



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA  
Y RECURSOS HIDRÁULICOS**

**EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL SISTEMA  
“ELECTROCOAGULACIÓN” COMO TRATAMIENTO Terciario PARA LA  
REDUCCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL, FÓSFORO TOTAL Y MEJORA DEL  
ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD EN AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN  
DOMÉSTICO.**

**ING. QCO. LUIS RODOLFO CASTRO GARCÍA  
ING. CIVIL EDGAR FERNANDO CLARA RECINOS**

Asesorado por el  
MSc. Ing. Zenón Much Santos

**GUATEMALA, NOVIEMBRE 2012**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL SISTEMA  
“ELECTROCOAGULACIÓN” COMO TRATAMIENTO Terciario PARA LA  
REDUCCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL, FÓSFORO TOTAL Y MEJORA DEL  
ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD EN AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN  
DOMÉSTICO.

**ESTUDIO ESPECIAL**

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR:

**ING. QCO. LUIS RODOLFO CASTRO GARCÍA**  
**ING. CIVIL EDGAR FERNANDO CLARA RECINOS**

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA SANITARIA**  
(*MAGISTER SCIENTIFICAE*)

ASESORADO POR EL MSc. ING. ZENON MUCH SANTOS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE  
INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁLCICOS**

MSc. Ing. Pedro Saravia Celis

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN DE ESTUDIO ESPECIAL**

EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos

**ASESOR DE ESTUDIO ESPECIAL**

MSc. Zenón Much Santos

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR



Cumpliendo con los preceptos que establece la Universidad de San Carlos de Guatemala, presentamos a su consideración el trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL SISTEMA  
"ELECTROCOAGULACIÓN" COMO TRATAMIENTO TERCIARIO PARA LA  
REDUCCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL, FÓSFORO TOTAL Y MEJORA DEL  
ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD EN AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN  
DOMÉSTICO,**

tema que nos fue autorizado por la comisión de admisión y otorgamiento de grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), en marzo de 2011.

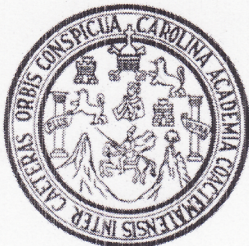
  
Ing. Luis Rodolfo Castro García

  
Ing. Edgar Fernando Clara Récinos

Guatemala, noviembre de 2012

Guatemala, 12 de noviembre del 2012

UNIVERSIDAD DE  
SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
Escuela Regional de Ingeniería  
Sanitaria y Recursos Hídricos

Edificio de ERIS,  
Instalaciones de Prefabricados, CII  
Ciudad universitaria Zona 12  
Ciudad de Guatemala 01012  
Guatemala, C..A.

Tel. (502) 24188000,  
Ext.86212 y 86213  
(502) 24189138  
(502) 24189140

Telfax (502) 24189124

[www.ingenieria-usac.edu.gt](http://www.ingenieria-usac.edu.gt)

M. Sc. Ing. Adán Pocasangre  
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos  
Hidráulicos "ERIS"  
Facultad de Ingeniería, USAC

Habiendo revisado el documento titulado:

**"Evaluación a escala laboratorio del sistema  
ELECTROCOAGULACION como tratamiento terciario  
para la reducción de Nitrógeno Total, Fósforo Total y  
mejora del Índice de Biodegradabilidad en aguas  
residuales de origen doméstico".**

Elaborado por los Ingenieros Luis Rodolfo Castro García y  
Edgar Fernando Clara Recinos, como parte de sus Estudio  
Especial, y como requisito para optar al grado académico  
de Maestro en Ingeniería Sanitaria, mediante la presente  
me permito informarle mi satisfacción con su contenido y  
por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con  
mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me  
suscribo de usted,

Atentamente.

**"ID Y ENSEÑAD A TODOS".**

Msc. Inge. Zenón Mush Santos  
Asesor del estudio



Guatemala, 14 de noviembre de 2012

Señores  
Comisión de admisión y otorgamiento de Grado  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Respetuosamente les comunico que he revisado en mi calidad de Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el documento de estudio especial II titulado:

**“EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL SISTEMA ELECTROCOAGULACIÓN COMO TRATAMIENTO Terciario PARA LA REDUCCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL, FÓSFORO TOTAL Y MEJORA DEL ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD EN AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMÉSTICO”**

UNIVERSIDAD DE  
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería  
Escuela Regional de Ingeniería  
Sanitaria y Recursos Hidráulicos  
ERIS

Presentado por los estudiantes de la maestría mencionada,

**Ingeniero Químico Luis Rodolfo Castro García**  
**Ingeniero Civil Edgar Fernando Clara Recinos**

Les manifiesto que los estudiantes han cumplido en forma satisfactoria con los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos – ERIS – y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes.

Edificio de ERIS  
Area de prefabricados Facultad de  
Ingeniería  
Ciudad Universitaria zona 12  
Ciudad de Guatemala 01012  
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,  
Ext. 86213 y 86212  
(502) 2418 9138

[www.ingenieria-usac.edu.gt](http://www.ingenieria-usac.edu.gt)

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos  
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

UNIVERSIDAD DE  
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería  
Escuela Regional de Ingeniería  
Sanitaria y Recursos Hidráulicos  
ERIS

Edificio de ERIS  
Area de prefabricados Facultad de  
Ingeniería  
Ciudad Universitaria zona 12  
Ciudad de Guatemala 01012  
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,  
Ext. 86213 y 86212  
(502) 2418 9138

[www.ingenieria-usac.edu.gt](http://www.ingenieria-usac.edu.gt)

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesor siguientes: Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, Ing. MSc. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera y Ing. MSc. Zenón Much Santos, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, y la revisión de lingüística efectuada por la Licenciada en Letras Gladys Tobar Aguilar colegiada No. 1450, del trabajo de los estudiantes Ingeniero Químico Luis Rodolfo Castro García, Ingeniero Civil Edgar Fernando Clara Recinos, titulado:

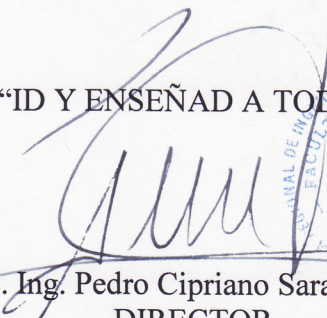
**“EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL SISTEMA ELECTROCOAGULACIÓN COMO TRATAMIENTO TERCIARIO PARA LA REDUCCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL, FÓSFORO TOTAL Y MEJORA DEL ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD EN AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMÉSTICO”**

En representación de la comisión de admisión y otorgamiento de grado, procede a la autorización del mismo.

Guatemala, 16 de noviembre de 2012

**IMPRÍMASE**

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

  
MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis  
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

## **AGRADECIMIENTOS A:**

Dios	Por darnos la vida, guiar nuestro camino y porque de Él viene la sabiduría
Nuestra familia	Padres, abuelos y hermanos por el apoyo y cariño brindado para alcanzar este triunfo en la vida
Nuestros amigos y compañeros	Por su amistad sincera y los momentos que hemos compartido, nuestros compañeros ERIS 2011.
Nuestro asesor	Ingeniero Zenón Much, por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo de graduación.
Ingeniero Adán Pocasangre	Por sus valiosos aportes y enseñanzas tanto profesionales como personales.
Al Laboratorio de Mecánica de Suelos	En especial a Omar Medrano y Mynor Castillo por su amistad y memorables momentos.
 La gloriosa y tricentenaria Universidad de San Carlos de Guatemala, nuestra <i>alma mater</i> .	



## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	III
<b>GLOSARIO</b>	VII
<b>RESUMEN</b>	XI
<b>OBJETIVOS</b>	XIII
<b>HIPÓTESIS</b>	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XVII
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	XIX
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	XXI
<b>1. ANTECEDENTES</b>	01
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	05
2.1 Fuerza Electromotriz entre las celdas	05
2.2 Corriente eléctrica	07
<b>3. DISEÑO DE LA UNIDAD DE ELECTROCOAGULACIÓN</b>	11
<b>4. METODOLOGÍA</b>	17
4.1 Caracterización del efluente	17
4.2 Diseño de la unidad electrocoagulación	17
4.3 Montaje a escala laboratorio	17
4.4 Muestreo	18
<b>5. ANÁLISIS ECONÓMICO</b>	21
<b>6. RESULTADOS</b>	25
<b>7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	29
<b>CONCLUSIONES</b>	31
<b>RECOMENDACIONES</b>	33
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	35
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÀFICAS</b>	37
<b>ANEXOS</b>	41



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Fuerza electromotriz	05
2. Isométrico unidad de electrocoagulación	11
3. Resistencias eléctricas unidad de electrocoagulación	12
4. Resistencia equivalente unidad de electrocoagulación	12
5. Área transversal unidad de electrocoagulación	14
6. Espesor y espaciamiento de placas unidad de electrocoagulación	14
7. Vista en isométrico unidad de electrocoagulación	15
8. Vista en planta unidad de electrocoagulación	16
9. Vista en perfil unidad de electrocoagulación	16
10. Unidad de electrocoagulación a escala laboratorio	18
11. Distribución normal	20
12. Diseño de la unidad de electrocoagulación	25
13. Corriente y voltaje en la unidad de electrocoagulación	26
14. Agua residual electrocoagulada	26
15. Índices de remoción por medio de electrocoagulación	29
16. Montaje de la unidad de electrocoagulación	41
17. Voltaje entre placas unidad de electrocoagulación	41
18. Producción de hidrógeno y oxígeno reacción electrolítica	42
19. Formación de flóculos producto de la electrocoagulación	42
20. Fotómetro y termoreactor utilizados	43
21. Concentraciones iniciales y finales de fósforo	43



## TABLAS

I.	Efectos de algunos factores controlables en electrocoagulación	03
II.	Efectos de algunas de las variables respuestas sobre el proceso de electrocoagulación	04
III.	Dosis óptima de sulfato de aluminio	09
IV.	Conductividades del agua a tratar	13
V.	Dosis óptima del agente coagulante	19
VI.	Parámetro de calidad del agua en la unidad de electrocoagulación	27
VII.	Porcentajes de remoción de los contaminantes en la electrocoagulación	27
VIII.	Costos por metro cúbico de agua residual a tratar	28



## GLOSARIO

<b>Aglomeración</b>	Proceso de unir partículas más pequeñas para formar una masa más grande.
<b>Aguas residuales</b>	Fluidos residuales en un sistema de alcantarillado. El gasto o agua usada por una casa, una comunidad, una granja, o industria que contiene materia orgánica disuelta o suspendida.
<b>Anión</b>	Ión cargado negativamente que resulta de la disociación de sales, de ácidos o de álcalis en la solución.
<b>Ánodo</b>	Sitio en la electrólisis donde el metal entra en solución como catión que se va detrás de un equivalente de los electrones que se transferirán a un electrodo opuesto, llamado cátodo.
<b>Biodegradabilidad</b>	Capacidad de un agua residual en descomponerse en los elementos químicos que lo conforman, debido a la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales.
<b>Catión</b>	Ión de carga positiva, resultado como la disolución de moléculas en agua.
<b>Cátodo</b>	Lugar en la electrólisis donde los cationes en disolución son neutralizados por electrodos que permanecen fuera de la superficie o produce una reacción secundaria con el agua.
<b>Circuito</b>	Es un camino cerrado por donde fluye la corriente eléctrica, desde el polo negativo hasta el polo positivo de una fuente de alimentación.

<b>Coloides</b>	Sistema fisicoquímico formado por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas. La fase dispersa es la que se halla en menor proporción.
<b>Coagulación</b>	Proceso de desestabilización de las partículas coloidales por medio de agentes externos llamados coagulantes.
<b>Coagulante</b>	Partículas líquidas en suspensión que se unen para crear partículas con un volumen mayor.
<b>Conductividad</b>	Cantidad de corriente eléctrica que una sustancia puede conducir. Está expresada en magnitudes químicas.
<b>Contaminante</b>	Compuesto que a una concentración suficientemente alta causa daños en la vida de los organismos.
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda bioquímica de oxígeno, es la cantidad de oxígeno necesaria para que una población microbiana heterogénea, estabilice la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua residual al cabo de cinco días.
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno, es la medida de la capacidad de consumo de oxígeno por los materiales orgánicos e inorgánicos presentes en el agua o en un agua residual para su degradación.
<b>Efluente</b>	La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, a un tanque de oxidación, a un tanque para un proceso de depuración biológica del agua, etc.
<b>Electrocoagulación</b>	Técnica electroquímica de tratamiento de aguas residuales donde un electrodo de sacrificio se corroe para que se lleve a cabo la coagulación.



<b>Electrodo</b>	Conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con un circuito.
<b>Eutrofización</b>	Proceso natural en ecosistemas acuáticos, especialmente en lagos, caracterizado por un aumento en la concentración de nutrientes como nitratos y fosfatos, con los consiguientes cambios en la composición de la comunidad de seres vivos.
<b>Floculación</b>	Proceso por el cual las partículas coloidales desestabilizadas llamadas flocs se agregan unas con otras, con el fin de sedimentarse.
<b>Flóculo</b>	Masa floculada que es formada por la acumulación de partículas suspendidas. Puede ocurrir de forma natural, pero es usualmente inducido, puede llegar a la capacidad de eliminar ciertas partículas del agua residual.
<b>Fósforo total</b>	Suma de las concentraciones de fosfatos, ortofosfatos, polifosfatos, fósforo inorgánico y fosfatos orgánicos.
<b>Hidrólisis</b>	La descomposición de compuestos orgánicos por la interacción del agua.
<b>Macronutriente</b>	Nutrientes que suministran la mayor parte de la energía metabólica del organismo. En aguas residuales se refiere al nitrógeno y fósforo.
<b>Nitrógeno total</b>	Representa el conjunto de las formas de nitrógeno reducidas orgánicas y amoniacales.
<b>Potencial eléctrico</b>	Magnitud que refleja el diferencial existente de tensión entre dos espacios de un mismo circuito. Se mide en voltios.
<b>Resistencia</b>	Oposición de un material al paso de corriente eléctrica.



## RESUMEN

El presente estudio especial tuvo como objetivo realizar el montaje y diseño de la unidad de electrocoagulación, la cual consistió en utilizar placas de aluminio de las dimensiones propuestas como electrodos, separadas a una distancia de 3.33 cm, estas se ajustan a un recipiente de vidrio con capacidad para 20 litros (volumen que se trató en una hora). Los cuatro pares de electrodos de aluminio están conectados a una fuente de poder de 35 voltios asegurando que fluyera una corriente de un amperio entre ellos, este dimensionamiento fue producto del diseño experimental, con el fin de remover nitrógeno y fósforo total en aguas residuales provenientes de la colonia Aurora II.

Resultado del proceso de electrocoagulación se obtuvo una mejora considerable de los parámetros analizados, 27% de remoción de nitrógeno total, 82.5% de remoción de fósforo total y una mejora del índice de biodegradabilidad de 11.5%. Además cumplió con los límites máximos permisibles de la normativa actual del país; demostrando así la factibilidad técnica del presente estudio.

El proceso de electrocoagulación tuvo su eficiencia optima en la remoción de Fosforo total. La vida útil de la unidad se estima en ocho años y costo de la electrocoagulación por metro cubico de agua a tratar fue de Q.28.23.



## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Evaluar a escala laboratorio la factibilidad del sistema de tratamiento terciario electrocoagulación para la reducción de nitrógeno y fósforo total que se encuentren por debajo de los límites permisibles según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 y mejorar del índice de biodegradabilidad.

### **ESPECÍFICOS**

1. Diseñar y construir a escala laboratorio la unidad de electrocoagulación a partir del agua residual de origen doméstico proveniente de la colonia Aurora II.
2. Determinar la corriente, voltaje y tamaño de los electrodos en la unidad de electrocoagulación para la reducción de fósforo total y nitrógeno total de aguas residuales de origen doméstico a valores iguales o menores de los del Acuerdo Gubernativo 236-2006.
3. Evaluar la reducción de nitrógeno total y fósforo total, así como la mejora del índice de biodegradabilidad en el tratamiento terciario de aguas residuales de origen doméstico en cumplimiento al Acuerdo Gubernativo 236-2006.



## HIPÓTESIS

### **Hipótesis de trabajo (Hi):**

Es posible la reducción de la concentración de fósforo y nitrógeno total en efluentes domésticos en un 50% y que la concentración de salida se encuentre en valores iguales o menores a los respectivos límites máximos permisibles según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, así como el mejoramiento de su índice de biodegradabilidad, por medio de la aplicación del sistema de tratamiento alternativo de electrocoagulación.





## INTRODUCCIÓN

Ya está comprobado que el repunte en la proliferación de microorganismos acuáticos (algas, ninfas, plancton) se debe al aumento desmedido de macronutrientes (nitrógeno y fósforo) que llegan a un cuerpo de agua receptor [24, 36, 38, 40]; sumado a condiciones climáticas favorables, ocasionan los brotes que tanto impacto causan, no solo en el aspecto ambiental sino en otros como en el sector socioeconómico y salud de nuestro país. Sin embargo, ante la problemática de contaminación por aguas residuales han surgido varias propuestas técnicas y científicas, no necesariamente sustentadas para la disminución de macronutrientes que llegan al cuerpo receptor. También se ha comprobado que las metodologías de tratamiento convencionales, ampliamente utilizadas en nuestro país, no son eficientes para remoción de nitrógeno ni fósforo, sino solamente en remoción de sólidos, carga orgánica y otros parámetros no son significativos con respecto a los microorganismos acuáticos indeseables [38].

La electrocoagulación es la operación unitaria que utiliza una celda electrolítica para producir el agente coagulante que provocará la aglomeración de las partículas coloidales del agua residual.

En el presente estudio especial se analiza la problemática del aumento desmedido de nutrientes que llegan al cuerpo receptor, provenientes de la colonia Aurora II caracterizados en residuos líquidos domésticos, todos ellos sin una adecuada gestión y manejo sostenible y responsable.

Los macronutrientes estudiados, por otro lado, no son removidos significativamente en los procesos de tratamiento terciarios convencionales, por lo que la problemática radica en llegar a valores debajo de los límites máximos permitidos por la legislación actual; obteniendo así una mejor calidad en el afluente receptor.

Por dichas razones se propone en el presente estudio la remoción de macronutrientes por medio de un tratamiento no convencional: electrocuagulación, buscando demostrar la factibilidad técnica y económica de dicha operación unitaria.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Como primera instancia el aumento desmedido de nutrientes provenientes de la colonia Aurora II, representados en residuos líquidos domésticos contribuirán si no se tratan adecuadamente a la proliferación de algas y otros organismos acuáticos indeseables en la cuenca del Lago de Amatitlan. [38].

El segundo problema lo origina la falta de investigación y experimentación técnica que permita tomar las decisiones acertadas para el tratamiento de efluentes para el cumplimiento de la legislación emitida según acuerdo gubernativo 236-2006; dando como propuesta un tratamiento terciario a la salida del sedimentador secundario.

Los macronutrientes estudiados, por otro lado, no son removidos significativamente en los procesos anteriores al tratamiento propuesto, por lo que la problemática radica en llegar a valores debajo de los límites máximos permitidos por la legislación actual; obteniendo así una calidad en el afluente receptor.



## **JUSTIFICACIÓN**

Existe bibliografía con diferentes normativas de tratamiento de aguas residuales, pero no existe específicamente una publicación que evalúe la eficiencia del sistema electrocoagulación en remoción de macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y mejora del índice de biodegradabilidad; es por ello que el presente estudio especial se enfoca en generar una guía científicamente aceptada que pueda servir de herramienta eficaz a los diseñadores y constructores de sistemas de tratamiento alternativos de aguas residuales de origen doméstico.

## 1. ANTECEDENTES

Se ha demostrado que las metodologías de tratamiento convencionales para aguas residuales ampliamente utilizadas en nuestro país no son eficientes en la remoción de macronutrientes, tal es el caso de las aguas residuales de la colonia Aurora II [38].

La búsqueda de nuevos tratamientos para combatir la contaminación ambiental, ha llevado a los científicos a considerar la utilización de los métodos electroquímicos para transformar y remover los contaminantes de efluentes. Los métodos electroquímicos de tratamiento de aguas residuales como la electroflotación, electrodecantación y la electrocoagulación [22], involucran el uso de una celda electrolítica y un par de electrodos metálicos a través de los cuales se hace circular una corriente eléctrica. [36] Sistemas electroquímicos pequeños son viables y en vez de usar reactivos químicos y microorganismos, el sistema emplea electrones para realizar el tratamiento. Estos métodos utilizan una instrumentación robusta y compacta, fácil de conseguir que ofrezcan la posibilidad de una fácil distribución y potencialmente pueden reemplazar procesos sofisticados, ya que requieren contenedores de poca capacidad. Entre las ventajas de los métodos electroquímicos se encuentran los beneficios ambientales, de compatibilidad, versatilidad, eficiencia de energía, seguridad, selectividad, facilidad de automatización del proceso y bajos costos. Los métodos electroquímicos han sido estudiados pero pocos autores se han enfocado en las variables que son cruciales para el mejoramiento del desempeño de estas aplicaciones. [37]

De todas las técnicas electroquímicas conocidas se tiene mayor interés en emplear la electrocoagulación como método de tratamiento de aguas residuales que contengan metales pesados, residuos de grasa, tintes textiles, partículas suspendidas, suspensiones acuosas de partículas ultrafinas, nitratos, fenoles, arsénico y contaminantes orgánicos, y se emplea para potabilizar agua. [37]

La electrocoagulación es una técnica eficiente cuya relación costo efectividad es buena. Además como no se requiere de productos químicos en este proceso entonces no se produce contaminación secundaria. Con esta técnica se pueden remover partículas coloidales pequeñas de manera eficiente en comparación con las técnicas químicas convencionales, ya que las pequeñas partículas cargadas tienen mayor probabilidad de ser coaguladas por el campo eléctrico que las mantiene en movimiento. [37, 5]

La electrocoagulación tiene una larga historia como tecnología de tratamiento de aguas y la literatura indica que fue descubierta en los últimos cien años o quizás más. En tiempos recientes se ha dado un interés renovado por las plantas de tratamiento continuo de aguas para aplicaciones de tipo industrial, basadas en la tecnología de electrocoagulación, debido a su efectividad para remover un amplio rango de contaminantes, su bajo costo comparado con otras tecnologías y su simplicidad de diseño y operación. [4]

Hasta el momento las aplicaciones y estudios reportados en artículos de revistas sobre la electrocoagulación se centran en un solo contaminante y todos estos experimentos prueban la viabilidad de la electrocoagulación. [4] Éste es un método efectivo para desestabilizar partículas finas dispersas en aguas, para tratar aguas con compuestos orgánicos complejos que se oxidan en el ánodo y se descomponen en sustancias simples que no son tóxicas. [2] Además ha sido aplicado de manera satisfactoria para tratar agua potable [14, 26, 16], aguas residuales de: procesadores de alimentos [8, 19], industria cervecera [32], urbanas [26], de restaurante [22, 18], industria textil [4, 26, 22, 18, 15, 12], también para tratar aguas que contengan arsénico [15, 27, 21], iones fluoruro [17,9,3, boro [23], surfactantes [36], metales pesados [21, 5], aceites [33, 11], tintes textiles [22, 29, 30, 7, 6, 35, 1, 22, 31, 21], desechos poliméricos [12], partículas suspendidas [23], suspensiones acuosas de partículas ultrafinas [20], nitrato [34], residuos fenólicos [13], fósforo [25], flúor [9, 3, 28], entre otros. La optimización de la técnica de electrocoagulación es un proceso empírico, hasta el momento que comprende procesos químicos y

físicos complejos que envuelven fenómenos de interfase y de superficie. Debido a que sus fenómenos no son totalmente entendidos, el diseño de los reactores se ve restringido para así obtener el desempeño óptimo de los mismos, y su potencial de aplicación se ve entonces limitado. [37] Sin embargo se reporta en la literatura algunos efectos de los factores controlables y variables respuesta en el proceso de electrocoagulación que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar un el diseño de equipos o para la operación de los mismos, estos aspectos se resumen en las Tabla I y II.

Tabla I. Efectos de algunos factores controlables en electrocoagulación

FACTOR	EFECTOS
VOLTAJE	Es dependiente de la densidad de corriente, de la conductividad del agua a tratar, de la distancia entre electrodos y del estado de la superficie de los mismos. [19] El voltaje entre electrodos es independiente del pH si el agua tratada no se aleja mucho de un valor de pH de 7. [36] El voltaje puede minimizarse decreciendo la distancia entre electrodos e incrementando su área de sección transversal y la conductividad específica de la solución. [37]
DENSIDAD DE CORRIENTE	Mientras mayor sea la densidad de corriente aplicada mayor será la producción de burbujas en los electrodos. [17, 39]
DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS	Debe ser lo menor posible, ya que tiene una considerable influencia en el consumo de energía. [36]
CONSUMO DE ELECTRODO	Como consecuencia de la disolución de los electrodos los electrodos se desgastan y su tiempo de vida útil se relaciona directamente con la corriente aplicada al sistema y el tiempo de residencia hidráulico del líquido a tratar. [36]
MATERIAL DEL ELECTRODO	Deben tener resistencia química y buenas propiedades electroquímicas, por lo cual el cátodo debe contar con elevados sobrepotenciales que favorezcan las reacciones de descomposición del agua y permitan obtener elevados rendimientos electroquímicos. Usualmente se usan electrodos de aluminio y hierro.[24] Se debe tener en cuenta los precios según el material.



Tabla II. Efectos de algunas de las variables respuestas sobre el proceso de electrocoagulación

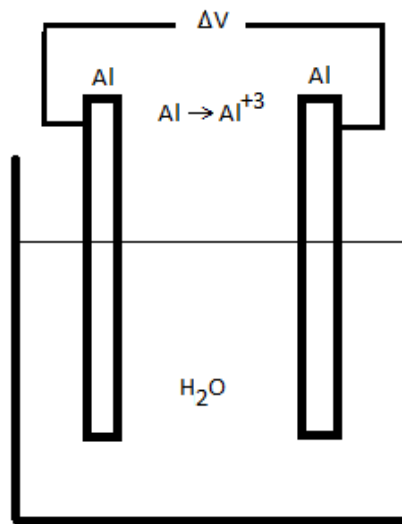
VARIABLE RESPUESTA	EFECTOS
<p style="text-align: center;"><u>pH</u></p> <p>Medida de la acidez o alcalinidad de medios acuosos. Se expresa como el logaritmo negativo (base 10) de la concentración molar de iones H<sup>+</sup>. [40]</p>	<p>Es un factor importante que afecta el desempeño del proceso de electrocoagulación. [18, 22, 34, 39].</p>
<p style="text-align: center;"><u>Conductividad</u></p> <p>Es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es por tanto indicativa de la materia ionizable total presente en el agua. Esta proviene de una base, un ácido o una sal, disociadas en iones. [40]</p>	<p>Un incremento en la conductividad generalmente causa incrementos de la densidad de corriente para el mismo voltaje de celda por esto se requiere que la conductividad del agua sea lo más alta posible. [4]</p>

## 2. MARCO TEÓRICO

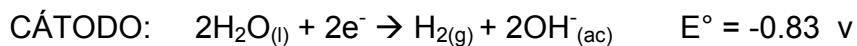
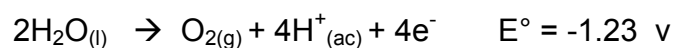
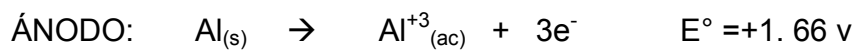
La electrocoagulación es la operación unitaria que utiliza una celda electrolítica para producir el agente coagulante que provocará la aglomeración de las partículas coloidales del agua residual. En el presente estudio se utilizaron celdas de aluminio en forma de placas.

### 2.1 Fuerza electromotriz entre las celdas:

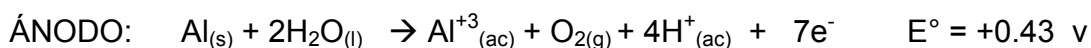
Figura 1: Fuerza electromotriz



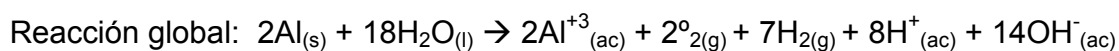
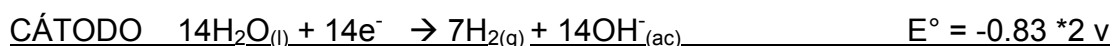
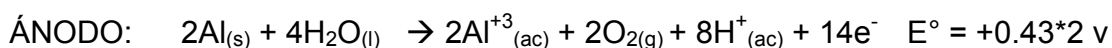
Para producir el agente coagulante, la reacción química de oxidación del aluminio debe suscitarse espontáneamente, para ello se necesita aplicarse una diferencia de potencial eléctrico entre las dos placas de aluminio inmersas en el agua. Para calcular este voltaje deben determinarse las reacciones en el ánodo y cátodo (reacciones de semicelda): y sus respectivos potenciales estándar de oxidación y reducción.



Dado que en el ánodo se da tanto la reacción de oxidación del aluminio, como la del agua, sumando ambas reacciones como sus respectivos potenciales eléctricos:



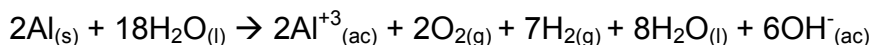
Multiplicando la reacción del ánodo por los electrones del cátodo y viceversa para obtener de la sumatoria la reacción total de la celda así como su voltaje:



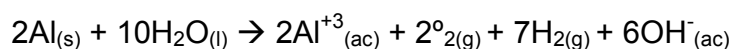
$$E^{\circ}_{\text{celda}} = -4.95 \text{ v}$$

Dada la reacción del producto iónico del agua:  $\text{H}^{+}_{(ac)} + \text{OH}^{-}_{(ac)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(l)}$

De la reacción global se obtiene:



Simplificando:



Dado la formación del agente coagulante al coexistir el catión aluminio +3 y el ión hidróxido:  $\text{Al}^{+3}_{(ac)} + 3\text{OH}^{-}_{(ac)} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3_{(ac)}$

De la reacción global se obtiene:



El signo negativo del potencial de celda indica que la reacción no sucede espontáneamente por lo que necesita aplicarse como mínimo un voltaje de 4.95 v para que el aluminio entre la dos placas reaccione con el agua y producir el agente coagulante hidróxido de aluminio. **Cabe resaltar que además de producirse el agente coagulante, se genera hidrógeno gaseoso que proporciona una agitación conveniente para el gradiente de velocidad, formándose de esta forma flóculos más estables.** Otro de los productos importantes de la reacción es el **oxígeno** el cual genera la **aireación difusa** al cuerpo líquido, oxidando la materia orgánica presente en el agua residual contribuyendo de esta manera a la mejora del índice de biodegradabilidad.

Según la ecuación de Nernst, el potencial eléctrico en una celda electrolítica depende de la temperatura (del agua residual) y de la concentración (del agente coagulante); para contrarrestar esta desviación se aproximará la fuerza electromotriz de 4.95 a **5 v**:

$E_{\text{celda}} = E^{\circ}_{\text{celda}} - (RT/nF) \log [\text{Al}(\text{OH})_3]$ , donde n es el número de electrones transferidos.

## 2.2 Corriente eléctrica:

Dada la definición de corriente eléctrica:

$i = q/t$ , donde q es la carga eléctrica (en coulombs) y t es el tiempo (en segundos)

y tomando en cuenta que las reacciones de semicelda suceden por la transferencia de electrones:  $1e^- = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ , y  $1 \text{ mol} = 6.022 \times 10^{23}$  y según la estequiometría de la reacción del ánodo:  $\text{Al}_{(s)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{Al}^{+3}_{(ac)} + \text{O}_{2(g)} + 4\text{H}^{+}_{(ac)} + 7e^-$ , la cantidad de hidróxido de aluminio producida en la reacción global de la celda de electrocoagulación se calcula de la siguiente manera, dado que  $q/V \propto [\text{Al}(\text{OH})_3]$ , por tanto:

$$[\text{Al}(\text{OH})_3] = \frac{it}{\Psi} \times \frac{1 \text{ e}^-}{1.602 \times 10^{-19} \text{ C}} \times \frac{1 \text{ mol e}^-}{6.022 \times 10^{23} \text{ e}^-} \times \frac{1 \text{ mol Al}^{+3}}{7 \text{ mol e}^-} \times \frac{1 \text{ mol Al}(\text{OH})_3}{1 \text{ mol Al}^{+3}}$$

Despejando de la expresión anterior la corriente eléctrica y dada la definición de caudal  $Q = \Psi/t$ , y también  $[\text{Al}(\text{OH})_3] = 1 \text{ mol Al}(\text{OH})_3 / \Psi$ ; se obtiene:

$$i = 6.753 \times 10^5 Q[\text{Al}(\text{OH})_3]$$

**Tomando en cuenta que en la práctica no se puede medir la concentración de hidróxido de aluminio como especie hidrolizada, se utiliza la siguiente estequiometria para convertir esta concentración a miligramos por litro de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) ya que esta es la especie coagulante del aluminio más accesible:**

$$\text{mg/L Al}_2(\text{SO}_4)_3 = \frac{\text{mol Al}(\text{OH})_3}{1\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol Al}_2(\text{SO}_4)_3}{2 \text{ mol Al}(\text{OH})_3} \times \frac{342.17 \text{ g mol Al}_2(\text{SO}_4)_3}{1 \text{ mol Al}_2(\text{SO}_4)_3} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}}$$

Simplificando:  $\text{mg/L Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 171085 [\text{Al}(\text{OH})_3]$

Sustituyendo la ecuación anterior en la expresión de la corriente eléctrica se obtiene:

$$i = (6.753 \times 10^5 / 171085) * Q * (\text{mg/L Al}_2(\text{SO}_4)_3)$$

$$\mathbf{i = 3.9472 QC}$$

Donde:  $C = \text{mg/L Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Retomando la idea inicial del diseño a “escala laboratorio”, se establece que el volumen de la unidad de electrocoagulación será de 20 litros y el tiempo de retención dentro de la unidad de 60 minutos, por tanto el caudal inducido será:

$$Q = 20 \text{ L}/60 \text{ min} = 20 \text{ L}/3600 \text{ s} = 5.55 \times 10^{-3} \text{ L/s}$$

Respecto a la concentración de sulfato de aluminio, la cual es la dosis necesaria para que se suscite el fenómeno de aglomeración de partículas coloidales en el agua residual; se realizaron 10 ensayos con muestras distintas de agua residual provenientes de la salida del sedimentador secundario en la planta de tratamiento Aurora II, obteniéndose los siguientes resultados de dosis óptima de coagulante:

Tabla III: Dosis óptima de sulfato de aluminio

Muestra	Día	Dosis óptima (mg/L)
1	1	49
2		46
3		48
4	2	47
5		45
6		48
7	3	50
8		40
9		46
10		41
Promedio		46

Para realizar los ensayos anteriores se tomaron muestras de 1L en un beacker al cual se dosificó una solución se sulfato de aluminio al 1% agitando con una varilla hasta observar la floculación en el seno del líquido.

Sustituyendo los valores de caudal y concentración la expresión de la corriente eléctrica, se obtiene:

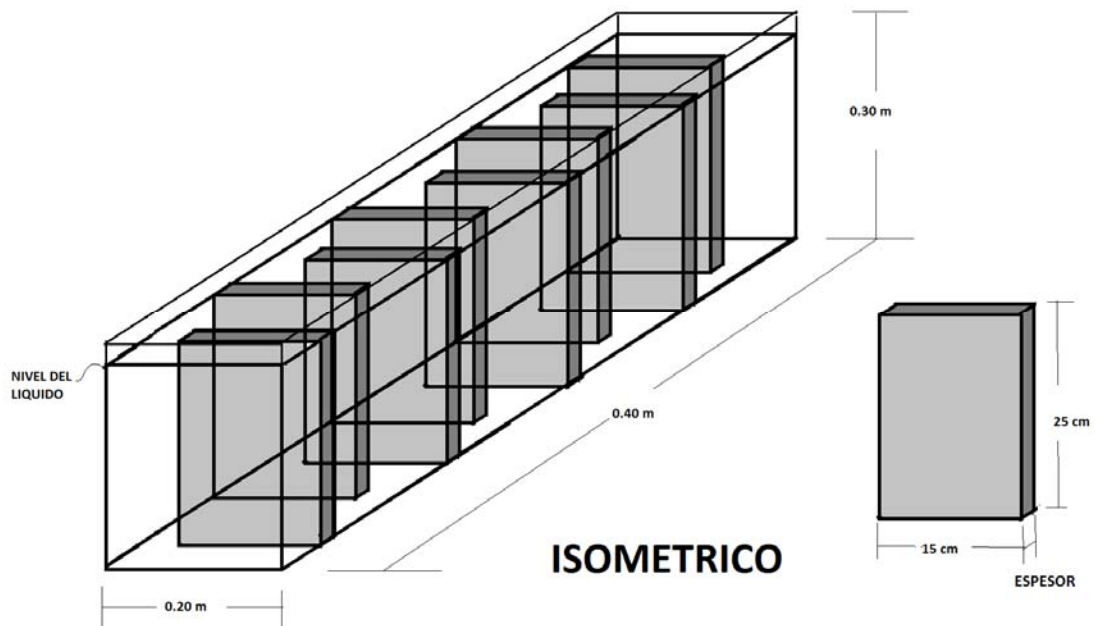
$$i = 3.9472 \text{ A}\cdot\text{s}/\text{mg} * 5.55 \times 10^{-3} \text{ L/s} * 46 \text{ mg/L} = 1.0087 \text{ A} \approx \mathbf{1 \text{ A}}$$



### 3. DISEÑO DE LA UNIDAD DE ELECTROCOAGULACIÓN

Para el diseño de la unidad se propone el siguiente dimensionamiento consistente en cuatro pares de placas de aluminio que servirán como electrodos:

Figura 2: Isométrico unidad electrocoagulación



Partiendo de la definición de resistencia eléctrica y la ley de ohm:  $R = \rho L/A = i/V$

Donde  $\rho$  = resistividad del material ( $\Omega \cdot m$ ),

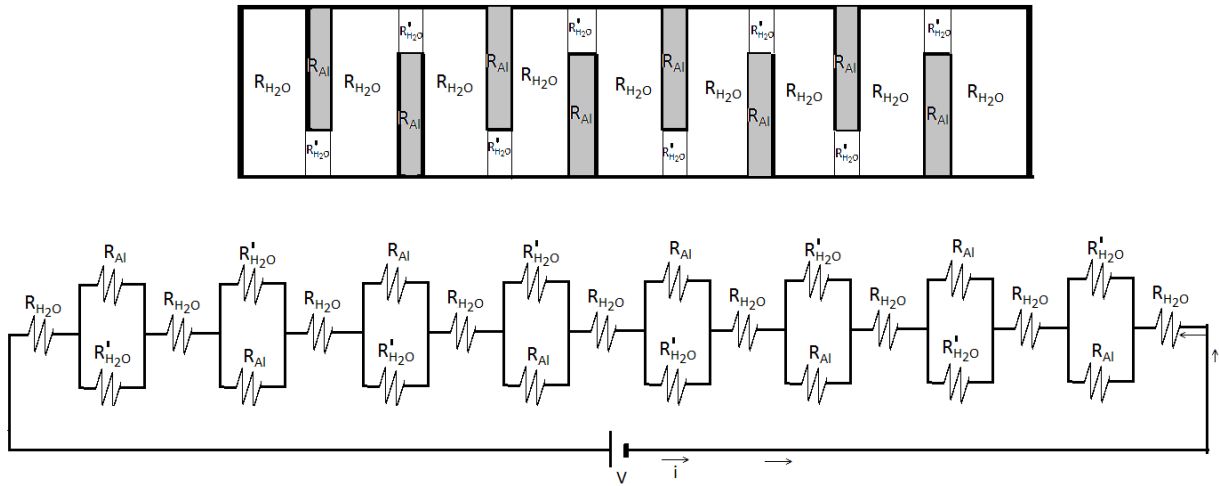
$L$  = longitud por donde se conduce la corriente eléctrica (m),

$A$  = área transversal por donde pasa la corriente eléctrica ( $m^2$ ).

Tomando en cuenta el arreglo de las placas dentro de la unidad y su conexión a la fuente de voltaje, el circuito eléctrico se esquematiza de la siguiente manera:

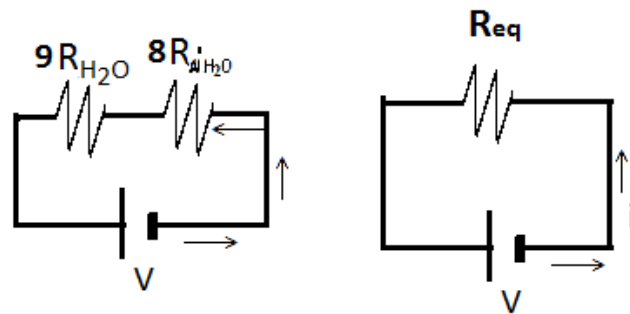


Figura 3: Resistencias eléctricas unidad de electrocoagulación



Ahora, recordando que la resistencia equivalente para un arreglo en serie es la suma algebraica, y en paralelo es el inverso de la suma de los inversos, se debe de encontrar la resistencia equivalente, de esto se concluye:

Figura 4: Resistencia equivalente unidad de electrocoagulación



De esto, la resistencia equivalente del arreglo en paralelo ( $R'_{Al H_2O}$ ),

$$(R'_{Al H_2O})^{-1} = (R_{Al})^{-1} + (R'_{H_2O})^{-1} = R_{Al} \cdot R'_{H_2O} / (R_{Al} + R'_{H_2O})$$

Y por tanto la resistencia equivalente del circuito  $R_{eq}$

$$R_{eq} = 9 R_{H_2O} + 8 R_{Al} \cdot R'_{H_2O} / (R_{Al} + R'_{H_2O}) = V/i$$

Regresando nuevamente a la definición de resistencia:  $R = \rho L/A$ , donde la resistividad es igual al inverso de la conductividad:  $\rho = 1/\mu$ . La resistividad del aluminio es igual a  $2.82 \times 10^{-8} \Omega m$ ; se midió la conductividad del agua residual que sale del sedimentador secundario de la planta de tratamiento Aurora II según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IV: Conductividades del agua a tratar

Muestra	Conductividad $\mu S/cm$
1	285
2	258
3	267
Promedio	270

Convirtiendo los microsiemens por centímetro a siemens por metro:

$$270 \mu S/cm = 0.027 S/m$$

Calculando la resistividad:  $\rho = 1/0.027 = 37.037 \Omega m$ .

Por tanto, si la resistencia es directamente proporcional a la resistividad, entonces:

$$R_{Al} \lll R'_{H2O}$$

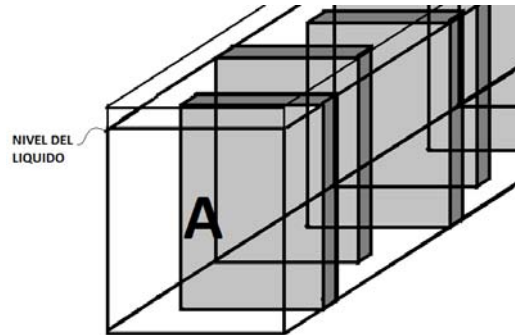
Por consiguiente en la expresión de la resistencia equivalente:

$$(R_{Al} + R'_{H2O}) \approx R'_{H2O}$$

$$\text{Luego: } R_{eq} = 9 R_{H2O} + 8 R_{Al} \cdot R'_{H2O} / R'_{H2O} = 9 R_{H2O} + 8 R_{Al}$$

Entonces el área transversal del paso de la corriente eléctrica inducida del sistema se dará cuando el agua residual este en contacto perpendicular con la placa de aluminio calculada, de esto:

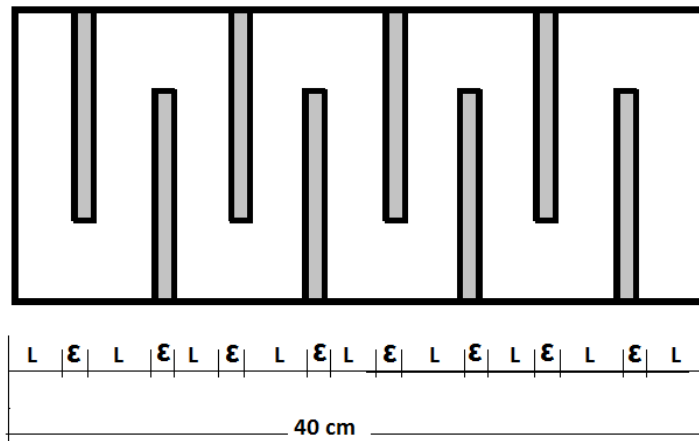
Figura 5: Área transversal unidad de electrocoagulación



Según las dimensiones establecidas en el dibujo isométrico, para la resistencia cedida por el agua, el área transversal será de 0.2 m x 0.25 m; mientras que para la resistencia de las placas de aluminio será de 0.15 m x 0.25 m.

La longitud por donde se conduce la corriente eléctrica se determina con el espesor de las placas de aluminio “ $\epsilon$ ” y el espaciamiento entre placa y placa “L”:

Figura 6: Espesor y espaciamiento de placas unidad de electrocoagulación



De esto se deduce que:  $9L + 8 \epsilon = 0.4$

Ya que las placas de aluminio se conectan en serie, la diferencia de potencial entre ellas es la suma algebraica de la calculada para un par de placas, por tanto el voltaje del circuito será: 35 v; por otro lado la corriente es igual entre todas las placas, por lo que sigue siendo de 1 A. Sustituyendo de la expresión de la resistencia eléctrica:

$$V/i = R_{eq} = 9 R_{H_2O} + 8 R_{Al}$$

$$\frac{35}{1} = \frac{9 * 37.037 * L}{0.25 * 0.20} + \frac{8 * 2.82 * 10^{-8} * \epsilon}{0.15 * 0.25}$$

Expresando L en función de  $\epsilon$ :  $9L + 8 \epsilon = 0.4$

Entonces,  $L = 2/45 - 8/9 \epsilon$

Sustituyendo:  $\frac{35}{1} = \frac{9 * 37.037 * (2/45 - 8/9 \epsilon)}{0.25 * 0.20} + \frac{8 * 2.82 * 10^{-8} * \epsilon}{0.15 * 0.25}$

Finalmente, despejando el espesor de las placas de aluminio " $\epsilon$ " se llega a:

$$\epsilon = 0.0125 \text{ m} = 1.25 \text{ cm} \approx 1/2''$$

Se tiene por tanto el siguiente diseño:

Figura 7: Vista en isométrico unidad de electrocoagulación

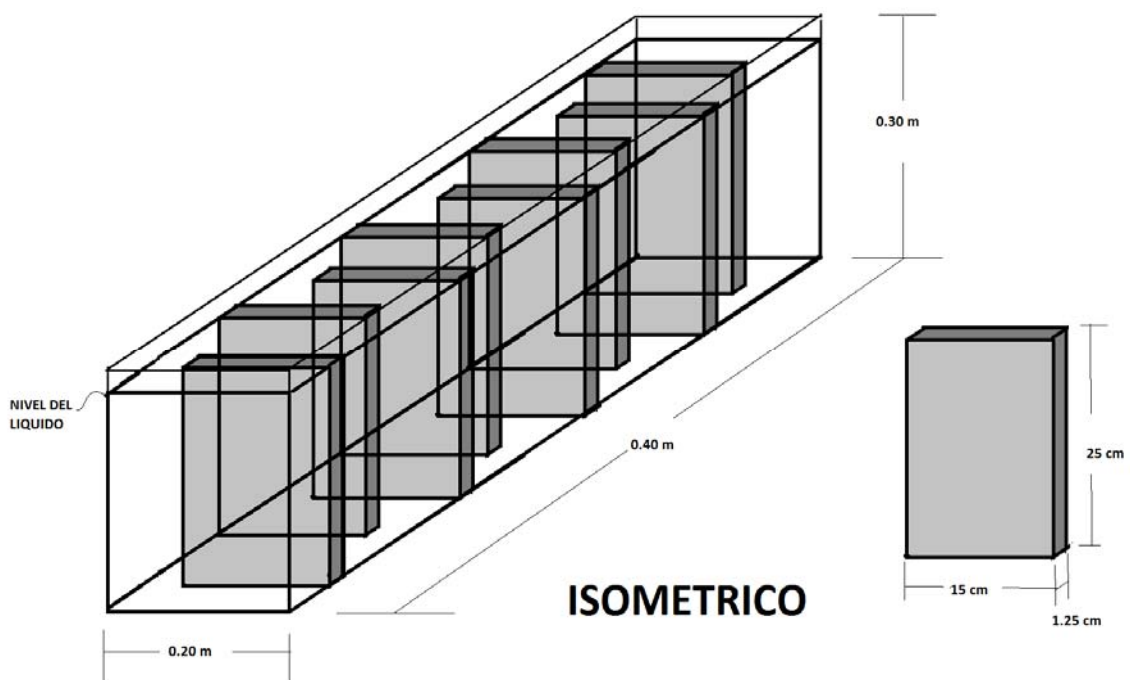
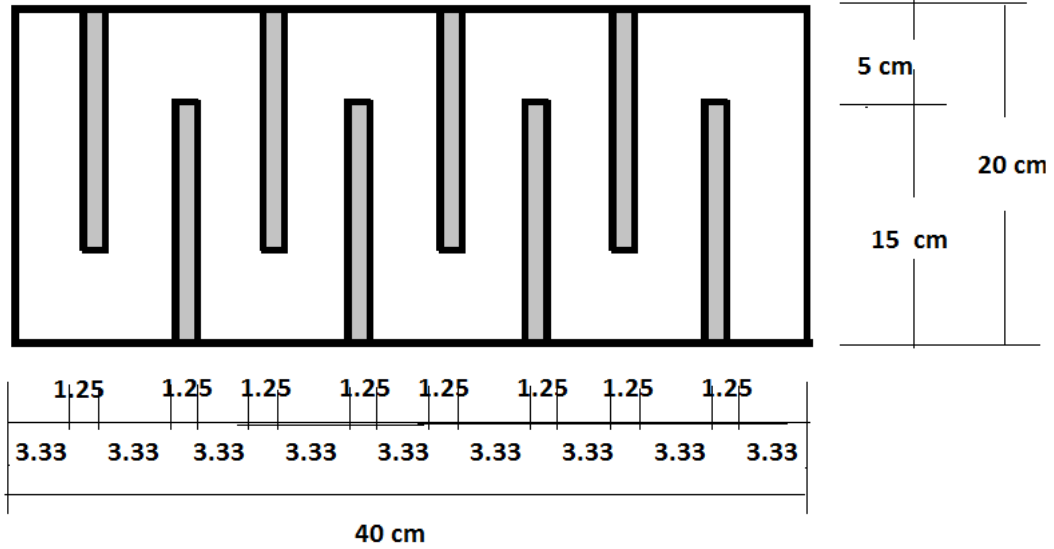
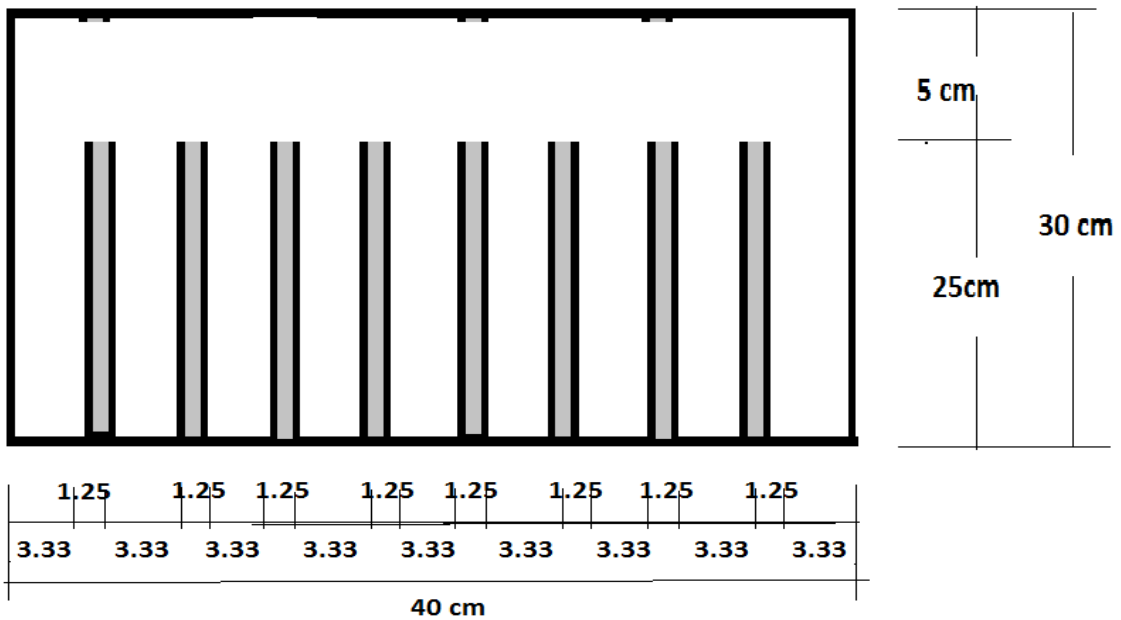


Figura 8: Vista en planta unidad de electrocoagulación



## PLANTA

Figura 9: Vista en perfil unidad de electrocoagulación



## PERFIL

## 4. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente estudio especial, se realizó lo siguiente:

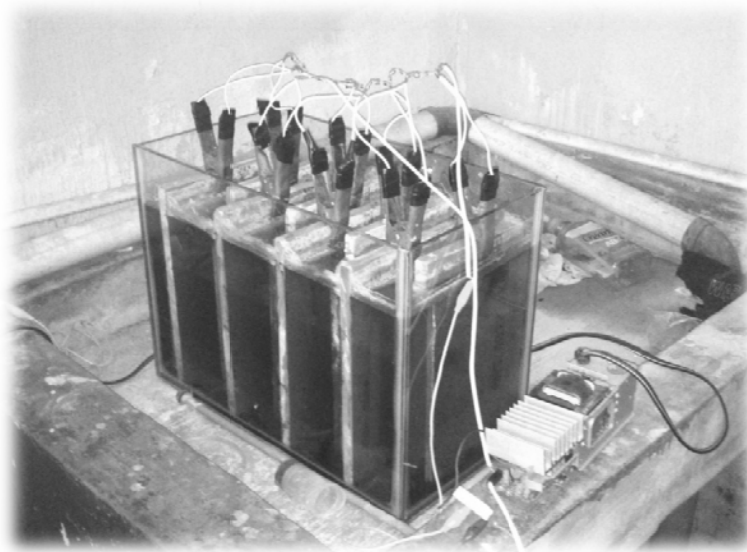
### 4.1 DISEÑO DE LA UNIDAD ELECTROCOAGULACIÓN

Como resultado del diseño experimental (sección 3), se concluyó en la unidad a escala laboratorio con dimensiones: 0.3 x 0.2 x 0.4 m y 8 celdas de 0.25 x 0.15 x 0.0125 m (ver figura 7)

### 4.2 MONTAJE A ESCALA LABORATORIO

Se construyó la unidad de electrocoagulación utilizando placas de aluminio de las dimensiones propuestas como electrodos, separadas a una distancia de 1.25 cm, estas se ajustarán a un recipiente de vidrio con capacidad para 20 litros. Los cuatro pares de electrodos de aluminio estarán conectados a una fuente de poder de 35 voltios asegurando que fluya una corriente de 1 amperio entre ellos.

Figura 10: Unidad de electrocoagulación a escala laboratorio



### 4.3 MUESTREO

#### Número de muestras a recolectar:

Para determinar el número de muestreos que se realizarán, bajo la hipótesis que los datos se comportan según la distribución normal Z

$$Z_{\alpha/2} = (X - \mu) / s / n^{1/2}$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$  = Estadístico normal estándar,

Para el presente estudio se utilizará un nivel de confianza del 95% ( $\alpha/2 = 0.025$ ) para esto corresponde un valor  $Z_{\alpha/2} = 1.96$

X = valor promedio de las "n" corridas,

$\mu$  = valor puntual teórico de la media,

s = desviación estándar en las "n" corridas,

n = número de corridas o repeticiones.

Dado que:

$$X - \mu = X(1 - \mu/X) = X \text{ (error estándar)}$$

Debido a que se está trabajando con un nivel de confianza del 95%, corresponde un error estándar = 5% = 0.05. Posteriormente:

$$n = (s Z_{\alpha/2} / X - \mu)^2$$

$$n = (s Z_{\alpha/2} / X \text{ error estándar})^2$$

De la definición de coeficiente de variación,  $s/X = CV$ . Por consiguiente:

$$n = (CV * Z_{\alpha/2} / \text{error estándar})^2$$

De una estadística empírica se tomó un primer tanteo de 10 corridas de la dosis óptima del sulfato de aluminio, que es la variable de operación crítica para el proceso de formación de coágulos y flóculos, ya que al hidrolizarse produce el hidróxido de aluminio que es la misma especie que se forma de la reacción química de la electrocoagulación ( $2\text{Al}_{(s)}+10\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3_{(ac)}+2\text{O}_{2(g)}+7\text{H}_2(g)$ ). De estas corridas se calculó la desviación estándar y el promedio aritmético, de lo cual se obtuvo el coeficiente de variación:

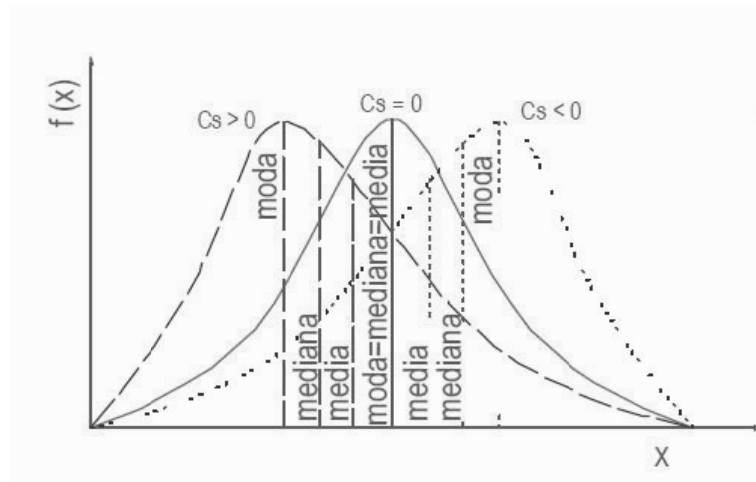
Tabla V: Dosis óptima del agente coagulante

Muestra	Día	Dosis óptima (mg/L)
1	1	49
2		46
3		48
4	2	47
5		45
6		48
7	3	50
8		40
9		46
10		41
Promedio		46
Desviación Estándar		3.265986
Coef. De Variación		0.0709997

Debido a que el valor del coeficiente de variación es cercano a cero, se acepta la hipótesis que los datos se comportan según la distribución normal.



Figura 11: Distribución normal



Por tanto el número de corridas sería:

$$n = (CV \cdot Z_{\alpha/2} / \text{error estándar})^2$$

$$n = (0.0709997 \cdot 1.96 / 0.05)^2$$

$$\rightarrow n = 7.75 \approx 8 \text{ (por cada parámetro a medir)}$$

Se procedió a recolectar las muestras de agua residual del sedimentador secundario y se colocaron 20 litros en la unidad experimental para posteriormente realizar los análisis de nitrógeno total, fósforo total, DBO<sub>5</sub> y DQO.

## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

### VIDA ÚTIL DE LA UNIDAD

Realizando la estequiometría en la reacción del ánodo a partir del volumen de las ocho placas, densidad y peso atómico del aluminio, y sabiendo que corriente por tiempo es equivalente a carga eléctrica, se puede calcular la vida útil de la siguiente manera:

$$8 * (15 \times 25 \times 1.25) \text{ cm}^3 * \frac{2.7 \text{ g}}{1 \text{ cm}^3} * \frac{1 \text{ mol Al}}{26.98 \text{ g Al}} * \frac{7 \text{ mol e}^-}{1 \text{ mol Al}} * \frac{6.022 \times 10^{23} \text{ e}^-}{1 \text{ mol e}^-} * \frac{1.602 \times 10^{-19} \text{ C}}{1 \text{ e}^-} * \frac{1 \text{ A s}}{1 \text{ C}} = 2.53 \times 10^8 \text{ s}$$

Operando la unidad de electrocoagulación las 24 horas los 365 días del año, el tiempo de vida útil será:

$$t = 2.53 \times 10^8 \text{ s} \times \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \approx 8 \text{ años}$$

### COSTO DE EQUIPO

El costo del montaje de la unidad de electrocoagulación es el siguiente:

PLACAS DE ALUMINIO	Q2000
CABLES, DIODOS Y ACCESORIOS	Q400
FUENTE DE VOLTAJE	Q300
CORTE DE LA PLACAS, INSTALACIÓN Y MANO DE OBRA	Q500
TOTAL	Q3200

Considerando el caudal de agua residual a tratar ( $5.55 \times 10^{-3}$  L/s) durante el tiempo de vida útil de la unidad, el costo en cuanto a equipo por metro cúbico tratado será:

$$\frac{Q3200}{2.53 \times 10^8 \text{ s}} * \frac{\text{s}}{5.55 \times 10^{-3} \text{ L}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = \mathbf{Q2.28/m^3}$$

## **COSTO DE ELECTRICIDAD**

El costo de la energía eléctrica se calcula partiendo de la definición de potencia eléctrica:  $P = IV$

Dado que la tarifa de la energía eléctrica es de Q1.80 kW-h, el costo por metro cúbico de agua a tratar:

$$1A * 35 V * \frac{1 W}{1 A V} * \frac{1kW}{1000 W} * \frac{1 h}{20 L} * \frac{Q1.80}{1 kW - h} * \frac{1000 L}{1 m^3} = \mathbf{Q3.15/m^3}$$

## **COSTO DE EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA UNIDAD (ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD)**

Además de los rubros anteriores, también debe incluirse el costo de los reactivos químicos para realizar los análisis de nitrógeno y fósforo total así como para la DBO<sub>5</sub> y DQO como parte del aseguramiento de la calidad en la evaluación de las remociones; por cada muestra el costo es el siguiente:

Nitrógeno total	Q200
Fósforo total	Q200
DQO	Q250
DBO5	Q350
<hr/>	
TOTAL	Q1000

Dado que se deben analizar dos muestras (en la entrada y salida), recomendándose realizarlo por lo menos dos veces al año, durante el tiempo de vida útil el costo será: Q1000/muestra x 2 muestras x 2 veces/año x 8 años = Q32000.

Considerando el caudal de agua residual a tratar ( $5.55 \times 10^{-3}$  L/s) durante el tiempo de vida útil de la unidad, el costo en cuanto a reactivos químicos por metro cúbico tratado será:

$$\frac{Q32000}{2.53 \times 10^8 \text{ s}} * \frac{\text{s}}{5.55 \times 10^{-3} \text{ L}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = \mathbf{Q22.80/m^3}$$

### **COSTO TOTAL**

Finalmente el costo total del tratamiento del agua residual por medio de esta tecnología en el presente estudio está dado por la suma del costo del equipo más el costo de energía eléctrica más el costo de evaluación de eficiencia de remoción:

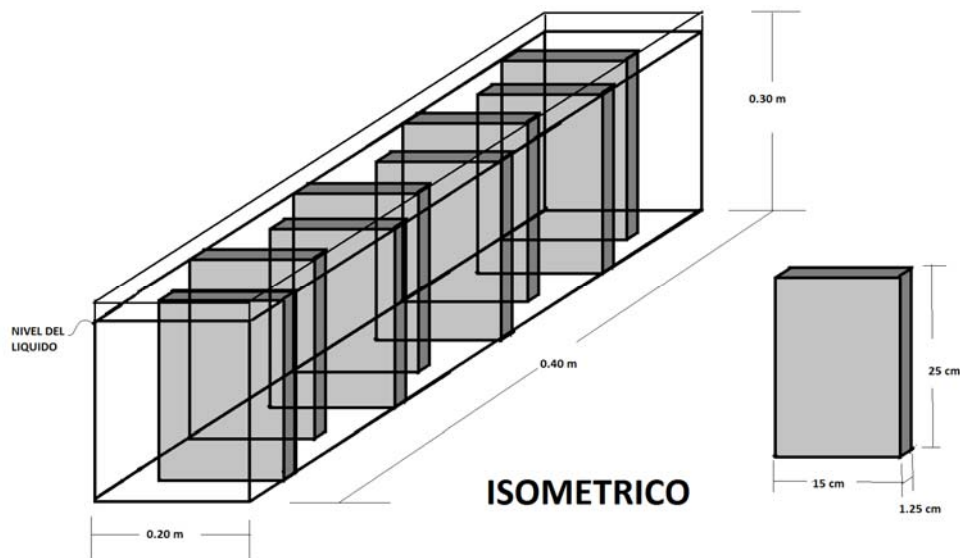
$$\text{CT} = \text{Q}2.28 + \text{Q} 3.15 + \text{Q}22.80 = \mathbf{Q28.23/m^3} \ (\approx \mathbf{\$3.50/m^3})$$



## 6. RESULTADOS

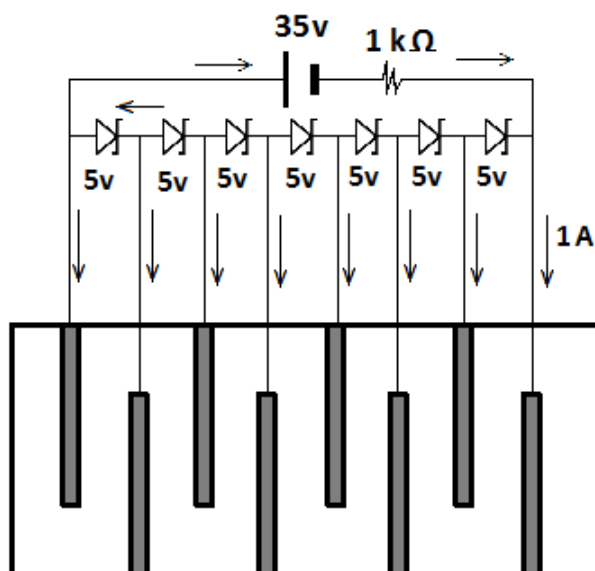
La unidad de electrocoagulación a escala laboratorio cuenta con las siguientes dimensiones: un alto de 30cm, ancho de 20cm y una profundidad 40cm, dichas medidas se calcularon en base a la aplicación de conceptos de electroquímica (ver sección 3); cuenta también con la implementación de 8 placas de aluminio de 25x15 centímetros con un espesor de 1.25cm, las cuales realizan el proceso de electrocoagulación en el agua.

Figura 12: Diseño de la unidad de electrocoagulación



La corriente inducida será de 1 amperio, junto con la cual actuará un voltaje de 5 voltios para poder generar las condiciones ideales para que se suscite el fenómeno de la electrocoagulación.

Figura 13: Corriente y voltaje en la unidad de electrocoagulación



Luego de un tiempo de residencia de 1 hora del agua residual en la unidad experimental, se dio la formación de flóculos los cuales fueron removidos manualmente para evaluar los parámetros de calidad del agua electrocoagulada.

Figura 14: Agua residual Electrocoagulada



**Tabla VI:** Parámetros de calidad del agua en la unidad de electrocoagulación

CORRIDA	ENTRADA				SALIDA			
	N (mg/L)	*P (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	N (mg/L)	*P (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)
1	39	19.6	557	271	27	3.4	241	156
2	32	19.9	521	262	25	3.6	202	158
3	40	19.1	593	251	31	3.2	267	147
4	37	19.4	515	281	28	3.3	247	139
5	43	20.0	661	302	25	3.7	231	141
6	29	19.5	459	235	21	3.5	237	135
7	33	18.7	537	264	23	3.0	280	155
8	30	19.7	437	192	22	3.6	199	143
<i>Promedio</i>	<i>35</i>	<i>19.5</i>	<i>535</i>	<i>257</i>	<i>25</i>	<i>3.4</i>	<i>238</i>	<i>147</i>
Límites máximo permisible según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (tercera etapa 2020)					25	15	No se indica	150

\*Las concentraciones de fósforo se tomaron del agua residual en la entrada a la planta de tratamiento para tener valores más significativos con los límites de Acuerdo Gubernativo.

**Tabla VII:** Porcentajes de remoción de los contaminantes en la electrocoagulación



CORRIDA	%REMOCIÓN				
	N	P	DQO	DBO <sub>5</sub>	*DBO/DQO
1	28.2	82.7	56.7	42.5	74.9
2	21.9	81.9	61.2	39.7	64.9
3	22.5	83.2	55.0	41.4	75.3
4	24.3	83.0	52.0	50.6	87.3
5	37.2	81.5	65.1	53.2	81.8
6	27.6	82.1	48.4	42.6	88.1
7	27.3	84.0	47.9	41.3	86.2
8	26.7	81.7	54.5	25.6	47.0
<b>PROMEDIO</b>	<b>27.0</b>	<b>82.5</b>	<b>55.1</b>	<b>42.1</b>	<b>76.4</b>

\*El %remoción de la relación DBO/DQO (mejora del índice de biodegradabilidad) se calculó como:  
 %Remoción DBO<sub>5</sub> / %remoción DQO

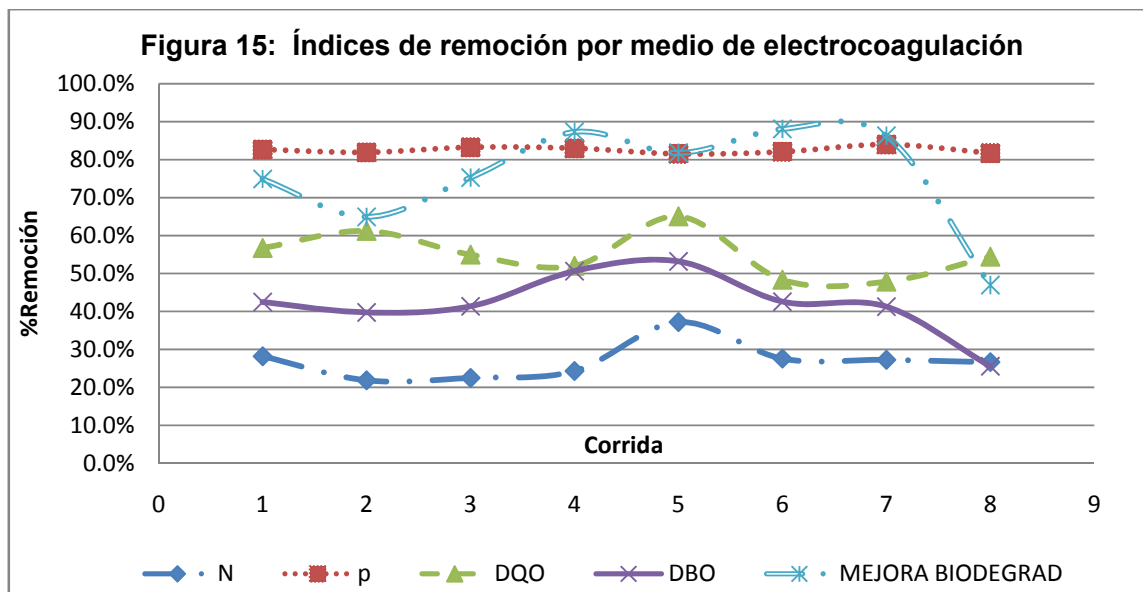
Evaluando la factibilidad económica del presente estudio, los costos por metro cúbico de agua residual a tratar se muestra en la siguiente tabla (ver sección 5):

**Tabla VIII:** Costos por metro cúbico de agua residual a tratar

<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>Q/m<sup>3</sup></b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>
COSTO DEL EQUIPO	2.28	0.29
COSTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	3.15	0.39
COSTO DE EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA (REACTIVOS QUÍMICOS PARA ANÁLISIS)	22.80	2.85
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>28.23</b>	<b>3.53</b>

## 7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La unidad de electrocoagulación diseñada como se muestra en las figuras 12 y 13 consistente en ocho placas de aluminio de 15x25 cm y de media pulgada de espesor mantuvo una densidad de corriente a constante de diferencia de potencial entre un amperio gracias a la diferencia de potencial eléctrico diseñada entre cada (5 voltios); este voltaje se logró con la ayuda de diodos zener colocados entre cada placa. Bajo estas circunstancias se lograron las condiciones necesarias para generar la reacción electroquímica de oxidación del aluminio, que junto con la electrolisis del agua residual conlleva a la formación del agente coagulante hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), propiciándose así la aglomeración de partículas coloidales dando lugar al fenómeno de la coagulación electroquímica, en las condiciones de un gradiente de velocidad adecuado por la agitación generada por la producción de los gases hidrógeno y oxígeno de la reacción electrolítica del agua.



Analizando los resultados obtenidos en la tabla VII, se observa que se tiene una mejora considerable de los parámetros analizados, 27% de remoción de nitrógeno total, 82.4% de remoción de fósforo total y una mejora del índice de biodegradabilidad de 21.5%. Además cumple con los límites máximos permisibles de la normativa de aguas residuales del país (Acuerdo gubernativo 236-2006) proyectada hasta el año 2020 (tabla VI); quedando así demostrada la hipótesis de trabajo del presente estudio.

Las variaciones en los porcentajes de remoción que se observan en la figura 15, se deben principalmente a las concentraciones iniciales a lo largo de cada una de las corridas que se realizaron, dado que en general a menores cargas contaminantes, la remoción también es menor, lográndose por consiguiente las mayores eficiencias en las aguas residuales con concentraciones más altas de macronutrientes.

Gracias al elevado sobrepotencial del aluminio que favorece las reacciones de descomposición del agua, permiten obtener elevados rendimientos electroquímicos con una vida útil estimada de ocho años.

La factibilidad económica de esta tecnología se demuestra por medio de los costos en cuanto al equipo propiamente dicho, la energía eléctrica y los reactivos químicos:

Costo del equipo	2.28	Q/m <sup>3</sup>
Costo de energía eléctrica	3.15	Q/m <sup>3</sup>
Costo de evaluación de la eficiencia (reactivos químicos para análisis)	22.80	Q/m <sup>3</sup>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>28.23</b>	<b>Q/m<sup>3</sup></b>

Resultando un costo de operación accesible para el tratamiento terciario de las aguas residuales, trabajando bajo este mismo principio a escala real.

## CONCLUSIONES

1. Se comprobó afirmativamente la hipótesis planteada al inicio del presente estudio ya que se redujo la concentración de fósforo total en un 82.5% y nitrógeno total en un 27% y los efluentes domésticos a valores menores a los respectivos límites máximos permisibles según la normativa vigente, así como el mejoramiento de su índice de biodegradabilidad, por medio de la aplicación del sistema de tratamiento alternativo de electrocoagulación.
2. La unidad experimental a escala laboratorio cuenta con las siguientes dimensiones: un alto de 30cm, ancho de 20cm y una profundidad 40cm, también cuenta con la implementación de 8 placas de aluminio de 25x15 cm con un espesor de 1.25cm, las cuales realizan el proceso de electrocoagulación en el agua residual.

3. La corriente óptima a inducir en la unidad es de 1 amperio con una diferencia de potencial eléctrico de 5 voltios entre cada par de placas, haciendo un total de 35 voltios para el conjunto.
4. El proceso de electrocoagulación tiene su eficiencia óptima en la remoción de fosforo total siendo esta mayor del 50%, llegando a valores menores del límites máximo permisible del Acuerdo Gubernativo 236-2006.
5. El costo total de la electrocoagulación por metro cúbico de agua a tratar es de Q28.23.
6. Subproducto de la electrocoagulación se genera hidrógeno gaseoso que proporciona una agitación conveniente para el gradiente de velocidad, formándose de esta forma flóculos más estables.

## **RECOMENDACIONES**

1. En estudios avanzados acerca de las eficiencias en la aplicación de la electrocoagulación, se recomienda evaluar más parámetros de calidad del agua residual: color, sólidos, grasas y aceites, metales pesados, coliformes fecales entre otros.

2. Evaluar la remoción de macronutrientes en aguas residuales de alta carga orgánica.
3. Para mejorar el diseño de la unidad se recomienda trabajar con un sistema continuo (con caudal constante) en vez de un tipo batch.
4. Es mucho más viable la electrocoagulación si se cuenta con agua de conductividad mayor a la trabajada en este estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alonso-Vante, Nicolás. **Electroquímica Y Electrocatálisis, Materiales, Aspectos Fundamentales Y Aplicaciones**. E-LibroNet, Buenos Aires, 2003.
2. Cenkin, V. E. And Belevtsev, A. N. **Electrochemical Treatment of Industrial Wastewater. Effluent and Water Treatment**. Journal. Julio 1985.
3. Chang, Raymond. **Química**. McGraw Hill 10a Edición. México 2009.
4. Galvín, Rafael Marín, Rodríguez Mellado. **Fisicoquímica De Aguas**. Ediciones Diaz de Santos S.A. España, 1999.
5. Gerardo Galvis. **Pretreatment alternatives for water**. USA, 2002



6. Metcalf & Eddy. **Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento y reutilización.** McGraw Hill. México, 1996.
7. Perez, Nestor. **Electrochemistry And Corrosion Science**”, Kluwer Academic Publishers. Boston, 2004.
8. Rangel, Luna. **Química analítica.** LIMUSA. 2ª Edición Tomo I. México 1986.
9. Serway, Jewett. **Física para las ciencias de la ingeniería.** CENGAGE learning. 7ª Edición, Tomo II. Pag 752 “Corriente y Resistencia”. México, 2008
10. Salut, A. F. **Electrofloculation: Removal of Oil, Heavy Metals and Organic Compounds from Oil-on-water Emulsions. Filtration and Separation.** Vol. 33, No 295. Mayo, 1996.
11. Weber, W. J. **Control De La Calidad Del Agua.** Editorial Reverté. España, 1979.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGRAWAL, Tejas S. et al. **Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes.** En : Journal of Hazardous Materials. Vol.109, No.1-3 (jun. 2004); p.165-171.
2. BAKLAN, V. Yu. and KOLESNIKOVA, I. P. **Influence of electrode material on the electrocoagulation.** En : Journal of Aerosol Science. Vol. 27, Suplemento 1 (sep. 1996); p.S209-S210.
3. BARIOU, B. et al. **Defluoridation of septentrional Sahara water of North Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes.** En : Water Research. Vol. 32, No. 5 (may. 1998); p.1604-1612.
4. BARTON, Geoffrey W.; HOLT, Peter K. and MITCHELL, Cynthia A. **The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology.** En : Chemosphere. Vol. 59, No. 3 (abr. 2005); p. 355-367.

5. BARTON, Geoffrey W. et al. **A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation.** En : Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects. Vol. 211, No. 2-3 (dic. 2002); p. 233-248.
6. BAYRAMOGLU, Mahmut et al. **Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater.** En : Separation and Purification Technology. Vol. 37, No. 2 (jun. 2004); p. 117-125.
7. \_\_\_\_\_. **Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation.** En : Journal of Hazardous Materials. Vol. 132, No. 2-3 (may. 2006); p. 183-188.
8. BECK, E.C; GIANNINI., A.P y RAMIREZ., E.R. **Electrocoagulation clarifies food wastewater.** En : Food Technology. Vol. 22, No. 8 (feb. 1974); p. 18-19.
9. BISWAS, N. and LAZARESCU., G. **Removal of oil from emulsions using electrocoagulation.** En : International Journal of Environmental Studies. Vol. 38, No. 1 (1991); p. 65-75.
10. BOCCA, C.; CERISOLA, G. y PANIZZA, M. **Electrochemical treatment of wastewater containing polyaromatic organic pollutants.** En : Water Research. Vol. 34, No. 9 (jun. 2000); p. 2601-2605.
11. BONCUKCUOGLU, Recep. et al. **The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method.** En : Journal of Hazardous Materials. Vol. 125, No. 1-3 (oct. 2005); p. 160-165.
12. BUDDHASUKH, Duang.; CHOWWANAPHOON, Sombat and PHUTDHAWONG, Weerachai. **Electrocoagulation and subsequent recovery of phenolic compounds.** En : Analytical Science. Vol. 16, No. 10 (2000); p. 1083-1084.
13. CARLSON A., Dale et al. **Electrocoagulation of potable water.** En : Water Research. Vol. 18, No. 11 (1984); p. 1355-1360.
14. CHAUDHARI, Sanjeev et al. **Removal of arsenic from water by electrocoagulation.** En: Chemosphere. Vol. 55, No. 9 (jun. 2004); p. 1245-1252.
15. CHATTOPADHYAY, S.N.; DAY, A. and PAN, N.C. **Reuse of reactive dyes for dyeing of jute fabric.** En : Bioresource Technology. Vol. 97, No.1 (ene. 2006); p.77-83.
16. CHEN, Guohua. **Electrochemical technologies in wastewater treatment.** En Separation and Purification Technology. Vol. 38, No. 1 (jul. 2004); p.11-41.

17. CHEN, Guohua et al. **Electrochemical removal of fluoride ions from industrial wastewater.** En : Chemical Engineering Science. Vol. 58, No. 3/6 (feb.– mar. 2003); p. 987-993.
18. CHEN, Guohua; CHEN, Xueming y YUE, Po Lock. **Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater.** En : Journal of Environmental Engineering. Vol. 126, No. 858 (2000); p. 858-863.
19. CHEN, Guohua; CHEN, Xueming y YUE, Po Lock. **Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation.** En: Chemical Engineering Science. Vol. 57, No. 13 (Jul. 2002); p. 2449-2455.
20. CLAYFIELD, E.R. et al. **Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles.** En : Colloids and Surfaces : physicochemical and engineering aspects. Vol. 104, No. 1 (nov. 1995); p. 101-109.
21. COCKE, David et al. **Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera México.** En : Journal of Hazardous Materials. Vol. 124, No. 1-3 (sep. 2005); p.247-254.
22. DANESHVAR, N; DJAFARZADEH, N. and OLADEGARAGOZE, A. **Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation : an investigation of the effect of operational parameters.** En : Journal of Hazardous Materials. Vol. 129, No. 1-3 (feb. 2006); p.116-122.
23. DONNINI, J.C. et al. **The operating cost of electrocoagulation.** En : The Canadian Journal of Chemical Engineering. Vol. 72, No. 6 (1994); p. 1007-1012.
24. FISHER, André. Sistema AP para descontaminación de las aguas. Bélgica : Asociación ACARRE, Bruselas, 1993. p.73.
25. FENG, Chuanping et al. **Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system.** En: Journal of Hazardous Materials. Vol. 103, No. 1-2 (oct. 2003); p. 65-78.
26. GRASMICK, A and POUET, M. F. **Urban wastewater treatment by electrocoagulation and flotation.** En : Water Science and Technology. Vol. 31, No. 3/4 (1995); p. 275-283.
27. HEUKELEKIAN, H. and HUNTER, Joseph. **The composition of domestic sewage fractions.** En : Water Pollution Control Federation. Research Journal. Vol. 37, No.8 (1965); p. 1142-1163.

28. HU, C.Y. et al. **Removal of fluoride from semiconductor wastewater by electrocoagulation–flotation.** En : Water Research. Vol. 39, No. 5 (mar. 2005); p. 895-901.
29. KARLIS, P.K. et al. **Testing an electrochemical method for treatment of textile dye wastewater.** En : Waste Management. Vol. 20, No. 7 (nov. 2000); p. 569-574.
30. KARLSSON, Hans et al. **Treatment of dye wastewater containing acid orange II using a cell with three-phase three-dimensional electrode.** En : Water Research. Vol. 35, No.17 (dic. 2001); p. 4226-4230.
31. KIM, Tak-Hyun et al. **Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process.** En : Desalination. Vol. 150, No. 2 (nov. 2002); p. 165-175.
32. KHRISTOSKOVA, S. **Possibility of purification and decoloring wastewater from the yeast industry by electrocoagulation.** En : Nauchni Tr-Plovdski University. Vol. 22(1984); p. 177–185 S.
33. KNIERPER, L. and LAWRENCE, J. **Electrocoagulation.** En : Industrial Wastewater. Vol. 1, No. 2 (ene.-feb. 2000); p. 20-24.
34. KOPARAL, A. Sava and Ö ÜTVEREN, Ülker Bakir. **Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation.** En : Journal of Hazardous Materials. Vol. 89, No. 1 (ene. 2002); p. 83-94.
35. MCGARREHAN, Jared and YANG, Chen-Lu. **Electrochemical coagulation for textile effluent decolorization.** En : Journal of Hazardous Materials. Vol. 127, No. 1-3 (dic. 2005); p. 40-47.
36. MERCADO MARTÍNEZ, Iván Darío. **La electrocoagulación, una nueva alternativa para el tratamiento de aguas residuales.** Medellín, 2005. Proyecto de grado (Especialista en Ingeniería Ambiental). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías. Especialización en Ingeniería Ambiental. P. 72-89.
37. MOLLAH, Mohammad et al. **Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation.** En : Journal of Hazardous Materials. Vol. 114, No. 1-3 (oct. 2004); p. 199-210.
38. ORTIZ CASTRILLO, Edwin Manuel. **Evaluación del tratamiento primario, secundario e investigación del tratamiento terciario por fitodepuración en la remoción de nutrientes y descarga microbiológica en la planta piloto de tratamiento de agua residual doméstica Aurora II, "Ing. Arturo Pazos Sosa",**

**posterior a la rehabilitación.** Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, USAC. Guatemala, 2003. p. 22-62.

39. PINZON GAMBOA, Erick Estuardo. **Propuesta técnica a escala piloto para la remoción de color de origen textil, por medio de electrocoagulación para favorecer el proceso de potabilización de agua, en una planta de tratamiento de aguas.** Escuela de Ingeniería Química, USAC. Guatemala, 2010. p. 8-91.

40. RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia y TOBÓN MEJÍA, Olga Lucia. **Manual de calidad de aguas.** Universidad de Medellín: Facultad de Ingeniería Ambiental EIA Colombia, 2002. p354.

## ANEXOS

Figura 16: Montaje de la unidad de electrocoagulación

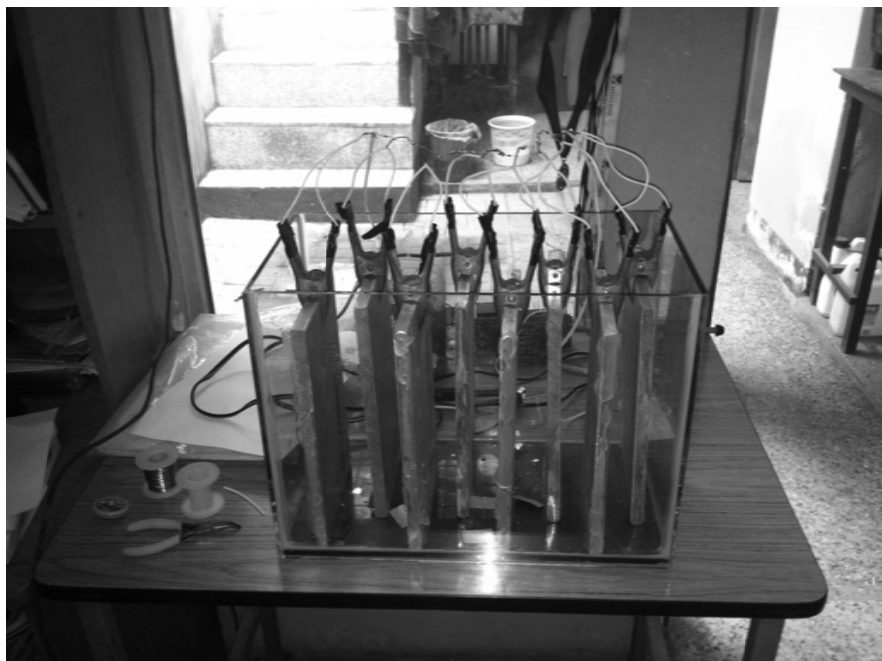


Figura 17: Voltaje entre placas unidad de electrocoagulación



Figura 18: Producción de hidrógeno y oxígeno reacción electrolítica

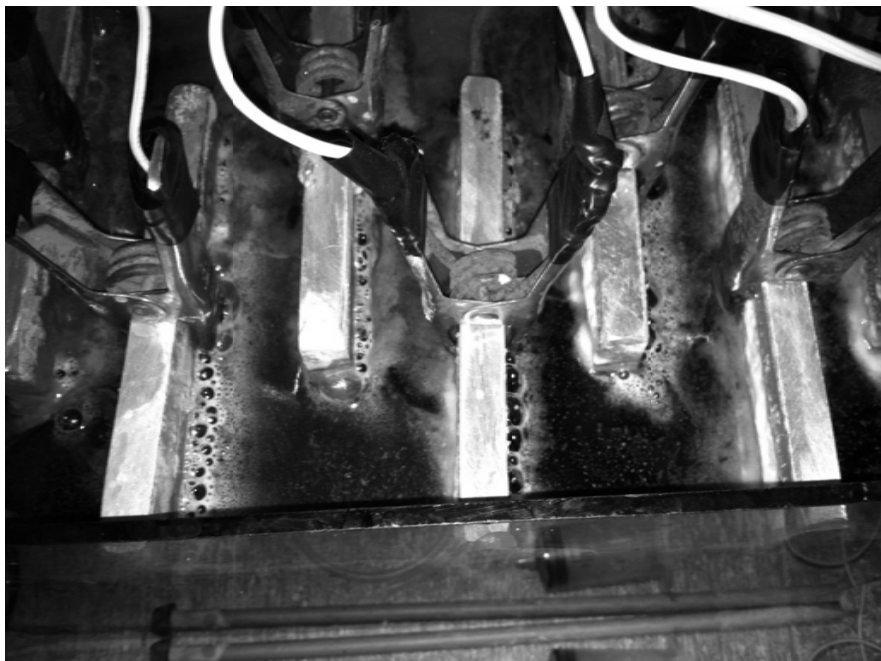


Figura 19: Formación de flóculos producto de la electrocoagulación



Figura 20: Fotómetro y termoreactor utilizados



Figura 21: Concentraciones iniciales y finales de fósforo

INICIAL

FINAL



