



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TEMA:**

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN UTILIZADA  
COMO TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

**ASIGNATURA: Electroquímica**

**DOCENTE: Ing. Tacoronte**

**AUTORES: Canacúan Benalcázar Jéssica Fabiola**

**Cárdenas Sabando Rodrigo Emanuel**

**Quito, Diciembre del 2013**

## CONTENIDO

	PP
<b>CARÁTULA</b>	<b>i</b>
<b>CONTENIDO</b>	<b>ii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>iv</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>v</b>
<b>1. CONCEPTOS Y GENERALIDADES</b>	
1.1. Contaminación del agua.....	1
1.2. La contaminación del agua en Ecuador.....	1
1.3. Contaminación del agua (Industria Textil) .....	2
1.4. Industria Textil.....	2
1.5. Características de las aguas residuales en la industria textil.....	3
1.6. Contaminación del agua (Industria minera).....	4
1.6.1. Drenajes Ácidos de Minas (DAM).....	4
1.6.2. Estabilidad de los coloides .....	4
1.7. Electroquímica .....	5
1.7.1. Reacción electroquímica.....	5
1.7.2. Electrodo.....	5
1.7.3. Celda Electrolítica.....	6
1.8. Método electroquímico para el tratamiento de aguas Residuales.....	6
1.8.1. Electrodeposición.....	6
1.8.2. Electrocoagulación.....	7
1.8.3. Electrofloclación.....	7
1.8.4. Electrooxidación.....	7
1.8.5. Electrodesinfección.....	7
1.8.6. Floclación.....	7
1.9. Electrocoagulación (EC).....	8
1.9.1. Etapas de la EC.....	8
1.9.2. Reacciones relacionadas con el proceso de EC.....	9
1.9.3. Variables que afectan al proceso.....	10
1.10. Proceso de Floclación.....	10

<b>2.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	
2.1.	Método de análisis para la muestra de metales pesados.....	11
2.2.	Método de análisis para la muestra de colorantes.....	13
2.2.1.	Procesos de laboratorio.....	13
2.2.2.	Etapas diseño de experimento.....	13
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	
3.1.	Interpretación y Comparación de Resultados.....	17
3.2.	Análisis de Resultados .....	20
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>21</b>
<b>5.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>22</b>

## **INTRODUCCIÓN**

La implementación y el crecimiento industrial es el camino para el desarrollo y crecimiento económico de las naciones a nivel mundial; lamentablemente es una actividad presa de los factores costo-beneficio.

Al hablar de costo nos referimos al impacto ambiental que causa esta actividad, sus subproductos que no pueden ser aprovechados y tienen que ser desechados y al no haber un control responsable de estos desechos estamos contribuyendo a la destrucción de nuestro planeta.

No podemos frenar el desarrollo industrial que es una fuente de ingresos económicos y que genera fuentes de trabajo directas e indirectas, pero el problema de los desechos producidos deben ser controlados y remediados de una forma u otra .

Para ello el uso de nuevas tecnologías que con un corte ambientalista (menor gasto de recursos, bajo costo y de gran eficiencia) se hacen necesarias y la electroquímica es uno de los caminos probables que podemos emplear para mitigar este problema.

Nos enfocaremos en dos sectores industriales de crecimiento y relevancia en nuestro país como lo son la industria textil y la industria minera comparando la eficacia de procesos electroquímicos para la eliminación de subproductos que de ser controlados, disminuidos, eliminados o porque no reutilizados reduzcan el impacto ambiental de estas dos actividades tan vitales hoy por hoy en nuestro país.

## **OBJETIVOS:**

### **Objetivo global**

Encontrar aplicaciones reales a la electroquímica con respecto al ambiente y su preservación.

### **Objetivos específico**

- i. Recolectar información acerca de procesos electroquímicos empleados en el tratamiento de aguas residuales producto de la explotación minera y como desechos de la industria textil.
- ii. Encontrar la forma más viable y eficiente para la aplicación de la electroquímica en la remediación de aguas con carga contaminante a partir de la información recopilada y usando los conocimientos adquiridos en clase.
- iii. Comparar el proceso de electrocoagulación, diferencias y eficiencias para la eliminación de metales pesados producto de la minería así como la eliminación de pigmentos resultantes de los procesos textiles.

## **1. CONCEPTOS Y GENERALIDADES:**

### **1.1. Contaminación del agua**

Hablamos de agua contaminada cuando esta ha sufrido alteraciones o un daño de su estado original de pureza, por la incorporación de sustancias extrañas las cuales hacen que el agua no pueda ser empleada en sus usos habituales como por ejemplo el consumo humano, agricultura, industria, etc.

### **1.2. La contaminación del agua en Ecuador**

En nuestro país durante muchos años el tema del manejo del agua se ha encasillado casi exclusivamente al manejo de construcción de canales de riego, embalses, drenajes, obras de captación, sistemas de agua potable, y alcantarillado, es decir, se han centrado en la provisión de agua para las diferentes actividades, concentradas en la cantidad de agua que se puede entregar a una determinada población o para una determinada actividad productiva. Sin embargo, Ecuador tiene una deuda muy alta en cuanto a los esfuerzos que se realizan para mejorar y cuidado de la calidad del agua, especialmente, del agua que se vierte producto de actividades industriales, domésticas y agropecuarias.

El poco control y la casi inexistencia de datos actualizados sobre la contaminación de los recursos hídricos en el Ecuador ha permitido que la discusión sobre la contaminación del agua se base más en anécdotas, percepciones, o discursos, que en datos reales. Los pocos datos existentes por esfuerzos puntuales realizados por Universidades, Empresas de agua y ONGs, demuestran altos grados de contaminación orgánica relacionada a la presencia de coliformes fecales y sedimentos provenientes de áreas deforestadas.

En el tema de calidad del agua, la falta de información no es justificación para la inacción por parte de los usuarios del agua para tomar correctivos en este tema. La ciudad de Quito, por ejemplo, no posee ningún sistema de tratamiento de aguas residuales de importancia, los que existen son muy pequeños o se encuentran al interior de algunas industrias. Como consecuencia, el deterioro de la calidad del agua se refleja en los altos índices de contaminación que se registran en los ríos Machángara, Guayllabamba y Monjas. Los esfuerzos para solucionar este problema en Quito no han dado sus frutos y a pesar de años de estudios, millones de dólares de inversión y actualizaciones de estudios, se estima que en el año 2018 Quito podrá contar con sus primeros sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Lamentablemente esta situación no es exclusiva para la ciudad de Quito, casi todas las ciudades de tamaño mediano y grande en el Ecuador, con excepción de Cuenca y algunos sectores de Guayaquil, carecen de sistemas de tratamiento de agua. Las consecuencias de la contaminación del agua se reflejan en los altos niveles de parasitosis, enfermedades diarreicas, y pérdida de la biodiversidad acuática relacionadas a la mala calidad del agua.

La contaminación del agua provoca que muchos ríos a pesar de tener agua corriendo por su cauce, el agua no se pueda utilizar para riego, ganadería o generación eléctrica. Por tanto, se provoca una escasez de agua limitada por la calidad de la misma y no por la cantidad.

### 1.3. Contaminación del agua (Industria Textil)

El agua es una sustancia primordial para el desarrollo industrial debido a sus características de volatilidad como de disolvente con grandes ventajas pero también desventajas.

El agua además de ello es la fuente de vida de nuestro planeta y debemos tener en cuenta que la utilización de esta debe hacerse con la mayor responsabilidad, pues ahora con lo que tiene que ver a la industria textil el agua a más de materia prima y energética es una sustancia de desecho que arrastra gran cantidad de elementos nocivos y entre ellos colorantes orgánico e inorgánicos que deben ser eliminados para que el proceso de producción pueda ser desarrollado con naturalidad, pero siendo conscientes que el agua resultante de estos procesos es agua alterada la devolvemos a sus fuentes originales lo cual genera problemas muy serios al ambiente.

### 1.4. Industria textil

Es la encargada de la manufacturación de productos textiles, que son implementos de consumo masivo que provee de empleos directos e indirectos siendo así un pilar muy importante de la economía no solo local sino mundial.

Como se trata de una industria muy bien diseñada esta cuenta con algunos procesos y subprocesos los cuales de una manera muy genérica se describirán a continuación.

- **Producción de fibras:** Son la base y materia prima para cualquier textil que dependiendo de su origen estas pueden ser: animales, vegetales, sintéticas
- **Hilandería:** Aquí se convierte las fibras en hilos.
- **Tejeduría:** Aquí se convierte los hilos en telas
- **Tintorería y acabados:** Aquí las telas son teñidas y en algunos casos se adicionan otros elementos de manera física o química que mejoren las características del textil (resistencia, color elasticidad, etc).
- **Confección:** Aquí los textiles son transformados en productos más elaborados tales con ropa, menaje, etc.
- **No tejidos:** Son productos que son distribuidos sin haber pasado por los procesos tejeduría ni confección.

Para nuestra investigación nos concentraremos en el proceso de teñido y acabado en los cuales se emplean procesos químicos y físicos que después de finalizados generan residuos peligrosos evacuados por medio de arrastre y enjuague de aguas y nuestro fin es identificar un proceso electroquímico que mitigue esta contaminación ambiental tratando estos desechos antes de que el agua pase por un sistema de alcantarillado y posteriormente regrese a su fuente primaria (ríos mares etc).

El problema con estas aguas residuales que no han sido tratadas es la presencia de cantidad considerables de colorantes, contaminantes orgánicos, inorgánicos, compuestos químicos sintéticos, materia en suspensión, orgánicos refractarios, tenso activos y compuestos clorados; y como resultado de esta mezcla de contaminantes se convierte en un efluente muy difícil de tratar; y que para hacerlo de una manera “normal o común” se emplean muchos procesos con la finalidad de eliminar cada uno de estos contaminantes de forma específica o por separado, pero hacerlo de esta manera es igual a decir mayor gasto energético, mayor número de procesos y disminución del margen de utilidad

### 1.5. Características de las aguas residuales en la industria textil

Según datos del 2007 de los 200 mil millones de m<sup>3</sup> de agua dulce destinadas para la industria 2.5 mil millones de m<sup>3</sup> alrededor del 1.25% está destinada para la industria textil; teniendo en cuenta que la relación de producción textil en un corte medio habla del empleo de 20 toneladas de agua por cada tonelada de producto textil obtenido de las cuales el 90% son desechadas ya que no es factible su reutilización

Uno de los problemas al tratar aguas procedentes de residuos textiles es que estas son muy irregulares por ser el resultado de procesos y los residuos generados dependerán de la etapa de la cual son procedentes

En el siguiente cuadro observaremos una clasificación general de las aguas residuales textiles y sus efectos

<b>Clasificación</b>	<b>Efectos Contaminantes</b>
<b>Materias en suspensión:</b> (Residuos minerales, fibras, sustancias insolubles, etc.) Son relativamente escasas en los efluentes textiles excepto en los lavaderos de lana.	• Las materias disueltas se depositan lentamente sobre los cursos de agua, si el depósito es importante afecta la vida acuática. Cuando estas materias son de naturaleza orgánica se descomponen progresivamente agotando el oxígeno y generando gases tóxicos y mal olientes.
<b>Materias flotantes:</b> Aceites, grasas y espumas	• Disminuyen el crecimiento de la flora acuática al impedir la penetración de la luz. Los aceites en particular son tóxicos y perturban la aireación de los cuerpos acuáticos y destruyen la vegetación. La industria textil sólo genera grasas y aceites de forma importante en el lavado de la lana y en los procesos de estampación en los que intervienen pastas de petróleo. Los tensoactivos son de uso generalizado y en concentraciones bajas (1 - 3 mg/L) son suficientes para producir espuma al verter el agua incluso después de un proceso de depuración. No obstante si las cantidades de tensoactivo son pequeñas la espuma desaparece después de muy pocos metros del vertido
<b>Impurezas disueltas:</b> Son los contaminantes presentes en las ARI textiles de mayor importancia, entre estos se encuentran: ácidos, álcalis, reductores, oxidantes, colorantes y un sin número de productos auxiliares todos ellos solubles en agua	• Los reductores y la materia orgánica disuelta consumen el oxígeno. Algunos de los productos contaminantes disueltos pueden ser además tóxicos, como los derivados fenólicos, transportadores de tintura, cromo, grasa, aceites, metales pesados, etc

**Fuente: (Adriana Aristizabal, Catalina Bermúdez, 2007)**

## **1.6. Contaminación del agua (Industria Minera )**

La preocupación del desarrollo de la actividad minera alrededor del mundo es un tema en auge, y nuestro país no es ajeno a esta problemática y conoce bien los efectos de la minería en áreas tradicionalmente mineras como Zaruma, Portovelo, Nambija y más reciente en la zona norte de Esmeraldas.

Algunos de los procesos contaminantes es el drenaje de roca ácida, que es un proceso natural en el cual el ácido sulfúrico es producido ya que los sulfatos de las rocas son expuestos al aire libre o al agua. El drenaje de la MINERÍA ácida es el mismo proceso, solo que en una cantidad mayor, aumentando así considerablemente las cantidad de ácido que acaban en los yacimientos de agua

También por la minería podemos encontrar la contaminación de metales pesados tales como el arsénico, el cobalto, el cobre, el cadmio, el plomo, la plata y el zinc y según últimos estudios en la provincia de Esmeraldas realizados por la SENAGUA el aluminio que están contenidos en las rocas excavadas o expuestos en vetas en una mina subterránea, que entran en contacto con el agua.

### **1.6.1. Drenajes Ácidos de Minas (DAM)**

La contaminación por drenajes ácidos es el principal problema de acidez que tiene la explotación minera a nivel mundial por sus características de contaminación así como la dificultad su en la remoción para la remediación ambiental

Estos drenajes se caracterizan por su pH que comúnmente está en el rango de 2.9-3.3, alto contenido de sales disueltas como sulfatos en cantidades aproximadas de 2246mg/L, y elevadas concentraciones de metales pesados como el Hierro en cantidades promedio de 576.4mg/L , Aluminio 33.2 mg/L, Manganeseo 9.1 mg/L y Zinc 1.42 mg/L. No obstante dependiendo de dónde esté ubicada la mina también podremos encontrar la presencia de metales como el cobre, níquel, cromo, plomo y arsénico que también son catalogadas como sustancias tóxicas

### **1.6.2. Estabilidad de los coloides**

Los coloides o sistemas coloidales están formados por dos o más fases una normalmente es el fluido y otras forma las partículas suspendidas en el medio, estas partículas pueden tener un origen orgánico o inorgánico pero en ambos casos van adquirir una carga iónica debido al medio o a su disociación

Los coloides normalmente son estables en solución. Entre los factores estabilizantes se tienen las fuerzas que generan repulsión entre ellos, en este sentido las fuerzas electrostáticas y la hidratación resultan siendo favorables. En contraste, las fuerzas de atracción provocan la desestabilización de estas micropartículas. Entre estas factores se encuentran la gravedad, el movimiento browniano y las fuerzas de Van der Waal

## 1.7. Electroquímica

La Electroquímica trata de la interrelación de los fenómenos químicos y eléctricos, así como del estudio de las propiedades eléctricas de las soluciones de los electrolitos, estableciendo una relación entre la acción química y eléctrica de tales sistemas.

### 1.7.1. Reacción electroquímica

Una reacción electroquímica la podemos definir como una reacción redox en la que el intercambio de electrones tiene lugar en un electrodo. El cambio químico es producido por el intercambio de electrones realizado entre un electrodo y un aceptor o donador de electrones en una disolución

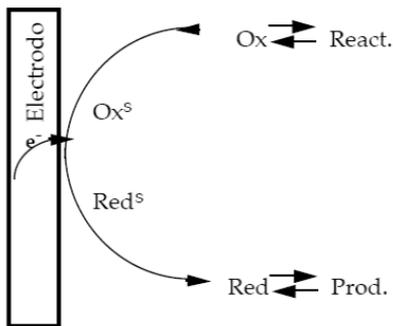


Fig:1.6.1-1 Esquema de intercambio electrónico en una reacción redox

### 1.7.2. Electrodo

Un electrodo es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito

#### 1.7.2.1. Conductores

- **Conductores de primera especie:**

En un metal las partículas móviles (o portadores) son los electrones.

- **Conductores de segunda especie:**

En una solución electrolítica o en una sal fundida los portadores son los cationes y los aniones. La capacidad de una solución para conducir la electricidad depende de las propiedades y la concentración de los portadores de carga.

### **1.7.3. Celda electrolítica**

Se denomina celda electrolítica al dispositivo utilizado para la descomposición mediante corriente eléctrica de sustancias ionizadas denominadas electrolitos.

Las celdas electroquímicas pueden ser de dos tipos: galvánicas o electrolíticas.

#### **1.7.3.1. Celda Galvánica**

Las celdas galvánicas (también llamadas voltaicas) almacenan energía eléctrica. En éstas, las reacciones en los electrodos ocurren espontáneamente y producen un flujo de electrones desde el cátodo al ánodo (a través de un circuito externo conductor). Dicho flujo de electrones genera un potencial eléctrico que puede ser medido experimentalmente.

#### **1.7.3.2. Celda Electrolítica**

Estas celdas no son espontáneas y debe suministrarse energía para que funcionen. Al suministrar energía se fuerza una corriente eléctrica a pasar por la celda y se fuerza a que la reacción redox ocurra.

## **1.8. Métodos electroquímicos para el tratamiento de aguas Residuales**

En la actualidad los procesos electroquímicos han alcanzado un estado en el cual no son solamente comparables desde el punto de vista económico con otros procesos sino que también son más eficientes, compactos y automatizados. Los procesos electroquímicos utilizados en el tratamiento de aguas se basan en la utilización de electricidad para producir una reacción química destinada a la eliminación o destrucción del contaminante presente en el agua. Básicamente el sistema electroquímico está formado por un ánodo, donde ocurre la oxidación, un cátodo, donde tiene lugar la reducción y una fuente de corriente continua encargada de suministrar la electricidad. Los parámetros claves a la hora de aplicar un proceso electrolítico son diseño del reactor, naturaleza de los electrodos, y diferencia de potencial y/o corriente de trabajo. En este artículo se verán brevemente los distintos procesos electroquímicos empleados en el tratamiento de agua.

### **1.8.1. Electrodeposición**

Es un proceso de recuperación de metales disueltos en una solución (en este caso de desecho) ya sea para ayudar a recubrir metales nobles y hacerlos más resistentes o recuperar metales a rastrados por las corrientes de desfogue que pueden ser nuevamente empleados en el proceso industrial con beneficio tanto económico como ambiental

### **1.8.2. Electrocoagulación**

El proceso de electrocoagulación implica la generación del coagulante *in situ* disolviendo electrolíticamente ánodos de aluminio o hierro para formar los respectivos cationes  $Al^{+3}$ ,  $Fe^{+2}$ .

Las principales ventajas de la electrocoagulación respecto a la coagulación clásica es la mayor eficiencia de los cationes nacientes de aluminio y hierro generados frente a los provenientes de productos químicos tradicionales como sulfato de aluminio o hierro, equipos más compactos, menor costo, posible automatización y menor generación de sales y residuos.

### **1.8.3. Electroflotación.**

El proceso de electroflotación (EF) es un proceso simple por el cual los contaminantes flotan en la superficie del agua adsorbidos sobre las pequeñas burbujas de hidrógeno y oxígeno generadas respectivamente en el cátodo y en el ánodo en el proceso de descomposición electrolítica del agua. La eficiencia del proceso de flotación está fundamentalmente determinada por el tamaño de las burbujas generadas, son preferibles las burbujas pequeñas ya que proporcionan una mayor superficie de contacto para la adsorción de las partículas a eliminar. Esta una de las principales ventajas del proceso de EF respecto a otros procesos de flotación clásicos como DAF (dissolved air flotation). El 90 % de las burbujas generadas en EF tienen un tamaño entre 15 y 45  $\mu m$  mientras que en el proceso DAF el tamaño oscila entre 50 y 70  $\mu m$ .

### **1.8.4. Electrooxidación.**

Los procesos de EO son los más interesantes y sus estudios se remontan a finales del siglo XIX, cuando se estudió la descomposición química de cianuro. La idea básica de estos procesos es la oxidación total (mineralización) o parcial (conversión de la materia orgánica a compuestos más sencillo más fácilmente degradables y menos contaminantes) de la materia orgánica utilizando la corriente eléctrica. Estos procesos están íntimamente relacionados con procesos anódicos.

### **1.8.5. Electrodesinfección.**

En este tipo de reacción es similar a la oxidación indirecta, en el ánodo se genera cloro gas por la oxidación de los iones cloruros, que disuelto en el agua genera hipoclorito/hipocloroso, el verdadero desinfectante. La mayor parte de las aguas contienen suficiente cantidad de iones cloruro para lograr la desinfección.

Para resolver el problema de contaminación del agua a causa de colorantes en aguas residuales existen investigaciones que han considerado la construcción de sistemas de electrocoagulación como parte de la solución, a continuación se explica la construcción y la aplicación de este sistema.

### **1.8.6. Flocculación**

Es el proceso en el cual se añade un floculador el cual hace que las partículas dispersas como coloides precipiten para su posterior filtrado; este es un paso muy importante para el proceso de purificación del agua

## 1.9. Electrocoagulación (EC)

Es una alternativa empleada para el tratamiento de aguas residuales. Al igual que la coagulación convencional, este tratamiento pretende adicionar cationes metálicos a las aguas a tratar. En la EC estos cationes se generan “in situ” como consecuencia de la aplicación de corriente eléctrica al agua, esto se realiza a través de placas paralelas hechas de materiales como aluminio o hierro.

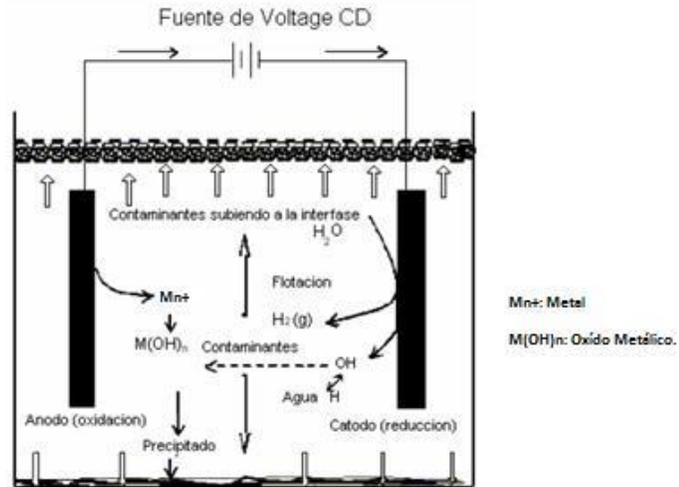


Fig: 1.9-1 Esquema del Proceso de EC (Tomado de: Mollah P. *et al*, 2004)

### 1.9.1. Etapas de la EC

Según Mollah P. *et al*, 2004 el proceso de electrocoagulación sigue las siguientes etapas:

“1. Formación de Coagulantes. Inicialmente se da la corrosión electroquímica del metal producto del paso de corriente eléctrica por el sistema. El metal se desprende en forma de cationes desde la superficie del ánodo de sacrificio, mientras que en la superficie del cátodo se puede dar la hidrólisis del agua, obteniendo como producto iones hidroxilo e hidrogeno gaseoso. Los iones de hidroxilos (formados o presentes en el agua residual) reaccionan para formar complejos metálicos de características diferentes.

2. Desestabilización de Contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión. Las partículas coloidales se desestabilizan debido a la compresión de su doble capa difusa, este fenómeno se da por la interacción de las partículas con los complejos metálicos formados anteriormente. Estos complejos metálicos también favorecen la neutralización de cargas presentes en el agua residual y la reducción de la repulsión electrostática entre los coloides, dando paso al proceso de coagulación.

3. Coagulación de las fases desestabilizadas para formar flóculos. El proceso de coagulación da paso a la formación de redes que atrapan las partículas coloidales presentes en el agua residual”

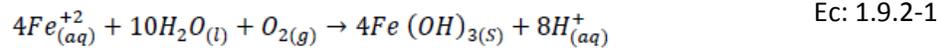
### 1.9.2. Reacciones relacionadas con el proceso de EC

Las reacciones en el proceso serán dependientes de dos cosas, las partículas dispersas y el material de los electrodos

Así según Yousuf M. et al,2001 para el caso de utilizar hierro se han propuesto dos mecanismos:

#### Mecanismo I : Formación del Hidróxido Férrico

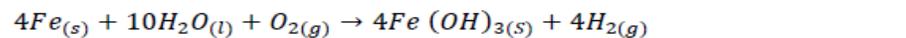
Ánodo



Cátodo



Reacción Global



#### Mecanismo II: Formación del Hidróxido Ferroso

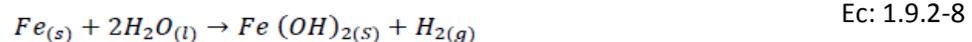
Ánodo



Cátodo



Reacción Global



Estos óxidos aglomeraran los coloides los atraparan y los harán precipitar para así ser removidos del agua residual.

### 1.9.3. Variables que afectan al proceso

**Tiempo:** Que hace referencia a la duración del proceso que es proporcional a la cantidad de iones de hierro disueltos.

**Densidad de corriente:** Es la corriente aplicada por unidad de área sumergida de electrodo. La eficiencia de la EC depende de la densidad de corriente, porque esta dosifica la cantidad de coagulante. Sin embargo, si la corriente es alta existe la posibilidad de que esta no se transforme totalmente en una dosificación más alta de coagulante. Sí existen pérdidas, el proceso se vuelve menos eficiente, lo cual se refleja en una mayor formación de óxido en el ánodo (Heidmann & Calmano, 2007) y en la disminución del tamaño de las burbujas de gas afectando la remoción por flotación (Guohua., 2004).

**pH:** Determina el tipo de especies iónicas que actúan como coagulantes. Influye en la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar el hidróxido, depende del material del electrodo y del pH inicial de la solución a tratar. (Stephenson & Tennant, 2003)

**Material de electrodo:** Dependiendo del material de electrodo se obtienen las reacciones de oxidación y reducción respectivas. Generalmente se utiliza hierro y aluminio por la formación de hidróxidos metálicos que forman los núcleos de las partículas coloidales.

**Conductividad:** Un aumento de la conductividad eléctrica produce un incremento en la densidad de corriente. La sal (NaCl) aumenta la conductividad de la solución a tratar. Los iones de cloruro pueden reducir los efectos de otros iones ( $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) que producen una capa insoluble la cual se deposita sobre los electrodos reflejándose un decaimiento de la corriente

### 1.10. Proceso de Floculación

Es el proceso en donde la intervención de sustancias floculantes ayudan a aglutinar las sustancias coloidales presentes en soluciones acuosas, facilitando de esta forma su decantación y posterior eliminación. Este proceso está precedido por la coagulación en donde se desestabilizan las partículas coloidales con la adición de un agente coagulante, su posterior neutralización hace que estas partículas tiendan a unirse. En el caso de la EC el agente coagulante se produce in situ.

El tiempo y el gradiente de velocidad son factores determinantes en el proceso, estos se relacionan con la probabilidad de que las partículas se unan y finalmente se precipiten por efecto de la gravedad. En este proceso, el pH determina la solubilidad y desestabilización de ciertas sustancias.

Los sistemas de purificación de aguas residuales en general contienen etapas de coagulación, floculación (clarificación), sedimentación y filtración.

## 2. METODOLOGIA

Con referencia a nuestro trabajo que es solo teórico tomaremos los datos y procedimiento de dos tesis ya realizadas una realizada; una por EVELYN TIFFANY PANTOJA PIARPUZÁN de la Universidad del Valle de Cali Santiago del año 2012, trabajo realizado para obtener el título en Ingeniería Química que hace referencia al tratamiento por electrocoagulación y floculación de DRENAJES ACIDOS DE MINA (DAM). Y el otro trabajo de tesis realizado por: ANDREA NATHALY MALDONADO ROGEL y RENATO MIGUEL MOLINA AYALA de la Universidad Politécnica Salesiana sede en Cuenca previo a la obtención del título en Ingeniería Ambiental realizada en el año 2011 que hace referencia al tratamiento del agua producto de la industria textil por electrocoagulación, a continuación se analiza la metodología que se utiliza en cada documento citado.

### 2.1. Método de análisis para la muestra de metales pesados.

Se toma una muestra procedente del canal de desagüe de una mina de carbón y los parámetros como turbiedad, color, conductividad, pH, ST, DQO y sulfatos se miden con los instrumentos disponibles en el Laboratorio de Investigación.

En la parte experimental se realiza la electrocoagulación hasta la etapa en donde se dosifican los iones de hierro electro generado en la celda y aún no se forman flóculos. Este proceso se llama electro disolución. Después de la Electro Disolución se lleva a cabo la Floculación en donde se da la formación de flóculos.

Inicialmente el reactor de Electro Disolución se carga con cierta cantidad de Drenajes Ácidos de Minas de carbón. Este volumen permite obtener un área superficial activa. El tiempo de duración de la Electro Disolución se calculó con las cargas evaluadas para el proceso y con una densidad de corriente.

$$t = \frac{Cv}{JA} 1000 \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde t es el tiempo (s), C la carga(c/L), c los culombios (sA), v el volumen a tratar(L), A el área (cm<sup>2</sup>) y J la densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>).

Luego de la Electro Disolución se toma 1/3 del volumen del agua y se oxida en un recipiente aparte con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (120 ppm). La oxidación se realiza hasta observar un cambio en el color de la solución y se agita rápidamente para descomponer el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> que no reaccionó. Este volumen oxidado nuevamente

se mezcla con los 2/3 de agua que no se sometieron a oxidación. La razón por la que se hace este procedimiento es para poder obtener cationes  $Fe^{+2}$  y  $Fe^{+3}$  en solución.

La solución resultante se somete al proceso de Floculación, en donde se agita constantemente a 95 rpm y se adiciona cal hidratada (5% w/w) hasta alcanzar el pH deseado. Posteriormente se adiciona floculante (poliacrilamida aniónica PAM) y se continúa con la agitación por 10 minutos; esto permite el aumento de tamaño en los flóculos formados. Finalmente se filtra el lodo formado y se obtiene el agua tratada (sobrenadante).

Las medidas de turbiedad, sulfatos y pH se hacen al final de todo el proceso en base a las características finales del sobrenadante.

Los ensayos que se realizan en las pruebas preliminares se obtiene que los mejores resultados se dieron a 200 c/L y pH altos (8-10). Con el fin de evitar la dosificación de  $H_2O_2$  se realiza el proceso con las condiciones destacadas (200 c/L, pH 8 y 10) pero incrementando el valor de la densidad de corriente a 9.1 mA/cm<sup>2</sup>.

Finalmente dosifican Sulfato de Magnesio (114 ppm) con el fin de ayudar en el proceso de FC, atrapando los iones metálicos presentes en la muestra de DAM.

Con las condiciones de operación encontradas se realiza nuevamente el proceso con replica para poder hacer las medidas finales y cuantificar los parámetros como

DQO, Color, ST, conductividad y metales.

#### *Métodos de análisis*

- ✓ pH y Conductividad. multiparámetro.
- ✓ Turbiedad. Turbidímetro
- ✓ Sulfatos. Esta determinación se lleva a cabo por medio del método turbidimétrico que precipita el ion sulfato ( $SO_4^{-2}$ ) con cloruro de bario ( $BaSO_4$ ) en presencia de ácido acético ( $CH_3COOH$ ). Este valor se determina haciendo una dilución 7:1000 en agua destilada, para entrar en el rango de medición (10-40 mg/L  $SO_4^{-2}$ ) que maneja la curva de determinación de sulfatos montada en el laboratorio.
- ✓ Color. Se realiza con un espectrofotómetro. Este valor fue determinado haciendo una dilución 1:5 en agua destilada.
- ✓ Sólidos Totales. Estas medidas se realizan con un volumen de 2 mL muestra y llevándolas al horno a 105°C. El proceso avanza hasta que el peso de la muestra permanezca constante.
- ✓ DQO. Estas mediciones se realizaron de acuerdo con la norma ASTM y se utiliza un equipo espectrofotométrico.
- ✓ Metales. Estas determinaciones se realizan con un equipo de absorción atómica.

## 2.2. Método de análisis para la muestra de Colorantes

Para resolver el problema de contaminación del agua a causa de colorantes en aguas residuales existen investigaciones que han considerado la construcción de sistemas de electrocoagulación como parte de la solución, a continuación se explica la construcción y la aplicación de este sistema.

### 2.2.1. Procesos de laboratorio

#### Obtención de Aguas Residuales del Sector Industrial

El análisis de aguas residuales para esta investigación provenientes de industrias textiles se realizó en Cuenta, ciudad que consta con un amplio campo industrial, las muestras fueron recolectadas de dos industrias y posteriormente fueron enviadas a analizar en los laboratorios, tomando en cuenta los resultados arrojados del análisis se realizó un agua similar con respecto a la composición, para así simular el proceso de descontaminación en el laboratorio.

Una vez obtenida las características similares a la muestra tomada de las industrias textiles y sus características necesarias para el buen rendimiento de este trabajo, se procede a registrar el tiempo de inicio y el de finalización, se regula el voltaje y proceden a tomar la muestra cero, de este modo arranca el proceso de electrocoagulación.

En la denominada muestra cero se analiza: sólidos disueltos, sólidos suspendidos y las unidades de color con la realización de marchas analítica.

**Sólidos en suspensión:** Este tipo de sólidos como tales son difíciles de eliminar siendo necesario la adición de al agua de agentes coagulantes y floculantes que modifican la carga eléctrica de estas partículas consiguiendo que se agrupen en flóculos de mayor tamaño para así poder separarlos mediante filtración.

**Sólidos disueltos:** Están relacionados con la conductividad del agua ya que un aumento de estos iones aumenta la capacidad conductiva.

**Unidades de Color:** Para determinar las unidades de color utilizamos un colorímetro, esto se lo hace al iniciar la práctica, en cada muestra tomada en el tiempo correspondiente y al finalizar el tratamiento, y mediante un cálculo se expresa ese porcentaje.

### 2.2.3. Etapas diseño de experimentos

Las etapas están diseñadas de manera que se obtenga la máxima información al mínimo costo posible.

- a) La limitación del estudio y comprensión del problema.

En este etapa consta la realización de investigaciones en las empresas textiles que utilizan diferentes colorantes como materia prima, la recolección de muestras para determinar los parámetros óptimos con los cuales debe trabajar un proceso electroquímico para dar un tratamiento a las aguas residuales

de las empresas textiles ya que los resultados demostraron que las descargas realizadas que realizan las empresas no cumplen los parámetros.

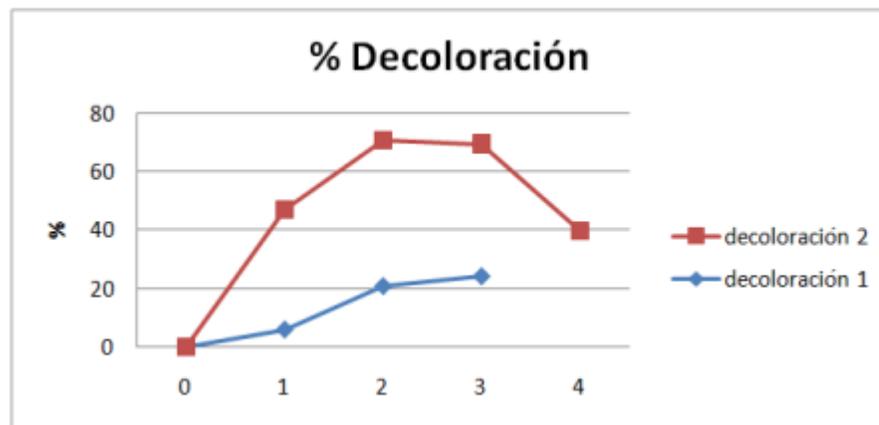
b) Medición de Variables

Esta variables deben reflejar el problema es decir que caractericen el objetivo de estudio, en este caso serían las unidades de color UC, sólidos suspendidos y sólidos disueltos.

c) Factores que deben ser objeto de estudio.

Los factores son los que el investigador escoge para establecer agrupaciones de estudio en este caso sería el tiempo, colorante, voltaje

**Gráfico 1: Decoloración en el tiempo-horas**

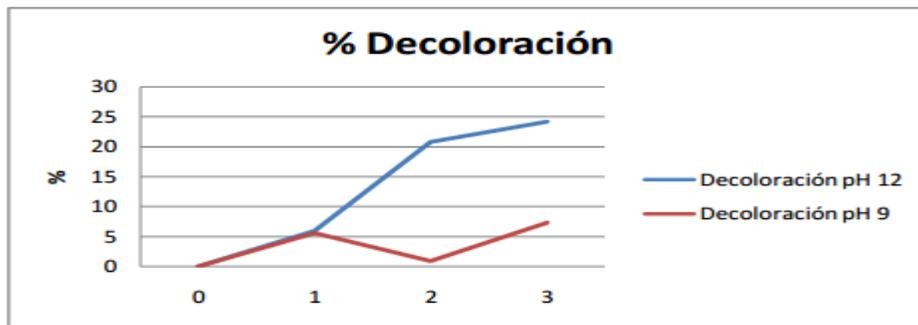


**Fuente:** <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1508/13/UPS-CT002191.pdf>

**Tiempo:** En este gráfica se puede apreciar que el punto de mayor decoloración ocurre en la tercera hora, si el proceso continua tiende a disminuir el porcentaje de decoloración debido a otros factores.

**pH:** Se desarrollaron pruebas de laboratorio con distintos pH, con 3, con 7, y con 14, obteniendo resultados favorables con los dos últimos. Debido a estos resultados se estableció el pH como un factor, y se considera los niveles de 9 y 12.

**Gráfico 2 : Decoloración de la solución con respecto al pH**

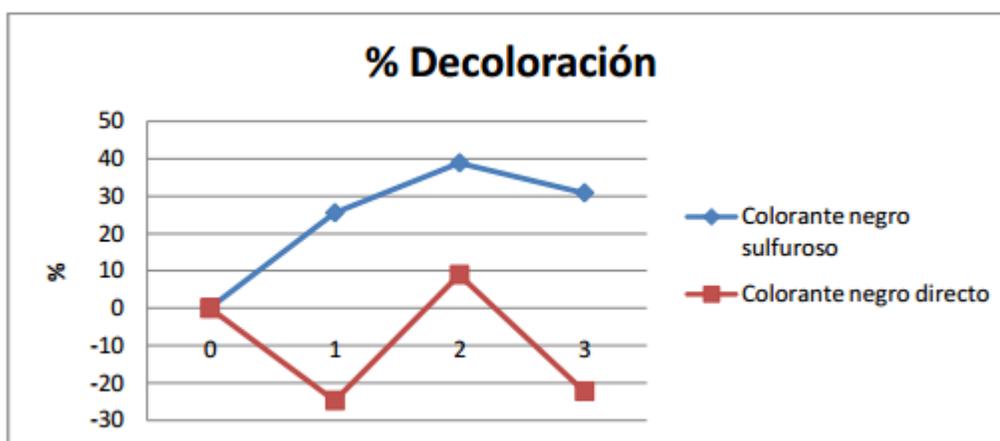


Fuente: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1508/13/UPS-CT002191.pdf>

En este Gráfico se puede observar que el sistema trabajo mejor con pH alcalino.

**Colorante:** Se compara entre el colorante negro sulfuroso tomado de las tintorerías y el colorante directo, realizando el mismo proceso y conociendo de esta forma cual tiene mayor porcentaje de decoloración.

**Gráfico 3: Decoloración de la solución con respecto al colorante**

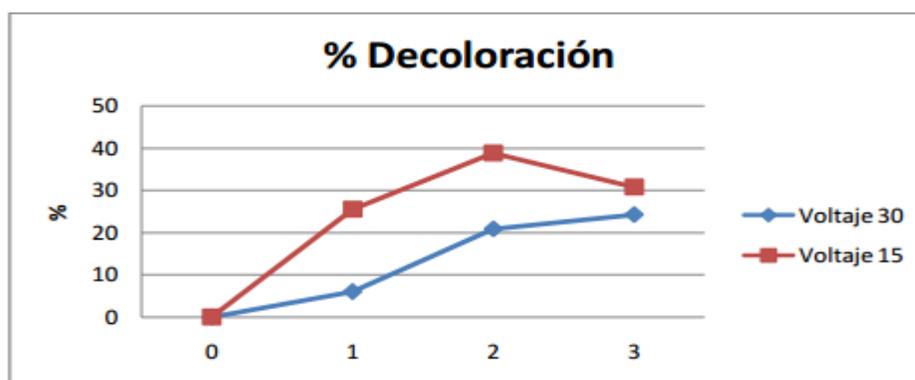


Fuente: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1508/13/UPS-CT002191.pdf>

En este gráfico se puede observar que el colorante negro sulfuroso tiene un mayor porcentaje de decoloración.

**Voltaje:** Para determinar que el voltaje es un factor importante, se realizan pruebas en laboratorio con diferentes voltajes dando como resultados voltajes de 15 y 30 Voltios.

**Gráfico 4 : Decoloración de la solución con respecto al voltaje.**



Fuente: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1508/13/UPS-CT002191.pdf>

En este gráfico se puede observar que en el voltaje de 30 la decoloración incrementa porcentualmente en cada hora sin ninguna variación y de manera continua.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.A. Resultados de la tesis de EVELYN TIFFANY PANTOJA PIARPUZÁN de la Universidad del Valle de Cali Santiago “**Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón**”

**Tabla 3.A-1 Datos referenciales**

	<b>Unidades</b>	<b>Cantidades Permitidas</b>
pH		5-9
Turbiedad	NTU	2
Color	Pt/Co	<15
DQO	mg/L	500
Hierro	mg/L	10
Manganeso	mg/L	2
Zinc	mg/L	2

Fuente: Decreto 1594 de 1984. Uso de agua y vertimientos líquidos.  
www.minambiente.gov.co

**Tabla 3.A-2 Resultados finales del tratamiento de electrocoagulación y floculación**

	<b>Unidades</b>	<b>DAM sin Tratar</b>	<b>Después del TTO</b>
pH		2.4	6.14
Turbiedad	NTU	109	1.08
Conductividad	mS/cm	16	4.45
Sólidos Totales	ppm	5200	5650
Color	Pt/Co	397 (dilución 1 a 5)	7.9(sin dilución)
DQO	mg/L	142	84
Sulfatos	mg/L	6224	3937
Hierro	mg/L	303.98	1.77
Manganeso	mg/L	29.96	0.95
Zinc	mg/L	1.90	0.11

**Fuente:** EVELYN TIFFANY PANTOJA PIARPUZÁN de la Universidad del Valle de Cali Santiago “**Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón**” tesis 2012

3.B. Resultados de la tesis de ANDREA NATHALY MALDONADO ROGEL y RENATO

MIGUEL MOLINA AYALA de la Universidad Politécnica Salesiana“ESTUDIO PARA LA REDUCCIÓN DE COLORANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A TRAVÉS DE PROCESOS ELECTROQUÍMICOS”

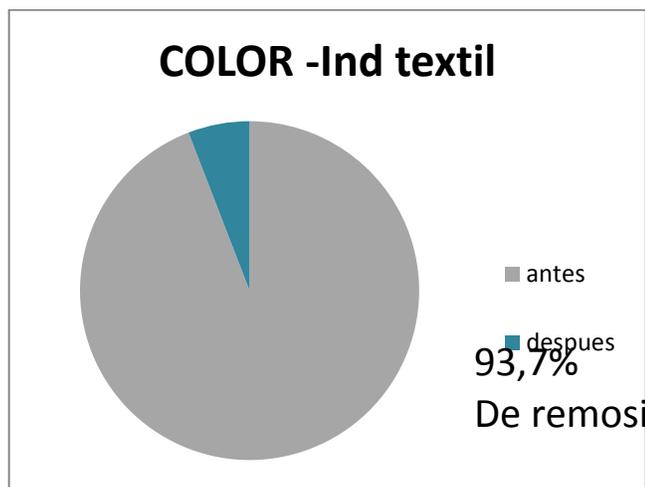
Tabla 3.B-1 Resultados finales del tratamiento de electrocoagulación (5 tratamientos)

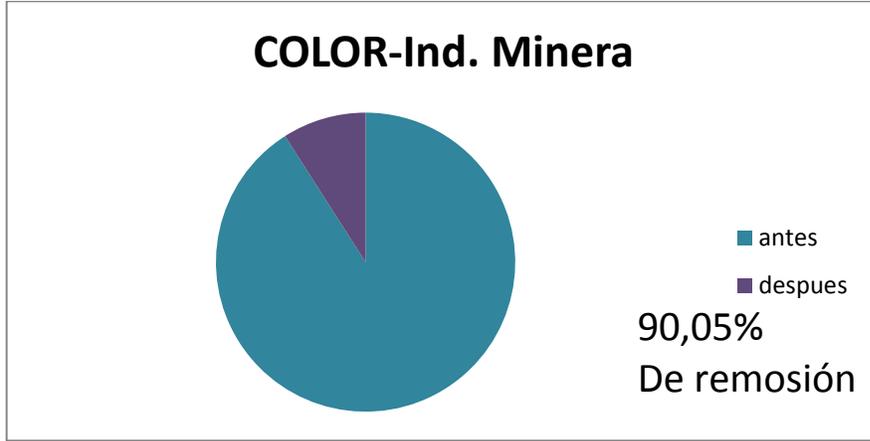
PARÁMETRO	UNIDAD	ANTES	DESPUÉS	% REMOCIÓN
Aceites y Grasas	mg/L	6,46	1,21	81
Color aparente	Units. Pt. Co.	9550	595	93,7
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	313	112	64,2
Detergentes	mg/L	0,915	0,429	53,1
DQO	mg/L	480	227	52,7
pH	UpH	9,24	9,07	1,84
Sólidos Sedimentables	mg/L	0,4	0,1	75
Sólidos Suspendedos	mg/L	84	71	15,5
Zinc	mg/L	0,1	0,07	30

**Fuente:** ANDREA NATHALY MALDONADO ROGEL y RENATO MIGUEL MOLINA AYALA de la Universidad Politécnica Salesiana“ESTUDIO PARA LA REDUCCIÓN DE COLORANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A TRAVÉS DE PROCESOS ELECTROQUÍMICOS”

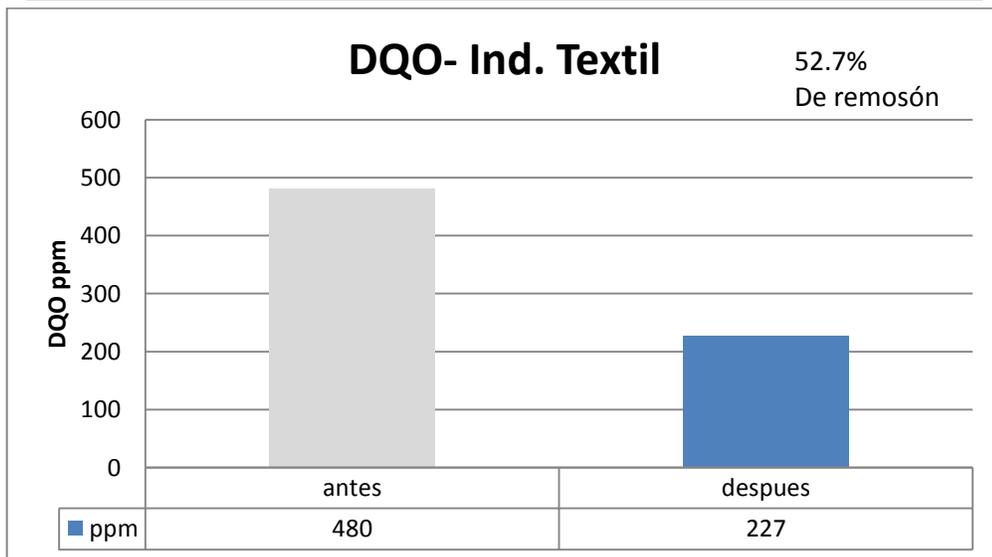
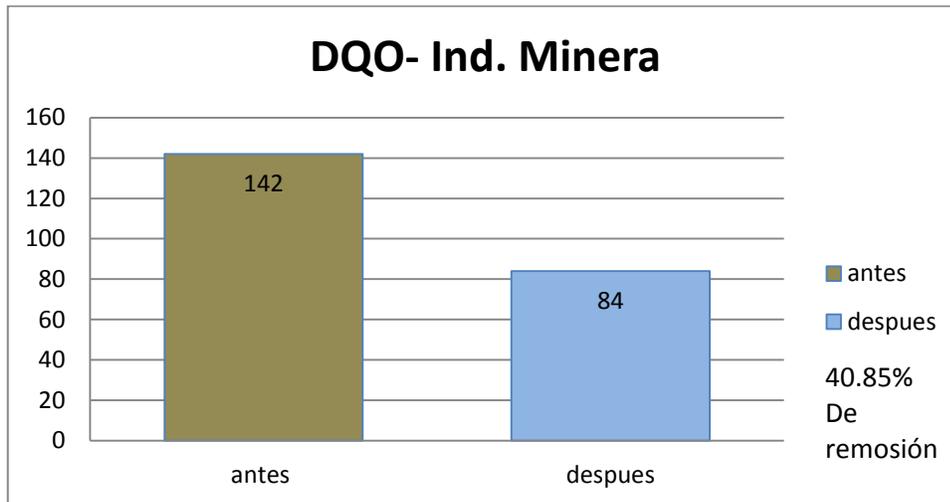
### 3.1. Interpretación y comparación de resultados

Gráfico 5: Color- Electrocoagulación Ind. Textil vs. Ind. Minera

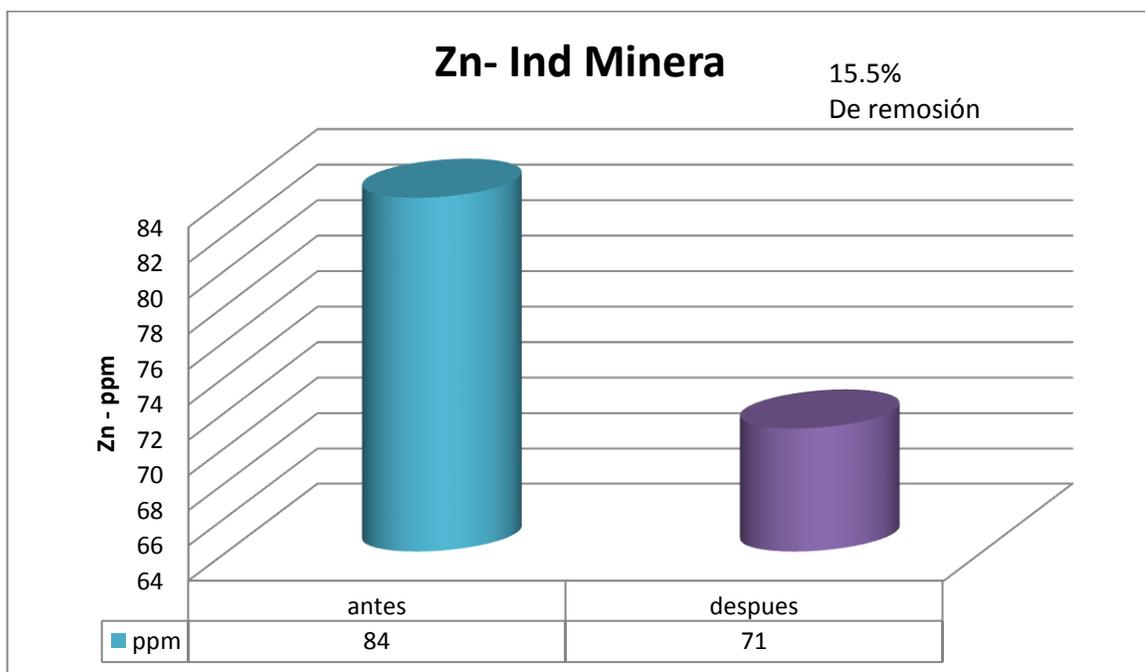
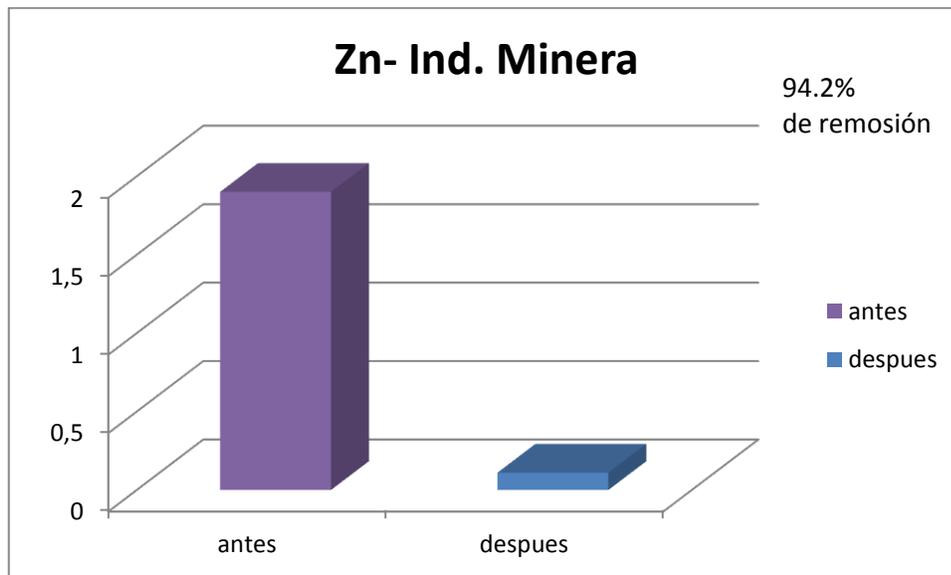




**Gráfico 6 : DQO- Electrocoagulación Ind. Textil vs. Ind. Minera**



**Gráfico 7: Zn- Electrocoagulación Ind. Textil vs. Ind. Minera**



### 3.2. Análisis de Resultados

La electrocoagulación se ve es un proceso muy eficiente en el tratamiento de aguas residuales aunque según los resultados hay un mejor funcionamiento para el control de aguas provenientes de la industria textil en lo que se refiere a DQO y a su coloración debemos aclarar que los datos pueden tener variables como el número de veces que pasa por el tratamiento que en la industria textil habla de 5 veces y en la minera de una pero complementada con la floculación.

Nuestra meta es dar una idea de la eficiencia de la electrocoagulación sea para la industria textil o minera y aunque se ve que el proceso por sí mismo no dará el resultado esperado (en una sola etapa) al aumentar el número de procesos o complementarlo con un otro adicional la electrocoagulación es viable para cualquiera de las dos industrias en lo que a eficiencia y regularización de normas se refiere ahora que en viabilidad en cuanto a costo económico no ha sido estudiada y esto dependerá del provecho que se obtenga del tratamiento

#### 4. CONCLUSIONES

- Con la realización de esta investigación se puede concluir que la electrocoagulación es un proceso electroquímico de gran utilidad en cuanto al tratamiento de aguas residuales ya sea en el campo textil donde se centra en la decoloración o en el tratamiento de aguas con metales pesados ya que basándose en los resultados para cada proceso se puede observar que hay un porcentaje significativo de remoción de colorante y metales pesados por lo que puede competir con los diferentes métodos químicos o biológicos que existen para el tratamiento de estas aguas.
- Según los datos recopilados se puede decir que el proceso de electrocoagulación presenta mejores resultados para el tratamiento de aguas residuales provenientes de industrias textiles ya que según se muestra para conseguir estos porcentajes en la remoción de metales pesados de aguas residuales provenientes de una mina es necesario implementar otro proceso a parte de la electrocoagulación como lo es la floculación lo que implica la inversión de más recursos económicos y mayor cantidad de tiempo.
- En cuanto al proceso electroquímico implementado en el área textil se puede concluir que es sumamente eficiente ya que su objetivo es el coagular las partículas que se encuentran dentro de la solución, para precipitarlas por su peso y así quedar retenidas por los filtros.
- Se puede concluir que para incrementar la eficiencia del proceso de electrocoagulación como tratamiento para aguas residuales con colorante se debe tener en cuenta algunos factores como el pH, el tiempo, el voltaje y el tipo de colorante como se pudo constatar en la información recopilada donde para un pH de 12 y un voltaje de 30V los resultados mejoran pudiendo ir de 70 % a 90% de decoloración.
- Para mejorar la remoción de metales pesados de aguas residuales se puede aplicar el proceso de electro disolución de hierro y floculación química puesto que los resultados según lo investigado son muy favorables reduciendo el valor de turbidez en 99%, DOQ 41%, hierro 99%, manganeso 96%, zinc 94% y sulfatos 38% con un mínimo consumo energético( 0.3 kWh/m).

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Trabajo de tesis ANDREA NATHALY MALDONADO ROGEL y RENATO MIGUEL MOLINA AYALA de la Universidad Politécnica Salesiana **“ESTUDIO PARA LA REDUCCIÓN DE COLORANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A TRAVÉS DE PROCESOS ELECTROQUÍMICOS” 2011**
- Trabajo de tesis EVELYN TIFFANY PANTOJA PIARPUZÁN de la Universidad del Valle de Cali Santiago **“Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón” 2012**
- Yousuf M., Mollah A., Schennach R., Parga J.R., and Cocke D.L. Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials B84 (2001)29-41.*
- Stephenson R. and Tennant B. New electrocoagulation process treats emulsified oily wastewater at Vancouver Shipyards. [on line]. Vancouver: Environmental Science & Engineering, 2003.
- Mollah, P., Morkovsky., Gomes J.A.G., Kesmez, M., Parga J. and Cocke D.L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, an future perspectives of eletrocoagulation. *J. Hazard. Mater. 114 (1-3) (2004) 199-210.*
- La corriente eléctrica y el movimiento de iones, 10 de Julio de 2010, <http://labquimica.wordpress.com/2008/08/06/la-corriente-electrica-y-el-movimiento-de-iones/>

