH, turbidez, acidez, dureza cálcica, dureza total, sulfatos, DQO y O_2 disuelto; variables que posteriormente son tenidas en cuenta para el contraste de los resultados en relación con los niveles permitidos para vertimientos en la legislación colombiana.

La revisión bibliográfica permitió al investigador crear un horizonte hacia donde enfocar esta investigación, interiorizando en el proceso de electrocoagulación, las variables que afectan dicho proceso, los antecedentes de su aplicación para tratamiento de aguas residuales y el diseño de una celda de electrocoagulación que tuviera los elementos necesarios para el tratamiento que se iba a realizar. En la construcción del prototipo se utilizaron dos cátodos y dos ánodos con el fin de tener una disolución óptima de los iones metálicos (Chen et al, 2002; Kobya et al, 2003;

Arango et al 2006), lo cual se logra aumentando el área superficial de los electrodos o aumentando el número de electrodos. Ajustando esto al volumen ya dispuesto de la celda, se calcula el número de electrodos necesarios de acuerdo con la siguiente expresión (Arango & Garcés, 2007):

$$Ne = \frac{(Ac)-(2*Decl)}{Dmax+Ep} \quad Ne = \frac{(Ac)-(2*Decl)}{Dmax+Ep} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- *Ac*: Ancho de la celda
- *Decl*: Distancia de los electrodos a la cara lateral
- *Dmax*: Distancia máxima entre electrodos
- *Ep*: Espesor de la placa

Ajustando en el diseño una distancia máxima entre los electrodos de 15 milímetros , y las placas tanto de Aluminio (Al) cómo de Hierro (Fe) de 3 milímetros de espesor, se calcula al aplicar la ecuación 2 y 3 que, la cantidad de electrodos necesaria para la operación del reactor es 4.

$$Ne = \frac{(120 \text{ mm})-(2 * 20 \text{ mm})}{15 \text{ mm} + 3 \text{ mm}} \quad Ne = \frac{(120 \text{ mm})-(2 * 20 \text{ mm})}{15 \text{ mm} + 3 \text{ mm}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Ne = 4.44 \approx 4$$

De esta forma se disponen cuatro electrodos, dos placas de un metal conectadas al ánodo y dos placas del otro metal conectadas al cátodo, de forma intercalada y en paralelo como lo muestra el esquema de conexión (figura 3). En las imágenes 3 y 4 se muestra la disposición de las placas como se mencionó anteriormente.

4.2. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL AFLUENTE

Según los análisis de laboratorio, las aguas residuales de esta mina en particular (las propiedades físico-químicas de este tipo de aguas varían dependiendo del lugar donde se ubica la mina) contienen alrededor de 2400 mg/L de sólidos totales, pH de 6,087, turbidez de 42,05 NTU, acidez de 2,3 ppm, DQO de 109,34 ppm, entre otros valores que se pueden apreciar en la tabla 5.

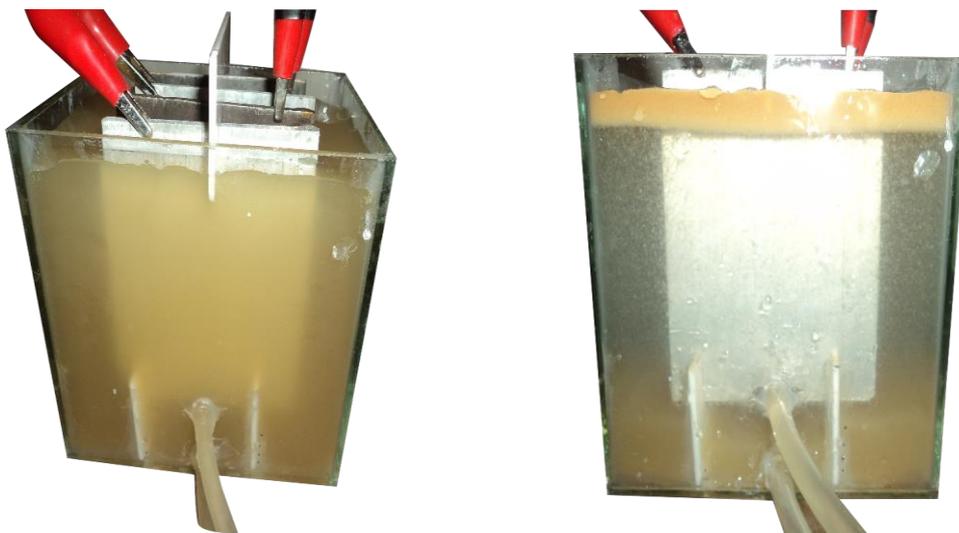
Tabla 5. Caracterización agua residual mina de carbón.

PARÁMETRO	VALOR MEDIDO
Sólidos totales	2438 mg/L
Sólidos sedimentados	2 ml/1000ml
pH	6.087
Turbidez	42.05 NTU
Acidez	2.3 ppm
Dureza Cálctica	960 ppm
Dureza Total	40.65 ppm
Sulfatos	258.16 ppm
DQO	109.34 ppm
O ₂ disuelto	3.506 ppm

Fuente: Autor (2017).

4.3. TRATAMIENTO CON ELECTROCOAGULACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

Imagen 5. Proceso de tratamiento del agua con el prototipo



Fuente: Autor (2017).

Para verificar el funcionamiento del prototipo se realizaron pruebas experimentales. Se utilizó un adaptador para convertir la corriente de alterna a continua, el cual

proporciona 5 voltios y 1 amperio. Dichos experimentos se realizaron por un tiempo de 15 minutos, a temperatura ambiente y con los valores de corriente y voltaje anteriormente mencionados. Posteriormente y según los análisis de laboratorio realizados al agua tratada se obtienen los resultados presentados en la tabla 6.

4.4. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

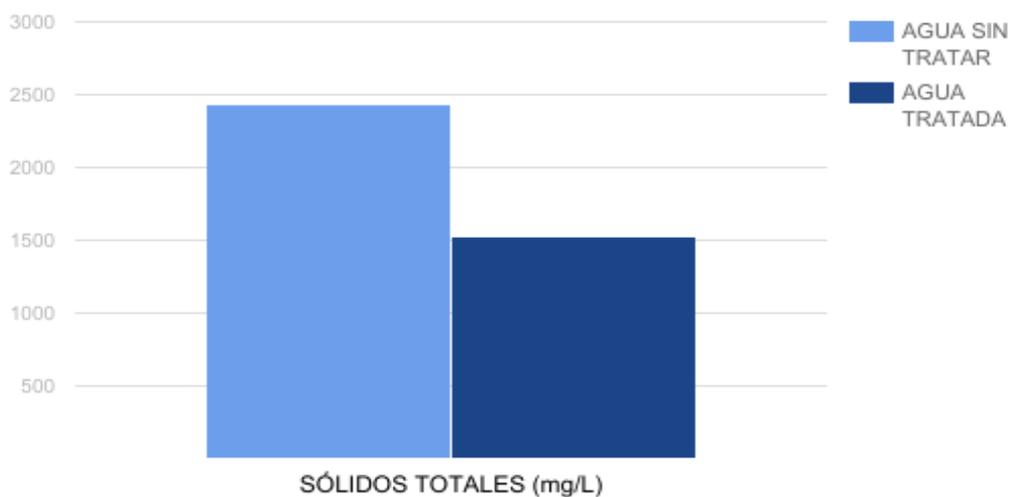
Tabla 6. Caracterización del agua procesada

PARÁMETRO	VALOR MEDIDO
Sólidos totales	1525 mg/L
Sólidos sedimentados	No presenta
pH	5,367
Turbidez	7.018 NTU
Acidez	6,4 ppm
Dureza Cálcica	350 ppm
Dureza Total	28.15 ppm
Sulfatos	192.34 ppm
DQO	94.44 ppm
O ₂ disuelto	3.823 ppm

Fuente: Autor (2017).

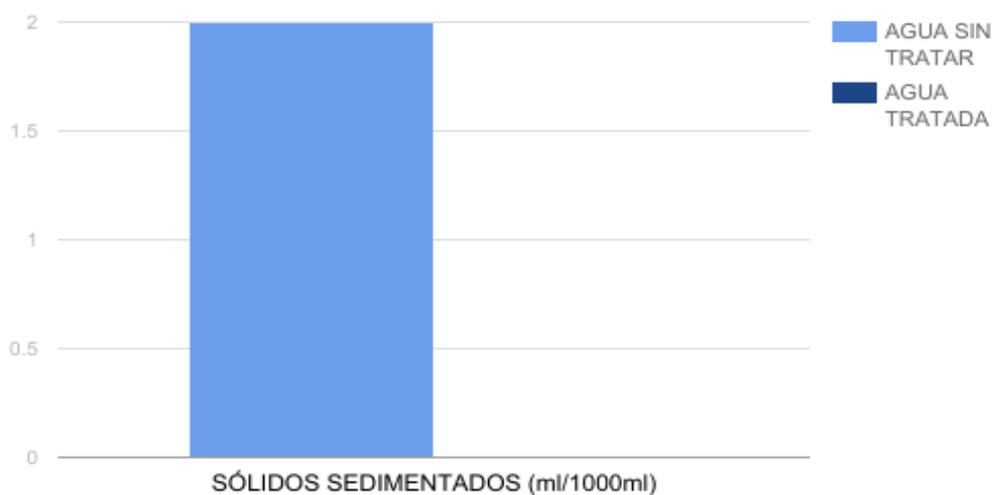
En los análisis del agua residual contrastados con los del agua procesada, se pueden evidenciar disminuciones notables en los niveles de turbidez del 83.31% (gráfico 4), del 62.55% en sólidos totales (gráfico 1) y 69.25% en la dureza total apreciados en gráfico 2, donde también se muestran variaciones de disminución de los sólidos sedimentados, dureza cálcica, cloruros y sulfatos. Por otra parte, es notable el aumento de la acidez del agua durante el proceso y el O₂ disuelto.

Grafico 1. Comparación del parámetro sólidos totales



Fuente: Autor (2017).

Grafico 2. Comparación del parámetro sólidos sedimentados

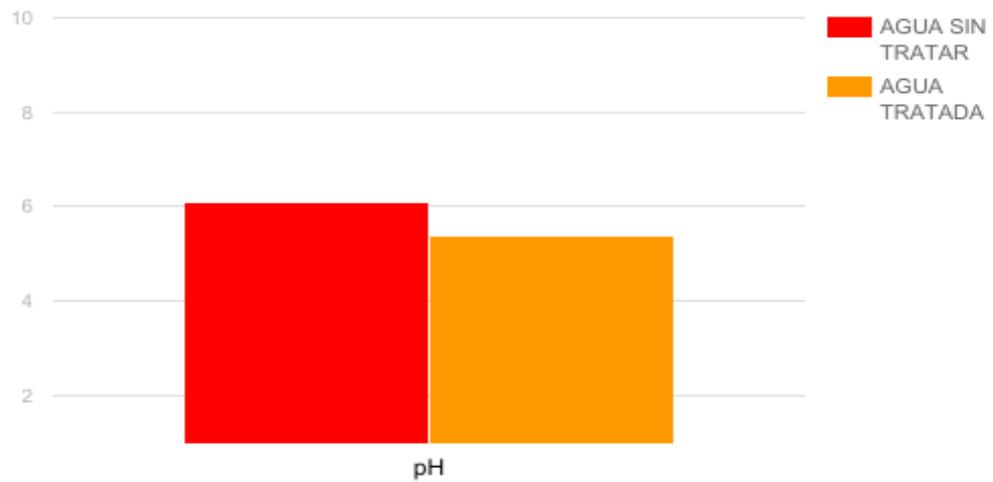


Fuente: Autor (2017).

Se puede apreciar en los gráficos 1 y 2 que los sólidos totales presentan notables disminuciones posteriores al tratamiento con electrocoagulación. En particular, los resultados del análisis de laboratorio del agua tratada muestran que esta no presenta sólidos sedimentados. En general, una disminución de los sólidos totales en el agua

sugiere una descontaminación significativa del agua residual.

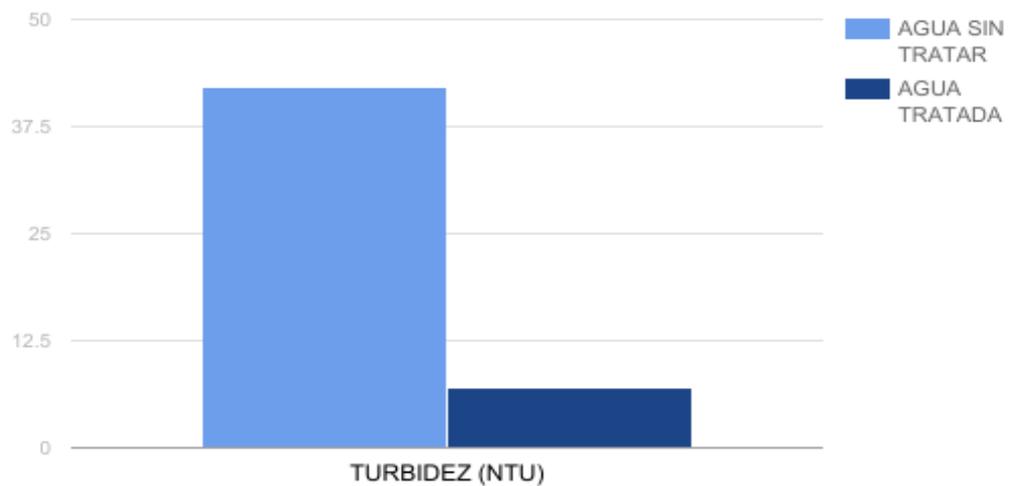
Grafico 3. Comparación del parámetro pH



Fuente: Autor (2017).

Por otra parte, aunque el pH del agua disminuye, el agua sigue manteniendo un pH ligeramente ácido, lo que es posible de corregir mediante la adición de cal hidratada u otro tratamiento que posibilite neutralizar el pH del agua.

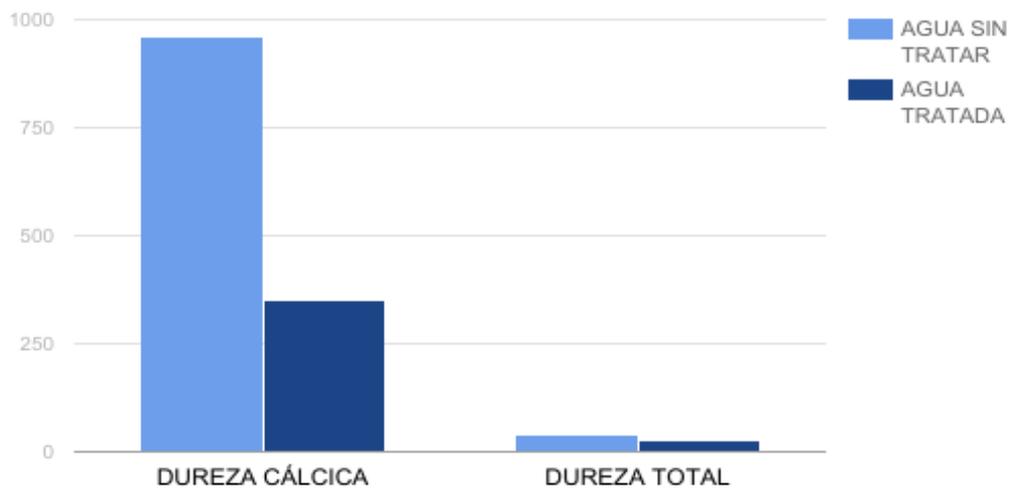
Grafico 4. Comparación del parámetro turbidez



Fuente: Autor (2017).

También es imperante resaltar la disminución significativa de los niveles de turbidez del agua, este parámetro mostró una disminución de alrededor de 83%, lo que es apenas lógico en comparación con las disminuciones presentadas en los niveles de sólidos sedimentados y sólidos totales.

Grafico 5. Comparación de los parámetros dureza cálcica y dureza total

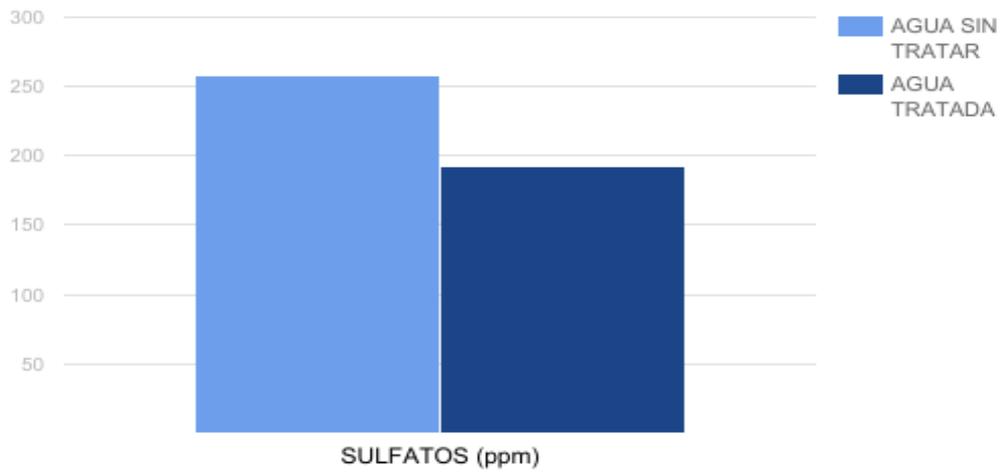


Fuente: Autor (2017).

En relación con la dureza total y la dureza cálcica, es posible ver una disminución en sus niveles, lo que significa una notable disminución de los carbonatos, bicarbonatos

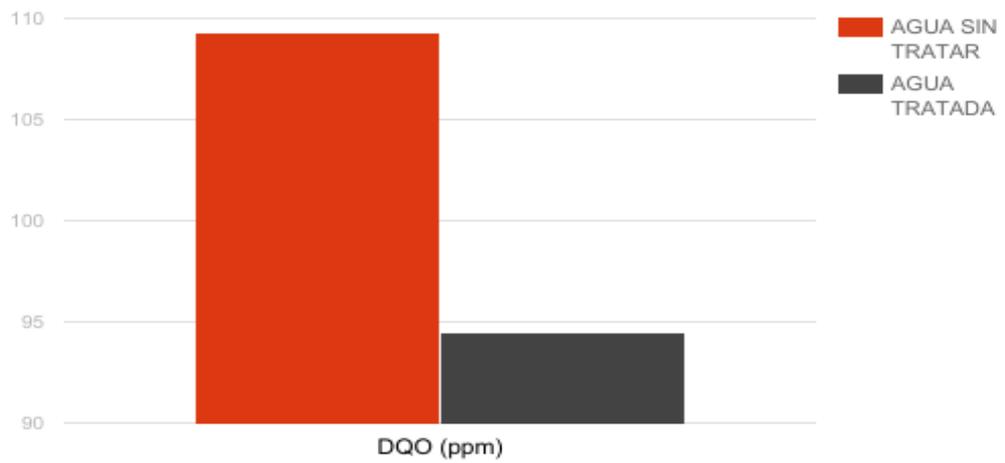
y sales de calcio y magnesio que contiene el agua.

Grafico 6. Comparación del parámetro sulfatos



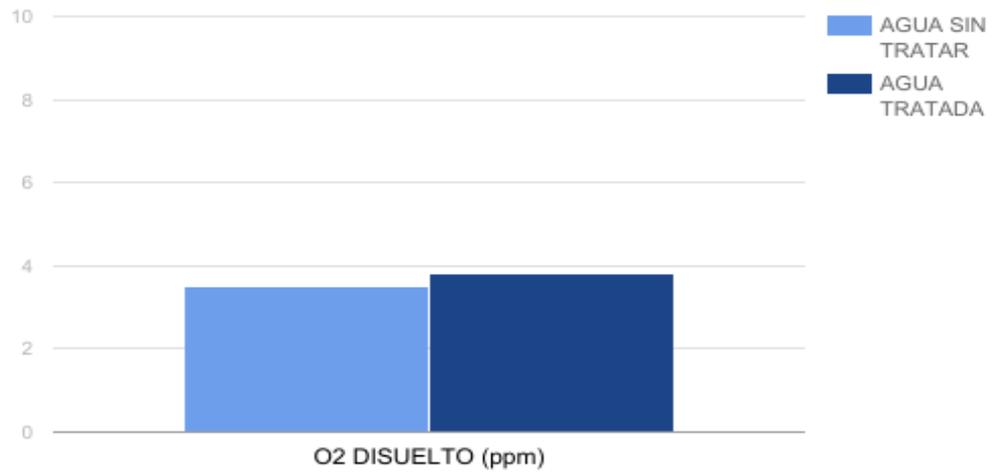
Fuente: Autor (2017).

Grafico 7. Comparación del parámetro Demanda Química de Oxígeno



Fuente: Autor (2017).

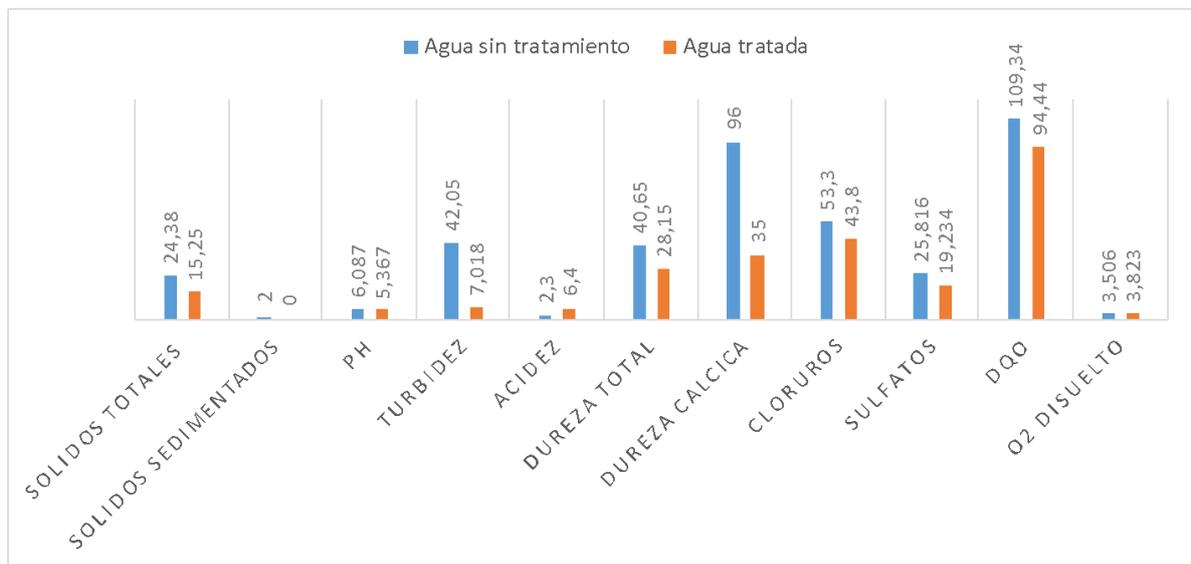
Grafico 8. Comparación del parámetro O2 disuelto



Fuente: Autor (2017).

En general, se evidencia una disminución de alrededor del 15% en los niveles de DQO, que aunque no es realmente significativo, puede tener cierta relevancia teniendo en cuenta que para este proceso experimental no se hizo uso de adiciones químicas y otros procesos físico-químicos que pudieran optimizar el tratamiento del agua residual.

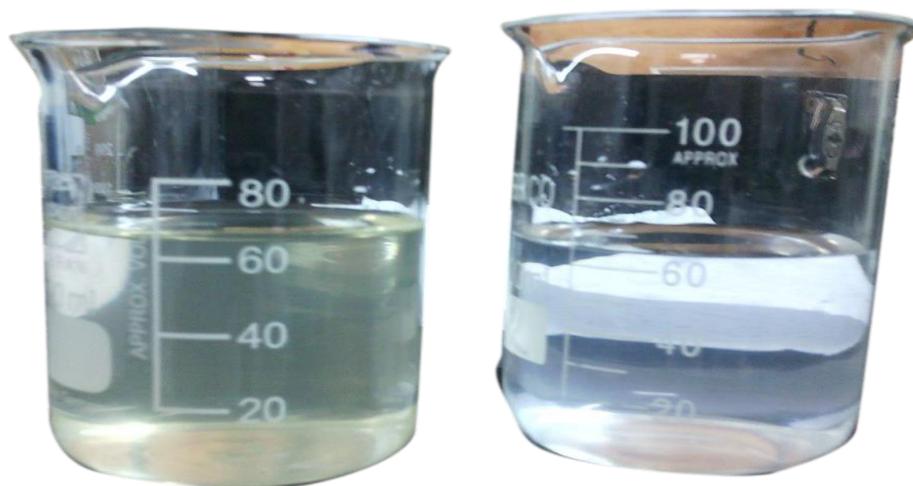
Grafico 9. Comparación de los parámetros fisicoquímicos estudiados y sus variaciones.



Fuente: Autor (2017).

La técnica presenta unos resultados excelentes para el tratamiento de las aguas residuales de la mina de carbón, la reducción del 15% en los niveles de DQO, indica una disminución en la contaminación del agua, aunque el pH supone un inconveniente para esta técnica, este puede ser neutralizado por otros medios de fácil aplicación y acceso, como por ejemplo adicionando al proceso cal hidratada para alcanzar el pH deseado. Cabe resaltar que la medida de los sólidos totales es una medida aparente, ya que las moléculas de agua asociadas a la reacción de formación los hidróxidos de calcio, hierro y aluminio, no son tomadas en cuenta.

Imagen 6. Agua residual de la mina de carbón después del tratamiento.



Fuente: Autor (2017).

Como se puede apreciar en la imagen 6, a simple vista los resultados del tratamiento son notables, ya que se puede apreciar con claridad la turbidez del agua en comparación con la imagen 5. Los resultados generales obtenidos, se acercan a los niveles de vertimientos industriales contemplados en el decreto 1594 de 1984 y la resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Estos resultados pueden ser optimizados agregando floculantes. También, la energía necesaria para el funcionamiento de la celda es proporcionada por el panel solar (ya que el proceso experimental de la celda se diseñó con base en parámetros energéticos que puedan ser alcanzados por paneles solares), lo que reduce notablemente el impacto ambiental que tienen estos vertimientos, disminuye costos

de tratamiento de las aguas residuales, permite la reutilización del agua procesada y demuestra la utilidad de las energías renovables cuando se emplean en procesos industriales.

5. CONCLUSIONES

Un tiempo de 15 minutos a una potencia de 5 W es suficiente para que la electrocoagulación resulte ser un proceso eficaz para el tratamiento de aguas residuales de las minas de carbón. Para tal fin, es posible la utilización de paneles solares que generen la energía fotovoltaica necesaria para el funcionamiento de la celda electrocoaguladora al procesar un litro de agua residual.

Es imperante resaltar que no se utilizaron químicos ni ningún otro aditamento para los experimentos de esta investigación, todas las reacciones se generaron *in situ*, por eso los resultados obtenidos en la investigación pueden ser optimizados utilizando polímeros como floculantes para obtener mayores tasas de remoción de contaminantes y acercarse a los límites permitidos por la normatividad colombiana para los vertimientos de aguas residuales.

A escala industrial, la construcción de un equipo funcional puede llegar a tener una inversión elevada, pero una relación costo beneficio llega a ser adecuada debido a que los costos de operación y mantenimiento no son elevados, adicionalmente, tal agua puede ser reutilizada en procesos secundarios a la minería.

El uso de tecnología que aprovecha las energías alternativas como la solar es una contribución a la reducción de la huella ambiental ocasionada por la producción minera, para este caso, los metales pesados que contienen las aguas residuales de la mina de carbón pueden llegar a contaminar el agua de las fuentes hídricas que abastecen al municipio, lo que puede llegar a desencadenar problemáticas de salud pública y/o modificaciones en los ecosistemas de la región.

El agua tratada podría ser reutilizada y aprovechada en el sector agricultor y agropecuario del municipio de Cucunubá debido a que posee características fisicoquímicas acordes para el agua de riego, solventado buena parte el consumo de agua necesario para la producción en este sector. Lo que supone una ventaja para la región, en la medida en que el agua pasa a ser funcional para el uso en otras actividades productivas.

6. RECOMENDACIONES

Es necesario hacer una caracterización de los metales pesados contenidos en estas aguas residuales de la mina de carbón; así mismo, una caracterización de los metales pesados posterior al tratamiento con electrocoagulación. Estos análisis no son realizados en esta investigación debido a las limitaciones presupuestarias.

Por otra parte, es importante el desarrollo de un estudio de costos para demostrar la relación costo-beneficio que presenta este proceso para el tratamiento de aguas residuales a escala industrial. Adicionalmente, generar posibilidades de tratamiento y disposición de los contaminantes extraídos del proceso, lo que también puede generar una disminución significativa de los impactos subyacentes a la disposición de estas aguas.

7. REFERENCIAS

- Adhoum, A. Monser, L. Bellakhal, N, & Belgaied, J. (2004) *Treatment of electroplating wastewater containing Cu²⁺, Zn²⁺ and Cr(VI) by electrocoagulation*. Journal of Hazardous Materials. 207–213.
- Aguilar, M. Sáez, J. Lloréns, M. Soler, A. & Ortuño, J. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación*. Murcia: Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones.
- Arango, A. (2011). *Uso de electrocoagulación para la remoción de tartrazina en soluciones acuosas*. Producción + Limpia. 6(2). 58-77.
- Arango, A. Garcés, L. Molina, S. Piedrahita, J. (2008). *Análisis de costos de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea*. Producción + Limpia. 3(2).
- Arango, A. (2005). *La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. Revista Lasallista de Investigación. 2(1). 49-56.
- Arango, A. (2012). *Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea*. Producción + Limpia. 7(1). 59-67.
- Aristizábal, A. & Bermúdez, M. (2007). *Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para el tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reúso*. (Tesis de pregrado). Universidad Pontificia Bolivariana. Colombia: Medellín.
- Arango, A. Restrepo, A. & Garcés, L. (2006). *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*. 1(2).
- Arango, A. & Garcés, L. (2007). *Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*. Revista Universidad EAFIT. 147(43). 56-67.
- Bayramoglu, M. Kobya, M. Can, O. & Sozbir, M. (2003). *Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater*. Separation and Purification Technology. 37. 117-125.
- Brahim, K. Bouguerra, W. Hamrouni, B. Aloui, L. Loungou, M. Zied, T. (2014). *Investigation of electrocoagulation reactor design parameters effect on the removal of cadmium from synthetic and phosphate industrial wastewater*. Arabian Journal of Chemistry.

- Can, O. Kobya, M. Demirbas, E. & Bayramoglu, M. (2005). *Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation*. Chemosphere. 62. 181-187.
- Castañeda, J. Pavón, T. & Colín, A. (2015). *Tratamiento de soluciones acuosas con colorantes verde malaquita y remazol amarillo por medio de electrocoagulación alimentada con energía solar*. Perspectiva Sustentable. 1(2).
- CEPAL. & Global Water Partnership. (2000). *Agua para el Siglo XXI para América del Sur: De la Visión a la Acción*.
- Chen, X. Chen, G. & Lock Yue, P. (1999). *Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation*. Separation and Purification Technology. 19. 65-76.
- Chen, G. Chen, X. & Lock Yue, P. (2000). *Electrocoagulation and Electroflotation of Restaurant Wasterwater*. Journal of Environmental Engineering.
- Daneshvar, N. Ashassi-Sorkhabi, H. & Tizpar, A. (2002) *Decolorization of orange II by electrocoagulation method*. Separation and Purification Technology. 31. 153-162.
- Daneshvar, N. Ashassi Sorkhabi, H. & Kasiri, M. (2004) *Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections*. Journal of Hazardous Materials B112. 55-62.
- Daneshvar, N. Oladegaragoze, A. & Djafarzadeh, N. (2006). *Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters*. Journal of Hazardous Materials. 116-122.
- Eduvire, O. (2006). *Drenaje Acido de Mina: Generación y Tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid: España.
- Espigares, M. Pérez, J. (s.f). *Aguas residuales: Composición*. Salamanca: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua.
- Guevara, C. Pérez, M. (2015). *Análisis de viabilidad del suministro de energía eléctrica a la granja la fortaleza ubicada en Melgar-Tolima mediante la implementación de un sistema solar fotovoltaico*. Bogotá: Universidad Libre.
- Heidmann, I. Calmano, W. (2007). *Removal of Zn (II), Cu (II), Ni (II), Ag (I) and Cr (VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation*. Journal of Hazardous Materials. 152. 934-941.
- Hepler, L. (1968). *Principios de Química*. Valencia: Editorial Reverté S.A.

- Hernández, P. (2011). *Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de aguas mediante electrocoagulación*. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid: España.
- Holt, P. Barton, G. & Mitchell, C. (2004). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*. 59. 355-367.
- Holt, P. Barton, G. & Mitchell, C. (2006). Electrocoagulation as a wastewater treatment. The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event. Victoria: Australia.
- Huerga, E. (2005). *Desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de tecnologías limpias dirigidas al reciclaje y/o valorización de contaminantes*. (Tesis de doctorado). Universidad de Valencia. Valencia: España.
- Jiang, J. Graham, N. André, C. Kelsall, G. & Brandon, N. (2002). *Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment*. *Water Research*. 36. 4064-4078.
- Johnson, B. & Hallberg, K. (2005). *Acid mine drainage remediation options: a review*. *Science of the Total Environment*. 338. 3-14.
- Kalin, M. Fyson, A. & Wheeler, W. (2005). *The chemistry of conventional and alternative treatment systems for the neutralization of acid mine drainage*. *Science of the Total Environment*. 366. 395-408.
- Koby, M. Taner Can, O. Bayramoglu, M. (2003). *Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrode*. *Journal of Hazardous Materials*. B100. 163-17.
- Larue, O. Vorobiev, E. Vu, C. & Durand, B. (2002). *Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspension*. *Separation and Purification Technology*. 31. 177-192.
- Lin, S. Shyu, C. & Sun, M. (1998). *Saline wastewater treatment by electrochemical method*. *Water Research*. 32(4). 1059-1066.
- Martínez, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. (Tesis de doctorado). Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real: España.
- Méndez, J. Cuervo, R. (2007). *Energía Solar Fotovoltaica*. FC Editorial. Madrid: España.

- Merzouk, B. Gourich, B. Sekki, A. Madani, K. & Chibane, M. (2008). *Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique: A study case*. Journal of Hazardous Materials. 164. 215-222.
- Mercado, I. Gonzáles, G. & Valencia, S. (2013). *Remoción de níquel y DQO presentes en las aguas residuales de la industria automotriz mediante electrocoagulación*. Revista EIA. 10(19). 13-21.
- Ministerio de Medio Ambiente. & IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014*.
- Mollah, A. Morkovsky, P. Gomes, J. Kesmez, M. Parga, J. & Cocke, D. (2004). *Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation*. Journal of Hazardous Materials. B114. 199-210.
- Mora, A. (2013). *Remoción de cromo en aguas crudas por el método de electrocoagulación*. (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Querétaro. Querétaro: México.
- Morales, N. & Acosta, G. (2010). *Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. 20(1). 33-44.
- Morante, G. (2002). *Electrocoagulación de aguas residuales*. Revista Colombiana de Física. 34(2).
- Ni'am, M. Othman, F. Sohaili, J. & Fauzia, Z. (2007). *Electrocoagulation technique in enhancing COD and suspended solids removal to improve wastewater quality*. WaterScience&Technology. 56(7). 47-53.
- Othman, F. Sohaili, J. Ni'am, F. Fauzia, Z. (2006). *Enhancing suspended solid removal from wastewater using Fe electrodes*. Malaysian Journal of Civil Engineering. 18(2). 139-148.
- Pantoja, E. (2012). *Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón*. (Tesis de pregrado). Universidad del Valle. Santiago de Cali: Colombia.
- Qin, X. Yang, B. Gao, F. & Chen, G. (2013). *Treatment of Restaurant Wastewater by Pilot-Scale Electrocoagulation-Electroflotation: Optimization of Operating Conditions*. Journal of Environmental Engineering. 139(7). 1004-1016.
- Toledo, C. (2013). *Evaluación de la energía solar fotovoltaica como solución a la dependencia energética de zonas rurales de Colombia*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Ramalho, R. Jiménez, D. De Lora, F. (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté. Ciudad de México: México.

- Restrepo, H. (2009). *Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia. Medellín: Colombia.
- Ríos, P. (2015). *Planta modular de tratamiento biológico para aguas residuales*. (Tesis de doctorado). Colegio de Postgraduados. Estado de México: México.
- Silva, G. Santos, R. Marqués, J. & Bonato, F. (2012). *The efficiency of electrocoagulation in treating wastewater from a dairy industry, Part I: Iron electrodes*. *Journal of Environmental Science and Health: Part B*. 47. 355–361.