

**ESTUDIO DE LA ELECTRÓLISIS COMO ALTERNATIVA EN EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA**

**OMAR JOSÉ NUTA NUÑEZ**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y  
QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**PAMPLONA, junio 4 de 2020**

**ESTUDIO DE LA ELECTRÓLISIS COMO ALTERNATIVA EN EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA**

**OMAR JOSÉ NUTA NUÑEZ**

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Director: SONIA ESPERANZA REYES GÓMEZ**

Ph.D. Ciencia e Ingeniería de Materiales

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y  
QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**Pamplona, junio 4 de 2020**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico primeramente a Dios por sus bendiciones recibidas para poder terminar mis estudios de pregrado, demostrándome diariamente su amor y por nunca dejarme solo.

A mi padre Omar Nuta y mi madre Iris María Nuñez por ser la energía que impulsa a este motor y no parar hasta lograr mi meta día a día en momentos fáciles y difíciles de la vida por estar siempre ahí.

Se lo dedico a mis compañeros y amigos por estar apoyándome cuando me encontraba en momentos de tensión; como a Ana García y Juancho Galindo por ofrecerme su gran confianza y cariño en muchos momentos difíciles y fáciles siendo ellos como mis segundos papás en este arduo camino.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios y mis padres, por estar incondicionalmente acompañándome para crecer profesionalmente y como persona.

También agradezco a mis compañeros y amigos de pregrado y aquellos de otros programas que incondicionalmente estuvieron en este largo trayecto de estudio en especial a Luz Adriana Zapata Peñalosa y también a mis grandes amigos Nicolás Andrés Santamaría, Luis Enderson Pinzón, Andrés Eloy Redondo, Jaime Enrique Bayona, Darold José Díaz, Sergio Carrero y en memoria de Juan Sebastián Santoval Villamizar.

A la Universidad de Pamplona donde diariamente realizaba mis actividades académicas, especialmente al programa de Ingeniería Química, a mi directora de proyecto de grado Sonia Esperanza Reyes Gómez una gran persona como lo es la Ingeniera Laura Daza y Yolandita la auxiliar de laboratorio.

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	10
3. OBJETIVOS.....	11
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	11
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
4. AGUAS RESIDUALES .....	12
4.1. CONTEXTUALIZACIÓN.....	12
4.2. MARCO LEGAL Y NORMATIVO .....	14
4.3. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.....	17
4.3.1. Pretratamiento.....	17
4.3.2. Tratamiento primario .....	19
4.3.3. Tratamiento secundario o biológico. ....	20
4.3.4. Tratamiento terciario.....	24
5. ELECTRÓLISIS .....	25
5.1 ANTECEDENTES.....	29
6. ANALISIS Y DISCUSIÓN .....	36
6. CONCLUSIONES.....	42

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	43
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros fisicoquímicos de interés en agua residual.....	16
<b>Tabla 2.</b> Unidades de pretratamiento.....	18
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de tratamiento secundario o biológico.....	21
<b>Tabla 4.</b> Ventajas y desventajas de la electrocoagulación.....	28
<b>Tabla 5.</b> Condiciones de operación óptimas según la naturaleza de agua residual.....	38

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Desarenador PTAR Itivana. ....	19
<b>Ilustración 2.</b> Sistema de tratamiento primario.....	20
<b>Ilustración 3.</b> Diagrama de proceso PTAR Itivana. ....	23
<b>Ilustración 4.</b> Laguna de oxidación PTAR Itivana.....	24
<b>Ilustración 5.</b> Floculación iónica.....	25
<b>Ilustración 6.</b> Sistema general de electrólisis.....	26



# 1. INTRODUCCIÓN

Diariamente los avances científicos han adquirido un interés en el medio ambiente, minimizando los impactos que se puedan presentar sobre este, luego de una serie de procesos que conlleven a generar residuos peligrosos para el ambiente y en la salud de todo ser vivo. Sin embargo, se evidencia que las aguas residuales generadas después de utilizar el agua potable en actividades industriales, domésticas depositadas en cuerpos acuíferos o suelos fértiles, representan un riesgo a la población y sistemas ecológico conllevando a recuperaciones a largo plazo (Orjuela & Lizarazo, 2013). A medida que incrementa la demanda de agua potable por parte de la humanidad, independientemente su objetivo, la cantidad de aguas residuales aumenta de manera significativa y la contaminación en el mundo se ve favorecida (Uhlenbook *et al.*, 2017). En el caso de Colombia, gracias a el Ministerio de Vivienda, en el país el 58% de las aguas residuales no reciben tratamiento, siendo depositadas en cuencas hídricas, de tal modo que la legislación ambiental ha impuesto medidas con el fin de proteger la calidad de las fuentes hídricas que contemplan los conceptos establecidos actualmente vigentes en el país (Almario *et al.*, 2014), de tal manera que se adopten los programas que contemplan el sistema de saneamiento básico ambiental, el cual está bajo la ordenanza de del artículo 49 de la constitución política y está a cargo del estado (MINAMBIENTE, 2015).

La electrólisis ha venido jugando un papel importante sobre el tratamiento de aguas residuales, por ende, se analiza la influencia que tiene esta técnica en la descontaminación de estas aguas, de tal manera que pueda ser vertida a las cuencas hídricas siendo amigable con el ambiente. Esto se ve reflejado en la disminución de parámetros como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos que se relacionan con la cantidad de materia orgánica presentes y remoción de metales pesados por medio de la aplicación de corriente eléctrica sin la necesidad de implementar agentes químicos externos, y bajos costos de operación en lo que concierne a la energía eléctrica (Piña *et al.*, 2011).

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tratamiento de las aguas residuales se ha vuelto una necesidad a medida que una población comienza a crecer, la cantidad de agua residual aumenta de manera significativa, requiriendo de un tratamiento para poder ser vertida en cuerpos hídricos o ser reutilizada. El impacto sobre el ambiente y la salud son los focos principales por el mal manejo de aguas residuales, que en consecuencia aumentan la vulnerabilidad de la población debido a malos olores y los patógenos presentes debido a la materia orgánica (Orjuela & Lizarazo, 2013).

Este trabajo se desarrolla con el propósito de estudiar la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual que permita minimizar los riesgos en la salud humana, sobre el ambiente y suplir las necesidades para que la población pueda tener acceso a los planes de saneamiento básico (Lozano, 2012). El enfoque de este estudio bibliográfico, es estudiar la electrólisis como alternativa a los métodos convencionales en el tratamiento de aguas residuales las cuales pueden ser aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales o una mezcla de las dos, comparando casos en Colombia y en el exterior. Teniendo en cuenta la gran contribución que puede aportar este estudio sobre la generación de nuevos procesos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales convirtiéndolos en sistemas más eficientes y selectivos. Se identificarán las eficiencias de la electrólisis, teniendo en cuenta las condiciones de operación como el gasto energético, la variación de la intensidad de corriente, la potencia eléctrica y la naturaleza de los electrodos (Indigoyen, 2019; Piña et al., 2011) comparando los parámetros fisicoquímicos en los estudios reportados. Se determinará la viabilidad de la implementación del proceso en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Colombia según los costos energéticos. Por otro lado, se detallarán las reacciones que ocurren en los electrodos (ánodo y cátodo) conocidas como reacciones de oxidación y reducción las cuales producen hidróxidos que sirven como desestabilizantes de la materia orgánica.

Sin embargo el manejo de los lodos producidos como subproducto del tratamiento de las aguas es más sencillo, debido a que los iones metálicos que se liberan durante el proceso a causa de la energía eléctrica, forman largas cadenas de polihidróxidos diferentes a los producidos en la coagulación convencional con sales químicas, ya que estas presentan diferentes estructuras hidratadas, permitiendo retirar con mayor facilidad los lodos residuales, siendo estos compactados fácilmente como consecuencia de la baja concentración de agua ligada a los flocs (Piña et al., 2011).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la electrólisis como alternativa a los métodos convencionales en el tratamiento de aguas residuales comparando casos en Colombia y el exterior.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar la eficiencia reportada del proceso de electrólisis en el tratamiento de aguas residuales.
- Analizar las condiciones de operación que se requieren para la implementación del proceso de electrólisis en el tratamiento de aguas residuales.
- Determinar la viabilidad de la implementación del proceso de electrólisis para el tratamiento de aguas residuales en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Colombia.

## 4. AGUAS RESIDUALES

### 4.1. CONTEXTUALIZACIÓN

Las aguas residuales, son simplemente las aguas servidas que transportan materiales sólidos y líquidos contaminantes como pueden ser metales pesados que han sido reportados usualmente como el arsénico, cadmio, cromo, plomo, mercurio y níquel (Bedoya et al., 2013) que pueden provenir de diversas actividades industriales, domésticas y comerciales que pueden contener sustancias capaces de generar efectos adversos en la salud en concentraciones pequeñas, como residuos de algunos medicamentos de uso común y el contenido de material orgánico ( heces humanas y animales) como también, el contenido de grasas y aceites (Uhlenbook et al., 2017), luego de utilizar el agua potable proveniente de los abastecimientos del sistema de acueducto (Orjuela & Lizarazo, 2013).

Las aguas residuales municipales por lo general, tienen un aspecto de color gris y olor a queroseno, en cambio aquella que ha sido generada con mucho más tiempo tiene un olor particular conocido como huevo podrido o sulfhídrico y color negro presentando temperaturas mayores a la del agua potable en un rango de 10 a 20 °C (Orjuela & Lizarazo, 2013) y son transportadas por medio del sistema de alcantarillado municipal, el cual está constituido por una serie de tuberías que provienen de las viviendas hacia los colectores situados debajo del suelo en las carreteras y estas en ocasiones, son enviadas a sistemas receptores como fuentes hídricas (Almario et al., 2014) (CONAGUA, 2009). Debido a las condiciones aceptables que el ambiente requiere, se han diseñado los sistemas de tratamiento de agua residual que a pesar de los avances, en América latina solo el 20% de las aguas residuales son tratadas (Almario et al., 2014) y en Colombia solo el 42 % de las aguas residuales que van a los ríos son tratadas según reporte del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio de Colombia (MINVIVIENDA, 2019). En Colombia, las aguas residuales son tratadas generalmente por medio de sistemas de tratamientos secundarios (Lopera & Campos, 2011) debido a costos y asegurando que los índices de contaminantes presentes en la legislación colombiana se cumplen con estos sistemas, en los que se presenta con mayor notoriedad las lagunas de oxidación (44%), sistemas de aireación (9,4%) y filtros biológicos (7%) (ACUATECNICA S.A.S., 2017).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales, son las encargadas de minimizar el impacto sobre el ambiente y la salud humana a lo que pueden conllevar tratar estas aguas donde se disminuye la mayor cantidad de sólidos, se reduce la materia orgánica y los contaminantes, de tal manera que se pueda restaurar la presencia de oxígeno. Las plantas de tratamiento están organizadas en etapas de tratamiento, las cuales pueden variar de una configuración a otra en los diferentes sistemas existentes, pero teniendo en común que empiezan con un pretratamiento, donde todo el material suspendido de mayor tamaño puede ser retenido en rejillas y desarenadores como arena, madera, trapos (Belzona Inc., 2010), terminando en una disposición final, donde el agua tratada, según sus condiciones se le da un propósito.

La electrólisis es un concepto aplicado a las aguas residuales que se describe a partir de la electroquímica, donde se estudia los fenómenos que ocurren entre la corriente eléctrica y la energía química. La electrólisis es aquella rama de la electroquímica en la que emplea la energía eléctrica para que se lleve a cabo una reacción química de óxido reducción (redox), siendo estas no espontáneas, ya que requieren de una fuente externa para que las reacciones se lleven a cabo (Vera, 2007). Por medio de este principio, la electrólisis se implementa en las aguas residuales con el fin de eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificantes. Esta técnica, realiza sus primeras apariciones en 1888 en Londres por Webster quien implemento por primera vez electrodos como medio de transferencia de energía eléctrica hechos de hierro soluble. Se ha implementado desde 1906 a medida que se aprobó la primera patente en los Estados Unidos, pero surgieron problemas económicos para que las industrias la adoptaran como alternativa de implementación y a medida que fueron avanzando las investigaciones con diferentes materiales en el caso de los electrodos, fueron mejorando los resultados en el tratamiento de las aguas con esta técnica (Á. Arango, 2005).

La electrólisis o más conocido como electrocoagulación se ha identificado como una de las mejores alternativas para el tratamiento de aguas residuales y más sobre las de tipo industrial, debido a que esta presenta una gran versatilidad, sin requerir grandes áreas para su operación y principalmente no es necesario el uso adicional de sustancias químicas, debido a que la energía eléctrica es el único reactivo implementado para la desestabilización de especies químicas suspendidas o disueltas, gracias a la aplicación de diferenciales de potencia a través de los arreglos de electrodos sumergidos en la solución de agua residual (Jaramillo et al., 2005).

## 4.2. MARCO LEGAL Y NORMATIVO

Este capítulo presenta los lineamientos adecuados que debe de regirse por cada planta de tratamiento para poder verter las aguas tratadas a cualquier cuerpo hídrico o suelos fértiles y el posible consumo de tal manera que no produzcan ningún problema adverso sobre el ecosistema viéndose involucradas las corporaciones autónomas que gestionan el cumplimiento de las condiciones de vertimiento que realizan las empresas prestadoras del servicio. Teniendo en cuenta la normativa vigente, es posible mitigar los impactos que se generan día a día contra el ecosistema de tal manera que se incremente el tratamiento de las aguas residuales, evitando un problema social y medioambiental que pueda poner en peligro los esfuerzos planteados por la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible a través de la resolución 70/1 de 2015, la Asamblea general de las Naciones Unidas aprueba esta al que Colombia hace parte en las que participan la Presidencia de la República, el Ministerio de Relaciones Exteriores, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Departamento para la Prosperidad Social, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística y el Ministerio de Hacienda y Crédito Público, la Agencia Presidencial de Cooperación y representantes del sector privado. Esta agenda, contempla el desarrollo económico, social y ambiental, en el que la salubridad de la sociedad está presente y el ambiente, y por consiguiente se contempla el impacto tan importante que genera las aguas residuales (Naciones Unidas, 2018).

En Colombia, existe principalmente un cuerpo gubernamental, encargado de la regulación de agua potable y saneamiento básico, donde se incluyen el servicio de distribución de agua potable, el servicio de alcantarillado y gestión de residuos al que se conoce como Comisión de Regulación de Agua Potable (CRA). La CRA Es la encargada de la parte normativa sobre el sector de agua potable y saneamiento básico en los que se encuentra presente las siguientes (CRA, 2017):

- Ley 142 de 1994 Por el cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.
- Decreto 2474 de 1999 Por el cual se reestructuran la comisión de regulación y se dictan otras disposiciones.
- Decreto 1524 de 1994 Por el cual se delegan las funciones presidenciales de señalar las políticas generales de administración y control de eficiencia en los servicios públicos domiciliarios, y se dictan otras disposiciones.

- Decreto 2882 de 2007 Por el cual se aprueban los estatutos y el Reglamento de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, CRA.
- Decreto 2883 de 2007 Por el cual se modifica la estructura de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, CRA.
- Resolución 0631 del 2015 Por el cual establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dicta otras disposiciones.
- Resolución 0330 del 2017 Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico -RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.
- Decreto 1594 de 1984 por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la ley 9 de 1979, así como el capítulo II del Título IV – Parte III – Libro II y Título III de la Parte III - libro I del decreto – Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. En este se presenta el Artículo segundo donde se nombran a la EMAR como la Entidad Encargada del Manejo del Recurso.

Según lo estipulado por el artículo 1 del decreto 2728 del 2012, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico está constituido por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, el Ministro de Salud y Protección Social, el Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Director del Departamento Nacional de Planeación y por cuatro expertos de dedicación exclusiva nombrados por el presidente de la república, para periodos fijos de cuatro años, no sometidos a las reglas de carrera administrativa (MINVIVIENDA, 2012).

Dentro de estos estamentos gubernamentales, surgen medidas de prevención, manejo y corrección de las aguas residuales, como es el caso del Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000. El RAS está constituido por una serie de títulos en donde hace parte el marco legal, los sistemas de tratamiento de aguas, desarrollo, construcción y puesta en marcha de proyectos, entre otros. La resolución 0631 del 2015 nos indica los parámetros y valores máximos permisibles en que las aguas residuales pueden ser vertidas a los efluentes de aguas superficiales y los sistemas de alcantarillado público, tales como:

**Tabla 1.** Parámetros fisicoquímicos de interés en agua residual.

<b>PARÁMETRO FISICOQUÍMICO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
pH	En condiciones adversas puede llegar a provocar alteración en la composición y modificar la vida biológica de las aguas naturales y de las etapas de tratamiento de las aguas residuales.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Conocida también como la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual que puede ser biodegradable o degradable, pero en ocasiones es interferida la cuantificación por la presencia de compuestos inorgánicos tales como nitritos, amoníaco, cloruros, hierro, etc.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	Es la cantidad de oxígeno que requiere los microorganismos presentes en las aguas residuales para biodegradar la materia orgánica en procesos aerobios, permitiendo el diseño de unidades de tratamiento biológicos.
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Son partículas coloidales que se encuentran en suspensión en el agua y pueden ocasionar calentamiento de esta debido a que absorben el calor del sol incrementando la temperatura del agua disminuyendo la concentración de oxígeno disuelto (IDEAM, 2007).
Sólidos Sedimentables (SSED)	Son las partículas que por medio de procesos físicos pueden ser retenidos y separados del agua, de tal modo que se disminuya la temperatura del agua y evitar alteraciones en los procesos de tratamiento del agua.
Grasas y Aceites	Son compuestos orgánicos que están constituidos por ácidos grasos y también derivados de los hidrocarburos del petróleo, interrumpiendo el tratamiento químico, físico o biológico que se le realice al agua residual y deben ser eliminadas en los procesos de pretratamiento (Vidales et al., 2010).
Compuestos de Nitrógeno	Inciden principalmente en la estabilidad del ecosistema generando toxicidad en la vida biológica y la salud humana hasta en concentraciones muy bajas (Cárdenas & Sánchez, 2013).



Cianuro Total (CN <sup>-</sup> )	Genera efectos nocivos en el medio ambiente que principalmente está presente en actividades mineras que provoca altos impactos en el ecosistema acuífero como la alteración de la vida en este (Ramos, 2016).
Metales Pesados	Son los contaminantes que generan efectos negativos en el medio ambiente debido a que no son biodegradables siendo los más comunes en las aguas residuales el cobre, plomo, zinc, mercurio y cadmio.

Adaptado de: (Guanoluisa, 2012)

La resolución que modifica algunas condiciones del RAS 2000, es la resolución 0330 del 2017, contemplando los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo. Esta resolución, es aplicada a los prestadores de servicio de agua potable y saneamiento básico, a los inversionistas, a los encargados de vigilancia y control y demás entes pertenecientes o que contemplen funciones con el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico según la ley 142 de 1994 (ACODAL, 2017).

### **4.3. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

El tratamiento de las aguas residuales se lleva a cabo según las condiciones en las que esta se encuentre, antes de ingresar a las instalaciones encargadas de su estabilización o acondicionamiento para poder darle una disposición final.

#### **4.3.1. Pretratamiento.**

El pretratamiento tiene como objetivo, la eliminación de los materiales de mayor tamaño, evitando el daño de los equipos, alteración en las unidades de depuración de contaminantes y el transporte de las aguas residuales. Para llevar a cabo el pretratamiento existen diferentes dispositivos para este procesos que depende principalmente del tipo de agua residual, las

características de agua residual, tipo de unidades que serán empleadas posteriormente en el tratamiento y el tamaño de operación de la estación (Lozano, 2012) en los que se conocen tales como:

**Tabla 2.** Unidades de pretratamiento.

<b>UNIDAD</b>	<b>CARACTERISTICA</b>
Cribado	Rejas encargadas de retener material sólido grueso que se encuentren suspendidos en el agua, de manera manual o mecánica.
Trituradores de canal	Es encargado de la reducción de tamaño de sólidos en aguas servidas con sus trituradores dobles.
Tamices estáticos	Son filtros implementados generalmente en la industria para la separación sólido líquido que consta de luces de 0.5 a 1 mm.
Desarenador	Tiene como principio, la eliminación o retención de arenas que puedan ocasionar decantación en tuberías o, el atascamiento en equipos como bombas de transporte de agua. Existen en forma circular o rectangular, aireados o no, de limpieza mecánica o manual.

Homogenización	Encargado de la regulación de la variación del flujo o de la concentración de las aguas residuales.
----------------	---

Basado en: (Orjuela & Lizarazo, 2013).

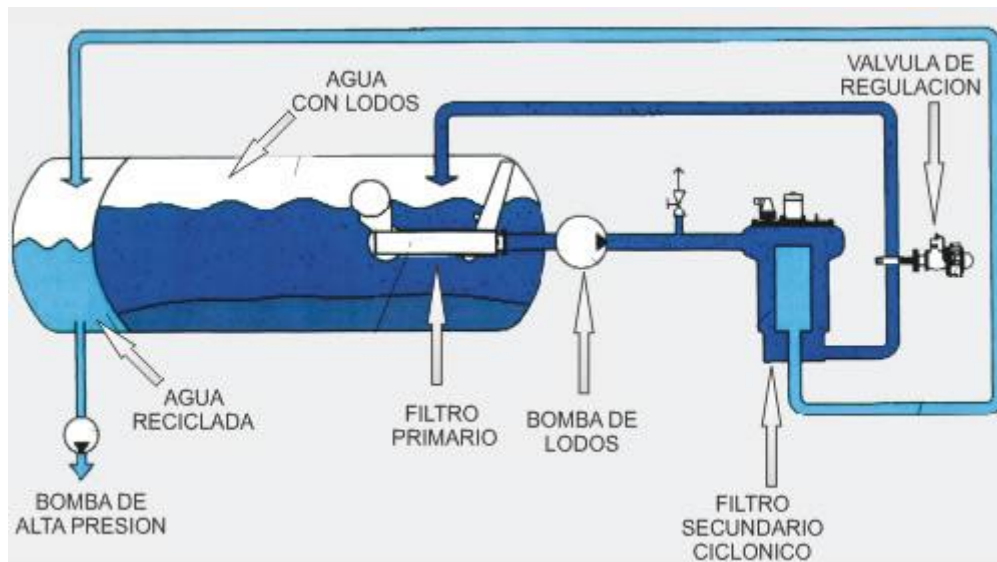


**Ilustración 1.** Desarenador PTAR Itivana.

Fuente: (CARIBABARE E.S.P., 2020).

#### 4.3.2. Tratamiento primario

Encargados de la eliminación de los sólidos suspendidos o la eliminación de grasas de las aguas residuales por efecto de la gravedad o con ayuda de agentes químicos externos como coagulantes, aumentando su velocidad de decantación. Con la eliminación de estos sólidos suspendidos, se ve directamente influenciada la disminución de la concentración de la DBO. Los separadores más implementados son los decantadores, tamices y unidades de decantación asistida químicamente (Lozano, 2012). En estos sistemas, se alcanza la remoción de sólidos suspendidos del 60% y el 30% de la DBO en aguas residuales domésticas (Noyola et al., 2013).



**Ilustración 2.** Sistema de tratamiento primario.

Fuente: (GROUP SPENA, 2020)

#### 4.3.3. Tratamiento secundario o biológico.

El tratamiento secundario o biológico, tiene como principio, la eliminación de la materia orgánica por medio de microorganismos biológicos, transformándola en materia celular, en energía para el metabolismo y en otros compuestos orgánicos e inorgánicos. Este tratamiento es elegido generalmente en el tratamiento de aguas residuales domésticas, debido a su bajo costo y alta eficiencia de remoción, removiendo también en ciertos casos, nutrientes como nitrógeno y fósforo. Los microorganismos biológicos, principalmente convierten la materia orgánica soluble, los nutrientes y otros compuestos, como los sulfuros y metales en flóculos (flocs) conocido como oxidación biológica, siendo retirados del agua tratada, normalmente por sedimentación viéndose reflejado en la variación de la DBO (Lozano, 2012) (Noyola et al., 2013).

Este sistema de tratamiento se puede realizar por medio de dos procesos denominados aerobio y anaerobio en los que la disminución en concentración de la DBO y de sólidos suspendidos que no pudieron ser removidos en proceso de pretratamiento, este sistema remueve hasta el 85% de estas propiedades (Lozano, 2012; Orjuela & Lizarazo, 2013):

**Aerobio** es el que participa principalmente la presencia de oxígeno disuelto el cual, es el único aceptor de electrones. Siendo de esta manera, donde el carbono se oxida y por consiguiente el oxígeno se reduce produciendo por medio de síntesis biomasa y como productos de desecho dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agua (H<sub>2</sub>O) y amoníaco (NH<sub>3</sub>).

**Anaerobio** en ausencia de oxígeno disuelto en el medio de operación. En este proceso la mayor energía liberada, permanece en los productos como el metano (CH<sub>4</sub>) y por consiguiente se genera menor cantidad de biomasa a comparación del proceso aerobio y menos lodos. En este proceso, la presencia de sulfatos y dióxido de carbono obliga a mantener condiciones anaerobias, de tal manera que no se vea afectada la formación de metano, produciéndose en tres etapas las cuales la fase hidrolítica, la fase de fermentación ácida y fermentación metanogénica.

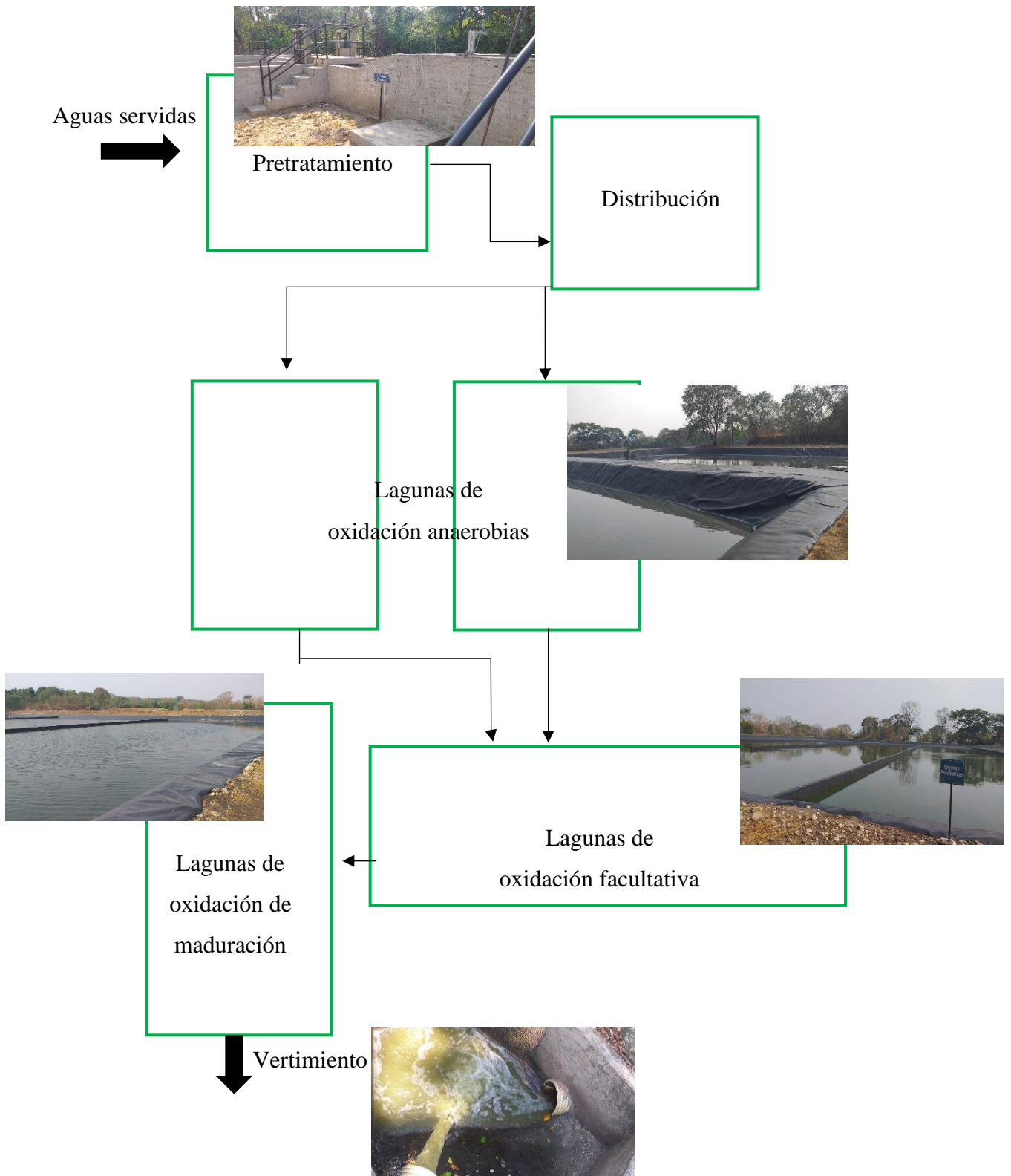
Las diferentes plantas que pertenecen a este sistema de tratamientos son conocidas por su tipo de proceso en los que se encuentran:

**Tabla 3.**Clasificación de tratamiento secundario o biológico.

Aerobio	Reactor Biológico Secuencial (SBR) o de flujo intermitente	Consiste en un sistema de llenado y vaciado en el que la presencia de lodos activados es evidente y fundamental (Muñoz & Ramos, 2014).
	Reactor de Tanque Agitado Continuo (CSTR)	El agua fluye por gravedad a través de pasos que se requieran el cual cuenta con un sistema de clarificación que permite la retención del lodo, y el paso del agua tratada (López, 2013).
	Reactor Biológico de Membrana (MBR)	Sistema biológico en el que la implementación lodos activos con membranas de módulos huecos o de placa plana que permiten la separación de agua y lodo. Son aplicados al tratamiento de aguas

		residuales municipales y domésticas (Hurtado, 2008).
	Biorreactor Biológico de Lecho Móvil (MBBR)	Degrada la materia orgánica por medio de la incorporación de un Carrier (biomasa) y una red de aireación. Los lodos generados, se separan por medio de decantación o flotación (Parra, 2006).
	Laguna de oxidación aerobia y facultativa	Es un depósito en forma de piscina, en la que la descomposición se lleva a cabo a través de bacterias aeróbicas y anaeróbicas facultativas con oxígeno producido a partir de la fotosíntesis de las algas presentes en las lagunas (Comisión Nacional del Agua, 2007).
Anaerobio	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente a través de un manto de lodo (UASB)	Tanque cerrado con dos zonas de influencia. Consiste en zona de digestión que se efectúa en la parte de abajo del tanque y la de sedimentación, llevada a cabo en la parte superior (Lozano, 2012). Permiten la implementación de elevadas cargas orgánicas que pueden sobrepasar los 30 kg de DQO por m <sup>3</sup> por día (Orjuela & Lizarazo, 2013).
	Laguna de Oxidación	Su diseño es similar al de una laguna de oxidación aerobia, pero con una profundidad mayor impidiendo la difusión del oxígeno en el agua (Comisión Nacional del Agua, 2007).

La empresa de servicio públicos del municipio de Tame en el departamento de Arauca CARIBABARE E.S.P. cuenta con un sistema de tratamiento secundario de aguas residuales, en específico lagunas de oxidación, el cual presenta la siguiente configuración:



**Ilustración 3.** Diagrama de proceso PTAR Itivana.



**Ilustración 4.** Laguna de oxidación PTAR Itivana.

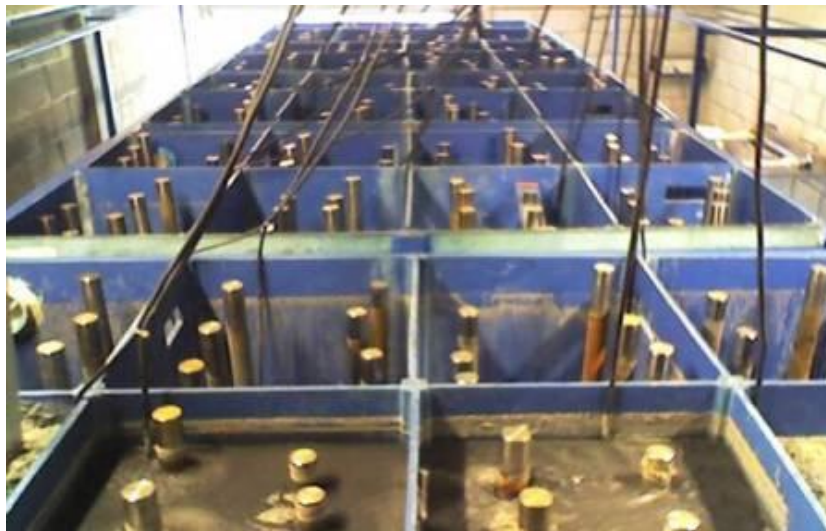
Este sistema de tratamiento de aguas residuales, es el más implementado en Colombia como se menciona en la sección 4.1. Evidentemente, los mayores contaminantes de los cuerpos hídricos en Colombia provienen del sector agrícola y del sector pecuario con una producción diaria de DBO de 7.100 toneladas. Respecto a las aguas domésticas, los mayores productores de contaminantes son Bogotá con el 15%, Barranquilla por debajo del 5%, Cali con el 10%, Medellín con el 13%, Manizales y Cartagena por debajo 5% para el vertimiento estimado de  $67 \text{ m}^3/\text{s}$  produciendo DBO de 800 toneladas diaria y no obstante la industria, haciendo parte el sector de alimentos, licores, producción de sustancias químicas industriales e industria del papel y cartón (CONPES, 2002).

#### **4.3.4. Tratamiento terciario.**

También conocido como tratamiento avanzado, es aquel que puede realizarse como práctica adicional para la erradicación de contaminantes orgánicos no biodegradables, organismos patógenos y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo aplicándose generalmente después de los procesos biológicos secundarios con el fin de poder reutilizar las aguas tratadas y siendo uno de los focos de la implementación de este sistema en Latinoamérica, debido a que en algunos países donde la presencia de agricultura generan aguas residuales con grandes concentraciones de nitrógeno y fósforo que son imposibles de remover con los sistemas de tratamiento primarios o secundarios como los pesticidas, metales pesados y agroquímicos. Los tratamientos terciarios



se conforman por proceso de nitrificación-desnitrificación, adsorción con carbón activado, intercambio iónico, procesos con membranas y procesos de oxidación avanzada.

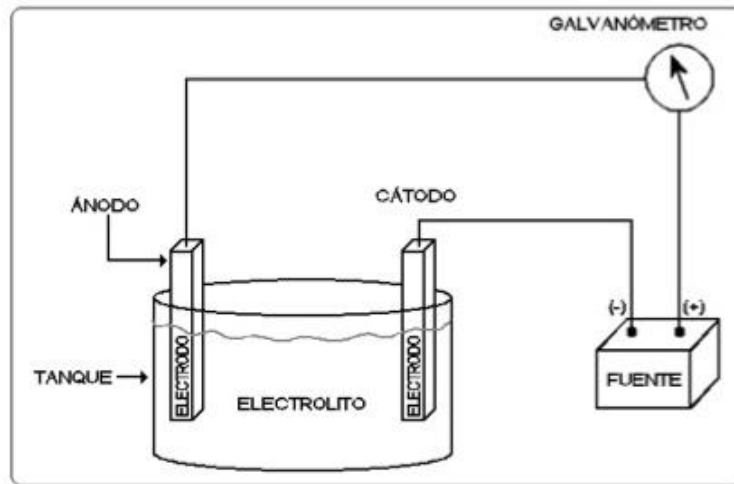


**Ilustración 5.** Flocculación iónica.

Fuente: (*Sendrea, 2010*).

## **5. ELECTRÓLISIS**

La electrólisis o electrocoagulación es un proceso que pertenece a la clasificación de los tratamientos secundarios de agua residual (García, 2018) donde la depuración de la materia orgánica se lleva a cabo por medio de corriente eléctrica que es transmitida por medio de materiales conductores denominados electrodos (ánodo (carga positiva) y cátodo (carga negativa)), empleando diferentes configuraciones como Diamante Dopado con Boro (DDB), acero inoxidable, hierro, aluminio, titanio que deben estar a cierta distancia que varios autores en diferentes tipos de aguas residuales mencionan, el cual afecta el rendimiento o eficiencia del proceso.



**Ilustración 6.** Sistema general de electrólisis.

Fuente: (Díaz, 2015).

El reactor diseñado para el tratamiento de las aguas, consiste en incorporar electrodos monopolares en serie o paralelo con gran área superficial, de tal manera que se brinde una velocidad de disolución del metal. Estos deben de estar conectados a una fuente externa de corriente directa donde el electrodo implementado como ánodo, se corroe por causa de la electricidad, mientras el cátodo se mantiene inerte. Debido a la corrosión del ánodo, ocurre la coagulación de los contaminantes donde estos iones liberados, remueven estos contaminantes por medio de reacción química y precipitación o agregando materiales coloides que pueden precipitar o flotar que se mueven a través del campo eléctrico sufriendo reacciones de electrólisis o de hidrólisis alterando de manera directa las propiedades fisicoquímicas del agua y los contaminantes, terminando en la erradicación de los contaminantes.

El tratamiento de aguas residuales como se ha mencionado anteriormente, ha jugado un papel muy importante desde sus inicios hasta la fecha. Para que los estudios realizados presenten resultados que comprueben la efectividad del proceso, se deben contemplar los factores principales que pueden afectar el proceso (Á. Arango, 2005; Barrera, 2014). Tales factores son:

La **densidad de corriente** que implica un aumento en la temperatura del agua, provocando una disminución directa de la eficiencia debido a valores de densidad de corriente de mayor

magnitud viéndose afectado el desgaste del electrodo de sacrificio (ánodo) debido a que a mayor intensidad de corriente mayor será la liberación de iones metálicos.

El **pH** es el indicador del nivel de acidez o basicidad del proceso de tal manera que se ha observado que para aguas residuales ácidas incrementa cuando se presenta la producción notoria de hidrógeno ( $H_2$ ), de tal manera que la producción de hidróxidos metálicos es notoria y para aguas residuales alcalinas disminuye debido a la baja producción de hidrógeno dejando iones  $H^+$  libres en el medio, por tanto, el rendimiento del proceso depende de la naturaleza del agua residual. Se ha encontrado que se obtienen mejores resultados de remoción a pH cercanos a 7. Por otra parte, se evidencia la alteración del proceso de manera directa en la disociación del hidróxido metálico disminuyendo la producción de este reflejándose en la eficiencia de la corriente eléctrica por causa del pH, del cual se considera que, a pH alcalinos, aumenta la disociación de hidróxidos. El pH no presenta efectos significativos dentro del proceso cuando la conductividad es alta.

La **conductividad** afecta el tratamiento de electrólisis debido a que es encargado de la reducción de efectos de sustancias presentes en el agua residual como carbonatos y sulfatos que conllevan a disminuir la eficiencia de la corriente, aumentando de manera directa el potencial eléctrico, para ello, la presencia de  $Cl^-$  dentro de las aguas residuales es fundamental ya que este aumenta la conductividad, recomendándose la presencia de este en un 20%.

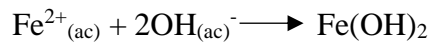
El **potencial eléctrico** para que ocurra el proceso de óxido-reducción debe ajustarse dependiendo el tipo de contaminante con el que se esté trabajando de tal manera que se empleen potenciales bajos para evitar la disminución de la eficiencia de la corriente.

Teniendo en cuenta los factores que influyen de manera directa y notoria en el proceso de electrocoagulación, se puede analizar las reacciones que se presentan dentro del sistema teniendo como ejemplo electrodos de aluminio y hierro sabiendo que en el ánodo es donde ocurren las reacciones de oxidación, manteniéndose inerte o sin ninguna alteración el cátodo (Durante, 2016):

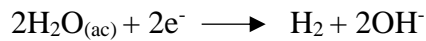
Reacción anódica:



O



Reacción catódica:



En la tabla 4, se puede observar las diferentes ventajas y desventajas que presenta la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 4.** Ventajas y desventajas de la electrocoagulación.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Se encuentran que los costos de operación son menores que los de tratamientos convencionales.	Los electrodos de sacrificio o ánodo, deben removerse debido a su desgaste generado por la producción de hidróxidos metálicos.
No requiere de un gran espacio para su instalación, siendo capaz de tratar gran cantidad de agua residual.	La concentración de metales dependiendo del que este compuesto el ánodo, es alta en los lodos residuales.
No requiere de la implementación de productos químicos.	La remoción de la DBO soluble que provienen de solventes y refrigerantes es baja.
El agua tratada se obtiene de manera tal que no requiere de almacenamiento, ya que los tiempos de retención son menores comparados con tecnologías convencionales.	La implementación de corriente eléctrica, puede llegar a ser costosa dependiendo el lugar y condiciones de operación del agua a tratar requiera.
Los flóculos obtenidos durante el proceso, pueden ser removidos por medio de una separación secundaria, siendo los flóculos más estables y de mayor tamaño que los generados en otros tratamientos.	Puede llegar a ser altamente corrosivo, generando subproductos posiblemente peligrosos para la salud (Cano, 2014).

<p>Es capaz de remover las partículas coloidales más pequeñas, debido a la transferencia eléctrica, acelera su movimiento dando la coagulación en menores tiempos.</p>	<p>El óxidos metálicos generado en el ánodo, puede llegar a ser poco soluble en el medio, generando una capa sobre el electrodo, de tal manera que disminuye la eficiencia en la transferencia de corriente eléctrica viéndose afectada la eficiencia del proceso (Restrepo et al., 2006). Esto se debe a la presencia de iones bicarbonatos que son atraídos por los hidróxidos producidos generando una capa sobre el ánodo, que provoca la inactivación parcial de este (Restrepo et al., 2006).</p>
<p>La producción de H<sub>2</sub> <i>in situ</i>, facilita la flotación de los flóculos en la superficie del agua.</p>	<p>Requiere una alta conductividad para que el proceso se lleve a cabo (Gilpavas et al., 2008).</p>

Adaptado de: (Á. Arango, 2005).

## 5.1 ANTECEDENTES

La electrólisis es una técnica que se ha venido implementando desde el siglo XX en áreas como la industria del papel, la remoción de metales pesados, la minería y también para grandes cargas orgánicas donde se llevaron a cabo ensayos con electrodos de hierro soluble, en localidades de Inglaterra. En Estados Unidos, sobre el río Ohio se implementó el mismo proceso, pero con electrodos de hierro y aluminio el cual fue efectivo para coagular agua cenagosa, pero sin una reducción significativa del oxígeno disuelto. Asimismo, en 1908 Webster ejecutó el mismo proceso en Santa Mónica con una reducción de materia orgánica del 40%. No obstante, se siguió aplicando como estudio a aguas residuales la electrocoagulación, mostrando una reducción del 50% de la DBO en Alemania en el año 1932 y en 1947 en la Unión Soviética (URSS) se registró una remoción de la DBO del 70 a 80% implementando electrodos de hierro (Arango, 2005).

Recientemente se ha generado un gran interés en el uso de la electrocoagulación en el tratamiento de las aguas residuales debido a la versatilidad de esta técnica. En la Universidad de Caldas Colombia se diseñó un reactor para tratar las aguas residuales de origen industrial de

composición conocida, se obtuvieron eficiencias del 90 % de la remoción de metales como hierro, magnesio y zinc, y de materia orgánica del 80 % en remoción de DQO utilizando 4 electrodos, dos de ellos de acero como cátodo y dos de aluminio como ánodo en los que trabajó con un rango de 0 - 18 V a 6 A y densidad de corriente 2.9161 A/m<sup>2</sup> de y entre 18 – 32 V a 3.5A y densidad de corriente de 1.701 A/m<sup>2</sup> (Jaramillo et al., 2005).

Sin embargo, la aplicación de la electrólisis en aguas residuales en la industria alimenticia, ha sido evidente como lo reporta Hernández y Mejía realizado en la Fundación Universitaria de América en el que se implementó esta técnica con el objetivo de disminuir la carga contaminante que estas aguas presentaban. Las aguas residuales provenientes de la Empresa Procesadora de Materias Primas (PMP) el dónde se encontraron grandes cargas de DQO, DBO, solidos sedimentables, solidos suspendidos y grasas y aceites que son vertidas directamente sin ningún tratamiento adecuado. Estas aguas fueron sometidas a un tratamiento de electrocoagulación con un pH entre 6.2 y 6.8, haciendo uso de 4 electrodos de hierro (Fe) aplicando una potencia de 12.6 V y 2 A en 30 minutos removiendo el 97.38% en DQO, 96.38% en Solidos suspendidos, 99.68% en Solidos sedimentables y 95.96% en grasas y aceites (Hernández & Mejía, 2019). Por otro lado, en la empresa productora de Gelatina S.A., PROGEL S.A., se realizó la remoción de grasas y aceites de muestras de las aguas residuales generadas, las cuales se caracterizaron antes y después del proceso. Se emplearon 8 electrodos aluminio (cátodo) y hierro (ánodo) separados cada 5 mm con un voltaje de 2.7 V, intensidad de corriente de 0,184A y densidad de corriente de 6,26 A/m<sup>2</sup> durante 15 minutos en batch, obteniéndose una reducción de grasas y aceites del 90.37% y 70% de la DQO con pH de 10.86 a 13.06 (Morante, 2002).

Morales y Acosta, en la Universidad Militar Nueva Granada, realizaron un estudio en el que optimizaron un prototipo con el que trataron muestras de agua residual provenientes de la industria galvánica de la empresa Compañía Eléctrica Ltda. las cuales presentaban contenido de Cr<sup>6+</sup>, Pb y Zn. Se usó una placa de cobre (Cu) como cátodo y dos de hierro (Fe) como ánodo de 0.0176 m<sup>2</sup> donde se obtuvo un porcentaje de remoción del 47%. Para el caso del cromo se redujo su contenido en un 51.65% el cual está por debajo de lo establecido por los estándares. Los valores 18.09% de Ni, 50% de Pb, 47.37% de Zn superan los límites admisibles por la normativa (resolución 1074 de 1997). Por otro lado, el Cu presentó un aumento del 519.48% debido a que la placa de cobre invirtió su polaridad y por lo tanto aumentó su concentración en el agua residual. En este estudio el aumento del pH se presentó de 1.4 a 3.78 con una intensidad

de corriente que oscilaba entre 0.27 y 2.4 A y una potencia inicial de 31.8 Vdc (Morales & Acosta, 2010).

También, Gilpavas realizó una investigación en la Universidad EAFIT por medio de electrocoagulación donde trató agua residual originaria de una curtiembre y de aguas residuales provenientes de un floricultivo. Los experimentos se llevaron a cabo en un reactor a escala laboratorio, el cual estaba equipado por electrodos de aluminio y hierro en configuración monopolar en discontinuo. Se obtuvieron las condiciones óptimas del proceso de remoción de 71.98% de  $\text{Cr}^{3+}$ , 50.67% DQO y 51.23% COT (Carbono Orgánico Total) para pH entre 6 - 8, una potencia de 13 V, agitación de 382 rpm y distancia entre electrodos de 5mm y una intensidad de corriente de 2.5 A durante 60 minutos y electrodos de aluminio de 0.027 m<sup>2</sup> y para las aguas de floricultivo, se implementaron electrodos de hierro con condiciones óptimas de 370 rpm, 5 mm de separación entre electrodos de 0.0628 m<sup>2</sup>, intensidad de corriente de 2.04 A, 13 V en 10 minutos de operación, obteniéndose remoción del 59.31% de DQO, una decoloración del 97.23% y 41.81% en la remoción de los COT en un pH de 5 - 7 (Gilpavas et al., 2008).

Gómez en un estudio realizado en la Universidad Tecnológica de Pereira, trabajó con aguas residuales originarias de la industria textil. Utilizó la electrocoagulación con el fin de determinar la eficiencia de remoción de color sobre estas aguas la cual fue de 90%, como también la remoción de la DQO y DBO en un 30% y 15%, respectivamente. Se emplearon electrodos de aluminio los cuales mostraron mayor desempeño debido a que el valor promedio de pH se encuentra entre 5 y 7.5. Por otro lado, la separación de 5 mm entre electrodos arrojó mejores resultados, con un área de 0.009m<sup>2</sup> y una intensidad de corriente de 5 A durante 5 minutos de operación con un 96.7% en remoción de color, 34.6% en la DQO y 13.7% en DBO (Gómez, 2018).

Arango y Garcés, realizaron el diseño de una celda de electrocoagulación, con el fin de tratar agua residual de una industria láctea. Estudiaron el efecto de los electrodos de hierro y aluminio. Encontraron que a medida que aumenta la densidad de corriente, aumenta la eficiencia de remoción, pero esto implica mayores gastos energéticos. No obstante, implementando electrodos de 0.0925 m<sup>2</sup> hierro de sacrificio y densidades de corriente de 32.43 A/m<sup>2</sup> (2.99 A) presenta un 91.4% de remoción de DQO en comparación al 82.01% de DQO con aluminio como ánodo y 43.23 A/m<sup>2</sup> (3.99 A) la remoción con hierro es del 95.1% y 12 V

para todo el proceso, en ambos casos en 15 minutos de tratamiento y remoción de grasas y aceites del 95% con distancias entre electrodos de 10 mm y una intensidad de corriente de 129.73A/m<sup>2</sup> a un pH de 8.5 (A. Arango & Garcés, 2007). También se reporta un estudio en el que se realizó un tratamiento piloto de electrocoagulación en aguas residuales de procesos lácteos donde se encontró que las condiciones óptimas de proceso como la intensidad de corriente de 1.69 A, 700 mL volumen, 16.9 cm<sup>2</sup> áreas de 6 electrodos en paralelo de aluminio y hierro separados 2 cm, 10 minutos de operación y voltaje de 2.35 V sobre la remoción de DQO y sólidos totales (ST). Esta agua residual presentó un pH de 6.7 con una remoción óptima empleando un ánodo de hierro y un cátodo de aluminio de 92.5% para DBO<sub>5</sub>, 92.5% para DQO y 91% en ST (Pinilla et al., 2018).

Otra área en la que se han realizado los estudios de tratamiento de agua residual por medio de la electrocoagulación es la industria química, como es el caso en el que se trató agua residual proveniente de un laboratorio de análisis químico de la Universidad Pontificia Bolivariana en Montería -Colombia con pH de 1.15 la cual presenta altos índices de DQO y turbidez. Se tuvo en cuenta la eficiencia de remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y la remoción de contaminantes. Se utilizó un sistema de electrocoagulación equipado por un electrodo de hierro y otro de aluminio en un arreglo en paralelo donde se encontró que a distancias entre electrodos de 1 cm con un porcentaje de eficiencia aproximado del 74.74% en DQO y 4 cm con un porcentaje aproximado de eficiencia del 62.01% donde la variación del voltaje aplicado no tuvo ningún efecto en un rango de 10V a 50 V, teniendo en cuenta que a una distancia entre electrodos, la remoción de DQO se ve influenciada por la variación del voltaje con un porcentaje de remoción aproximado del 62.71% y por último, se encontró que la remoción de SST y turbidez, no es eficiente para este tipo de aguas residuales, sin embargo lo es siempre y cuando sea implementado para la remoción de la DQO (Feria et al., 2014).

Por otra parte, Monsalve y Cardona hicieron uso de la electrocoagulación para estudiar la influencia de este tratamiento en aguas residuales de origen de proceso de impresión de papel con pH 6,7 en la ciudad de Medellín en la Universidad Pontificia Bolivariana. En este estudio resaltaron la alta demanda de agua potable para la producción de papel, conllevando a la generación de grandes cantidades de agua residual con un alto índice de DBO, DQO y concentraciones de sólidos suspendidos. Los ensayos realizados se llevaron a cabo con una celda electrolítica, en la cual se implementó como cátodo acero inoxidable y como ánodo aluminio, teniendo en cuenta que la influencia de la separación entre los electrodos fue



insignificante; removiendo hasta el 70% de contaminantes y de color un 90%. Durante el tratamiento se mantuvo el pH inicial del proceso favoreciendo a la precipitación de los iones metálicos obteniéndose una remoción de color a 30 A/m<sup>2</sup> en 10 minutos de 98% y un 69 % de DQO (Monsalve & Cardona, 2014).

Día a día se ha visto la problemática ambiental provocada por la explotación minera, siendo la contaminación por medio de las aguas residuales que son depositadas en fuentes hídricas y por ende alterando el ciclo de vida acuífero. Se estudió la influencia del tratamiento de electrocoagulación sobre aguas residuales generadas en una zona minera de oro el cual implementaban neutralización a pulpa de cianuro (CN<sup>-</sup>). Se encontró la presencia de otros metales como Hg, Fe, Ni, sulfatos y cloruros (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>), DBO y DQO los cuales superaban los valores permisibles por la resolución 0631 del 2015. En condiciones de operación de 2.7 cm de distancia de electrodos, tiempo de retención hidráulica de 300s y pH = 11 se obtuvo un porcentaje de remoción del 74.9% y no obstante se observó la remoción de los demás contaminantes presentes. Se realizó un ajuste de pH con solución de NaOH 3M y HCl 37% en donde se implementó como ánodo, un electrodo de hierro y como cátodo aluminio con un área de 0.0054m<sup>2</sup> con una intensidad de corriente de 1.4A y 32V (Durante, 2016).

La industria minera ha sido un foco de interés para la implementación de la electrocoagulación como fue estudiado anteriormente. Ruiz realizó una investigación en la Corporación Universitaria Minuto de Dios en el que trata agua residual proveniente de una mina de carbón. El estudio consistió en el diseño y puesta en marcha de la celda electrolítica la cual estaba equipada por 4 electrodos como cátodo de hierro y ánodo aluminio en paralelo intercalados. Se obtuvo una remoción del 83.31% turbiedad, 69.25% dureza, 15 % DQO, sin remoción significativa de O<sub>2</sub> disuelto y sólidos totales (ST) del 62.55% con una densidad de corriente de 0.028 mA/cm<sup>2</sup> en 15 minutos de tratamiento y una disminución de pH de 6.087 a 5.367. Estos resultados obtenidos, se acercan a los niveles permisibles por la resolución 0631 del 2015 (Ruiz, 2017).

A nivel internacional, se han realizado diversos estudios sobre el tratamiento de agua residual por medio de la electrocoagulación. En Perú, Indigoyen hizo uso de la electrocoagulación para remover materia orgánica presente en aguas residuales en la empresa Guevara S.R.L de la industria láctea en el que fue empleado como electrodos, ánodo de aluminio y cátodo de hierro con una separación de 1 cm y un área de 0.08253 m<sup>2</sup> con una

intensidad de corriente óptima de  $84.81 \text{ A/m}^2$  en un tiempo de operación de 25 minutos obteniendo remociones del 97.48% en DBO, 97.81% en DQO y 99.11% en aceites y grasas lo cual se comparó por los estándares de ese país. Se determinó que el proceso de electrocoagulación aplicado en el tratamiento de aguas residuales de industria láctea es una alternativa viable (Indigoyen, 2019). Sin embargo, las evaluaciones en tratamiento de aguas residuales realizadas en Perú por medio de la implementación de la electrólisis, también ha sido utilizada en la remoción de materia orgánica en aguas residuales domesticas de la ciudad de Juliaca. En este estudio, llevaron a cabo la construcción de un reactor de electrocoagulación tipo batch a escala laboratorio con la capacidad de tratar 12 litros de agua; se implementaron 14 electrodos de acero inoxidable con un tiempo de operación de 30 minutos con remoción con una potencia de 10 V de 51.6% en DBO y 51.86% DQO (Cancapa, 2019). En Trujillo, departamento de la Libertad se realizo un estudio de tratamiento de aguas residuales que llegan a la planta de tratamiento de Covicorti a escala laboratorio, donde se usó de la electrocoagulación para tratar estas aguas, implementando como material de electrodos Titanio(Ti)(Cátodo) y Aluminio(Al)(Ánodo), una intensidad de corriente de 3.17 A en tiempo de proceso de 60 minutos, una potencia que oscilaba entre los 2V y 5V y pH que aumento de 6.5 a 8.5 donde se presentaron remociones del 22.94% de Sólidos Suspendidos Totales(SST), 90.95% en DQO, 58.24% en DBO, 21.80% en grasas y aceites, 93.56 en turbidez y 97.32% de color(Carhuancho & Salazar, 2015).

En Ecuador uno de los estudios que reportan la implementación de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales aplicado en el tratamiento de lixiviados procedentes del relleno sanitario El Inga. Los lixiviados estudiados, en los que uno se encontraba sin tratamiento y otro con tratamiento en un sistema de aireación, lodos activados y biorreactores de membrana. Siendo el centro de estudio la influencia de la electrocoagulación se diseño un sistema de tratamiento que consistía en esta como tratamiento primario, la fitorremediación como tratamiento secundario y la adsorción de carbón activado como tratamiento terciario. Se obtuvieron eficiencias de remoción con la electrocoagulación equipado con 8 electrodos de aluminio de  $0.0283 \text{ m}^2$  durante 20 minutos con una intensidad de corriente de  $53 \text{ A/m}^2$  a 6V para los lixiviados crudos o sin tratar de 78.6% para Sólidos Suspendidos (SS), 73.5% en DBO, 40.4% en DQO y 79.4% en color. Cabe recalcar que, durante el proceso, el ánodo se contaminó por la presencia de hidróxidos insolubles sobre éste, de tal manera que se disminuye la eficiencia de la corriente eléctrica en el proceso. En el caso de los lixiviados con tratamiento,

no se empleó electrocoagulación (Guanoluisa, 2012). Asimismo, las aguas residuales de la industria láctea han sido de interés en Ecuador ya que éstas son vertidas a las fuentes hídricas sin ningún tratamiento previo presentando alto grado de carga orgánica. La Universidad de las Américas, realizó un estudio de tratamiento implementando la electrocoagulación en el que intervinieron la determinación de condiciones de procesos como el tiempo de operación, el número de electrodos y el voltaje del sistema. Se encontró que el tiempo óptimo es de 60 minutos, 12 electrodos de aluminio y 12 V obteniéndose un 93.33% en DBO, 82.42% en DQO y un 76.81% de SS para la remoción de estos contaminantes. En este estudio, no se tomó en cuenta la densidad de corriente y el pH (P. López & Harnisth, 2016).

Continuando con los estudios internacionales, en México estudian la implementación de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales, siendo el caso de la remoción de contaminantes biorefractarios procedentes de la industria. En este estudio fue implementado como electrodos, placas de hierro de  $0.066 \text{ m}^2$  en las que se encontraron las mejores condiciones de operación a  $\text{pH} = 8$  y densidad de corriente de  $45.45 \text{ A/m}^2$  y se obtuvo un porcentaje de remoción de 70.03% en DQO, 55% en DBO, 81% en color y 80% de turbidez (Linares et al., 2008).

## 6. ANALISIS Y DISCUSIÓN

Como se ha sido mencionado durante el documento y en específico el capítulo I sobre el agua residual y su gran impacto sobre el ambiente, día a día se han realizado estudios con la implementación de nuevas tecnologías que ayuden a la remoción de contaminantes sobre las fuentes hídricas de gran importancia para las actividades del hombre, la salud humana, el medio ambiente, etc. Por ende, los investigadores, han realizado diversos análisis haciendo uso de la electrocoagulación como método de tratamiento de aguas residuales en diferentes áreas en lo que se fundamenta la sección cinco (5).

Los resultados obtenidos en la sección cinco, evidencian las altas eficiencias que se obtienen en la remoción de contaminantes de aguas residuales. No obstante, esta eficiencia depende principalmente de la naturaleza del agua residual, siendo el caso de aguas residuales domésticas e industriales en las que cabe recalcar la industria láctea, agrícola, textil, minera, química, alimentaria donde se presentan remociones de DQO, DBO, metales pesados, sólidos suspendidos, turbidez, color, grasas y aceites, por ende se puede implementar el tratamiento por electrocoagulación de las aguas residuales de origen industrial y así mismo realizar estudios para la implementación en aguas residuales municipales en Colombia ya que la eficiencia de remoción de DQO, DBO, sólidos y turbidez que se presentan sobre estas aguas según lo reportado en los antecedentes, identifica los altos índices de remoción, conllevando a ser una alternativa en los sistemas de tratamiento municipales.

En el caso de las condiciones de operación, la densidad de corriente es uno de los factores que más relevancia tienen dentro del proceso ya que esta influye en la eficiencia del tratamiento, debido a que a mayor densidad de corriente, mayor es la eficiencia de la corriente pero llevando consigo la sobre saturación de hidróxidos metálicos en el sistema y la velocidad de desgaste del ánodo, por ende se deben realizar estudios en los que se encuentre la condición de densidad de corriente óptima dependiendo de las características fisicoquímicas del agua residual a tratar de tal manera, que no conlleve a altos costos energéticos y el remplazo constante del ánodo. Se evidenció que no se requieren de altas intensidades de corriente para el tratamiento, puesto que esta depende directamente de la naturaleza del agua como fue mencionado anteriormente. De manera similar ocurre para el pH siendo evidente en los resultados obtenidos por los estudios donde se refleja que a valores de pH cercanos a 7 se

presentan mejores resultados de remoción como se menciona en la sección cinco, debido a que las condiciones de este influyen de manera directa sobre eficiencia de la corriente, como también lo hace la conductividad eléctrica, entre mayor sea la conductividad, mayor será la transferencia de corriente conllevando a mayor remoción de contaminantes.

Se encontró que la intensidad de corriente que se implementa para el tratamiento de aguas residuales está aproximadamente en un rango de 0.18 - 7 A, potencia de 2.3- 32 V y pH de 4- 11 como consecuencia de la liberación de hidrogeno sumándose la capacidad tampón del sistema para obtener resultados viables sobre la implementación de esta técnica como alternativa de los tratamientos convencionales que utilizan sustancias químicas. Los resultados presentados en la sección 5.1, permite generar de manera evidente, condiciones de operación según la naturaleza del agua con rendimientos como muestra en la tabla 5, el cual presenta los principales parámetros fisicoquímicos que influyen para cada autor sobre el agua residual tratada, de tal manera que se puede evidenciar la versatilidad de implementación del hierro como ánodo o electrodo de sacrificio. Por otro lado, los tiempos de retención son cortos como se muestra en la tabla 5, gracias a la acción desestabilizante como producto de la corriente eléctrica. Estos tiempos de retención o operación dependen principalmente de la potencia eléctrica y de la intensidad de corriente, debido a la saturación de los electrodos.

**Tabla 5.** Condiciones de operación óptimas según la naturaleza de agua residual.

Condiciones de Operación						% Remoción							
Agua residual	Ánodo - Cátodo	Intensidad de corriente (A)	Potencia eléctrica (V)	Tiempo (minutos)	pH	DBO	DQO	Metales	Grasas y aceites	Sólidos suspendidos	Color	Turbiedad	Carbono Orgánico Total (COT)
Industrial	Aluminio – Acero inoxidable	6 y 3.5	0-18 y 18-32	-	-	-	80	90 (Fe y Mg)	-	-	-	-	-
Industria de Alimento gelatina	Hierro - Aluminio	0.184	2.7	15	10.8 – 13.06	-	70	-	90.37	-	-	-	-
Industria procesadora de materias primas (Sebos y Ácidos graos)	Hierro - Hierro	2	12.6	30	6.2 – 6.8	-	97.38	-	95.96	99.68	-	-	-

Industria Galvánica	Hierro - Cobre	0.27	31.8	-	1.4 – 3.78	-	-	47 (Cr <sup>6+</sup> , Pb, Zn)	-	-	-	-	-
Industria Floricultivo	Hierro - Aluminio	2.4	31.8	10	5 - 7	-	59.31	-	-	-	97.23	-	41.81
Industria de Curtiembre	Hierro - Aluminio	2.04	13	60	5 - 7	-	50.67	71.98 Cr <sup>+3</sup>	-	-	-	-	51.23
Industria Textil	Aluminio - Aluminio	5	-	5	5 – 7.5	13.7	34.6	-	-	-	96.7	-	-
Industria Láctea	Aluminio - Hierro	84.81/m <sup>2</sup>	-	25	-	97.48	97.81	-	99.11	-	-	-	-
Domestica	Titanio- Aluminio	3.17	2 - 5	60	6.5	58.24	90.95	-	21.80	22.94	97.32	93.56	-
Lixiviados	Aluminio - Aluminio	53/m <sup>2</sup>	6	20	-	73.5	40.4	-	-	78.6	79.4	-	-
Industria Minera	Oro - Hierro - Aluminio	1,4	32	5	11	-	-	74.9	-	-	-	-	-

	Carbón	Aluminio - Hierro	28/m <sup>2</sup>	-	15	6.087 - 5.36	-	15	-	-	-	-	83.31	-
--	--------	----------------------	-------------------	---	----	--------------------	---	----	---	---	---	---	-------	---



En Colombia puede llegar a ser viable la implementación de la electrocoagulación como se mencionó en la tabla 4 sobre las ventajas y desventajas de esta técnica teniendo en cuenta principalmente en el consumo energético y el tiempo de retención hidráulica en comparación con las lagunas de oxidación que presentan tiempos de retención de 3 a 5 días (Comisión Nacional del Agua, 2007). Siguiendo estas observaciones, el foco de más atención en esta técnica de tratamiento, viene a ser el gasto energético, el cual, si se toma como punto de referencia los límites máximos de la intensidad de corriente y la potencia, como también el tiempo de operación reportados, se tiene que el consumo de energía es de 0.224 kW/h y en Colombia el precio promedio de éste para el 2019 establecido por la Comisión de Regulación de Energía y Gas como tope máximo promedio de 160\$/kWh dando así un valor por cada hora que se implemente el tratamiento de 35.84\$ pesos colombiano y en un año correspondería a 313,958.42 \$ pesos colombianos, de tal manera que los gastos energéticos son bajos haciendo viable esta técnica. No obstante, se debe tener en cuenta que, a mayor intensidad de carga y potencia, el ánodo aumentará su desgaste y por consiguiente tendrá que ser remplazado periódicamente.

Por otro lado, teniendo en cuenta lo estipulado por el decreto 1594 de 1984, el artículo 72 se refiere a las eficiencias de remoción que cada planta como mínimo debe obtener para poder verter las aguas tratadas, siendo así remociones de DBO mayor al 80%, ausente en materiales flotantes, temperatura menor a 40°C, grasas y aceites del 80%, sólidos suspendidos del 80%. De acuerdo con las características del cuerpo receptor y del vertimiento, la Entidad Encargada del Manejo y Administración del Recurso (EMAR) decidirá cuál de las normas de control podrá excluirse mencionadas en este artículo. Por tanto, en varios de las investigaciones estudiadas, la electrocoagulación no puede ser implementada como un sistema único de tratamiento de agua residual dentro de una PTAR, por ende, se requiere de un sistema de tratamiento que satisfaga las necesidades, de tal manera que alcancen los lineamientos establecidos por este decreto 1594 de 1984 y la resolución 0631 del 2015. Sin embargo, se pueden comparar las cantidades en magnitud de los contaminantes después del tratamiento de electrocoagulación y comparando con la resolución 0631, de tal manera que cumpla con lo establecido por esta que conlleve a una viabilidad de ser implementado este tratamiento.

## 6. CONCLUSIONES

La electrocoagulación es una técnica que presenta una gran versatilidad ya que se puede emplear para el tratamiento de las aguas residuales domésticas y provenientes de diversas industrias como la láctea, minera, agrícola, textil, química para remoción de metales pesados, materiales biorefractarios, lixiviados, etc. Además, la electrocoagulación podría ser aplicada en tratamiento de aguas residuales municipales.

Teniendo en cuenta las eficiencias que se reportan en la literatura sobre la electrocoagulación en aguas residuales, se han obtenido muy buenos resultados en porcentajes de reducción de contaminantes, haciendo de esta técnica una alternativa para el tratamiento de estas aguas, pero este proceso debe estar acompañado de otros tratamientos de tal manera que se cumpla con lo establecido por las normativas gubernamentales.

Las condiciones de operación son factibles para el tratamiento de aguas residuales, ya que la electrocoagulación no requiere de una sustancia química para llevar a cabo la remoción de contaminantes, debido a la aplicación de energía eléctrica y la producción *in situ* del agente coagulante, siendo amigable con el ambiente de tal manera que minimizan los impactos que puede generar la utilización de químicos. Teniendo en cuenta lo anterior, deben establecerse las condiciones óptimas de proceso dependiendo de la naturaleza del agua residual, por lo que en todos los lugares cambia sus características fisicoquímicas y biológicas.

Es posible implementar esta técnica en una PTAR en Colombia como un tratamiento primario después del pretratamiento, o un tratamiento secundario para poder cumplir lo establecido por la legislación gubernamental, ya que constituye una alternativa para el tratamiento convencional y es una técnica complementaria para las plantas de tratamiento. Además, presenta otras ventajas como su bajo consumo energético y requiere poco espacio para su instalación.

## **7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

Realizar estudios de tratamiento de aguas residuales municipales por medio de la electrocoagulación utilizando diferentes materiales como electrodos para determinar su eficiencia en la remoción de contaminantes.

Se recomienda ampliar las investigaciones sobre la influencia de esta técnica en la remoción de contaminantes que pueden llegar a afectar la salud humana como son los microorganismos patógenos y los malos olores.

Diseñar la configuración óptima de una celda electrolítica para el tratamiento de lixiviados y aguas residuales domésticas que presente ventajas respecto a la remoción de los lodos producidos durante este proceso.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACODAL. (2017). Nueva Resolución 0330 de 2017 - Reglamento Técnico -RAS. ACODAL. <http://www.acodal.org.co/reglamento-tecnico-ras-nueva-resolucion-0330-de-2017/>
- ACUATECNICA S.A.S. (2017). Cuantas plantas de tratamiento de aguas residuales hay en Colombia. ACUATECNICA S.A.S. <https://acuatecnica.com/cuantas-plantas-tratamiento-aguas-residuales-colombia/>
- Almario, F., Mojica, P., Cuéllar, S., Medina, C., & Mejía, C. (2014). Boletín tecnológico: Tratamiento de aguas residuales (Patent No. 1). Juan sebastian Cruz Camacho.
- Arango, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49–56. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520109>
- Arango, A., & Garcés, L. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(147), 56–67.
- Barrera, C. (2014). Celdas de laboratorio y reactores industriales electroquímicos. In M. Caballer, S. L. Reverte- Aguilar, D. Kimura, & G. Varela (Eds.), *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales* (1st ed., pp. 1–40). Reverté Ediciones S.A.
- Bedoya, K., Acevedo, J., Peláez, C., & Agudelo, S. (2013). Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Revista de Salud Publica*, 15(5), 778–790.
- Belzona Inc. (2010). Tratamiento de aguas residuales. *Belzona*, 1(1), 50. <https://www.belzona.com/es/industries/wastewater.aspx>
- Cancapa, E. (2019). Eficiencia de la electrocoagulación en la reducción de materia orgánica presente en las aguas residuales domésticas bajo condiciones alto andinas (Juliaca – Puno). Universidad Peruana Unión.

- Cano, A. (2014). Tratamiento de efluentes residuales municipales, mediante oxidación electroquímica para su desinfección empleando una configuración de electrodos del tipo DDB- Fe, DDB-DDB". Universidad Autónoma del Estado de México.
- Cárdenas, G., & Sánchez, I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(1), 72–88.
- Carhuancho, H., & Salazar, J. (2015). Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas a nivel laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorte en la ciudad de Trujillo - La Libertad. Universidad Nacional de Trujillo.
- CARIBABARE E.S.P. (2020). Alcantarillado. CARIBABARE E.S.P. <http://www.caribabare.gov.co/empresa/>
- Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: conducciones. In A. Ruiz (Ed.), *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento* (1st ed.). Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro10.pdf>
- CONAGUA. (2009). Alcantarillado y sanitario. In A. Ruiz (Ed.), *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento* (1st ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-29.pdf>
- CONPES. (2002). Acciones prioritarias y lineamiento para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales.
- CRA. (2017). Normatividad comisión de reagulación de agua potable y saneamiento básico. <https://www.cra.gov.co/seccion/normatividad.html>
- Díaz, F. (2015). Proceso electrolítico. Roymaplas S.L. <http://roymaplast.com/proceso-electrolitico/>
- Durante, E. (2016). Tratamiento por electrocoagulación de aguas de cianuro generadas en el beneficio del oro en una zona minera del sur de Bolívar, Colombia. Universidad de

Córdoba.

- Feria, J., Escobar, A., & Martínez, J. (2014). Tratamiento de aguas residuales de origen químico mediante electrocoagulación. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, 11(1), 65–69.
- García, A. (2018). Tipos de tratamiento de aguas residuales. *Ecología Verde*.  
<https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-tratamiento-de-aguas-residuales-1448.html>
- Gilpavas, E., Arbeláez, E., Sierra, L., White, C., Oviedo, C., & Restrepo, P. (2008). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. *Cuadernos de Investigación*, 0(65), 85.
- Gómez, H. (2018). La electrocoagulación como proceso de descontaminación de aguas residuales y herramienta de educación químico- ambiental. Universidad Tecnológica de Pereira.
- GROUP SPENA. (2020). Tratamiento primario del agua y aguas residuales. sistemas de filtración. <http://spenagroup.com/tratamiento-primario-aguas-residuales-sistemas-filtracion/>
- Guanoluisa, L. (2012). Diseño de un sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario el Inga mediante electrocoagulación y fitorremediación. Escuela Politécnica Nacional.
- Hernández, J., & Mejía, S. (2019). Evaluación del sistema de electrocoagulación para disminuir la carga contaminante a escala de laboratorio [Fundación Universitaria de América].  
<https://doi.org/10.37700/0033-2909.I26.1.78>
- Hurtado, J. (2008). Reactores biológicos de membrana (MBR), la solución compacta al tratamiento biológico de aguas | El Agua. Remtavares.  
<https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/29/85617>
- IDEAM. (2007). Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103 – 105 °c. In Subdirección De Hidrología - Grupo Laboratorio De Calidad Ambiental (Vol. 1, Issue 3).  
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Sólidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>
- Indigoyen, D. (2019). Remoción de materia orgánica de aguas residuales de la industria láctea

por el método de electrocoagulación , utilizando energía eólica. Universidad Nacional del Centro del Perú.

Jaramillo, C., Jaramillo, A., & Taborda, G. (2005). Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en la descontaminación de aguas residuales. *Revista Universidad de Caldas*, 145–158.

Linares, I., Barrera, C., Roa, G., & Ureña, F. (2008). Remoción de contaminantes biorefractarios en aguas residuales industriales mediante métodos electroquímicos. *Quivera*, 10(1), 1–15.

Lopera, M., & Campos, S. (2011). Desarrollo de capacidades en el uso seguro de aguas residuales para agricultura (Issue 7).

López, K. (2013). Análisis dinámico de un reactor continuo de tanque agitado (RCTA) con formación de biopelículas para el tratamiento de aguas residuales [Universidad Nacional de Colombia]. <http://bdigital.unal.edu.co/12415/1/8311004.2013.pdf>

López, P., & Harnisth, A. (2016). Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea ( Dairy industry wastewater electrocoagulation ). *Enfoque UTE*, 7(1), 13–21.

Lozano, W. (2012). Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales autor (Issue 0).

MINAMBIENTE. (2015). Resolución N° 0631 (p. 62). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

MINIVIVIENDA, C. Y. T. (2012). Decreto 2728 (p. 3).

MINVIVIENDA. (2019). Obras para descontaminar el río Bogotá contribuyen a la meta de tratamiento de aguas residuales de Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. <http://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/noticias/2019/marzo/obras-para-descontaminar-el-rio-bogota-contribuyen-a-la-meta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-colombia>

Monsalve, J., & Cardona, S. (2014). Electrocoagulación para reúso de aguas residuales del proceso de impresión en la industria papelera. Universidad Pontificia Bolivariana.

- Morales, N., & Acosta, G. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 33–44. <https://doi.org/10.18359/rcin.282>
- Morante, G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA*, 34(2), 160. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Muñoz, J., & Ramos, M. (2014). REACTORES DISCONTINUOS SECUENCIALES: UNA TECNOLOGÍA VERSÁTIL EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 49–66.
- Naciones Unidas. (2018). La agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. In Naciones Unidas (Ed.), *Publicación de las Naciones Unidas* (3rd ed.).
- Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, L. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. <http://es.slideshare.net/EdwinMamaniVilcapaza/seleccion-de-tecnologias-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales>
- Orjuela, M., & Lizarazo, J. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Universidad Nacional De Colombia.
- Parra, C. (2006). Optimización de un biorreactor de lecho móvil ( MBBR ) para la biodegradación de un efluente proveniente de la industria de celulosa Kraft [Universidad de Concepcion]. <http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-claudio-parra-2006.pdf>
- Piña, M., Martín, A., Gonzales, C., Prieto, F., Guevara, A., & García, J. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(2), 257–271.
- Pinilla, C., Vesga, M., & Estupiñán, R. (2018). Tratamiento piloto de electrocoagulación aplicado en aguas residuales derivadas de procesos con lácteos dairy processes. *Revista Matices Tecnológicos*, 9(0), 6–9.
- Ramos, B. (2016). Oxidación fotocatalítica como alternativa de tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de oro con cianuro. Universidad Nacional de Colombia.



- Restrepo, A., Arango, Á., & Garcés, L. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción+Limpia*, 1(0), 20. <http://repository.lasallista.edu.co/dspace//handle/10567/514>
- Ruiz, P. (2017). Prototipo de una celda de electrocoagulación abastecida con energía fotovoltaica para tratamiento de aguas residuales en la industria minera. Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Sendrea, B. (2010). Ingeniería y medio ambiente. *Ingeniería y Medio Ambiente*. <http://bcsendrea.blogspot.com/2010/07/floculacion-ionica-una-solucion-para-el.html>
- Uhlenbook, S., Connor, R., Koncagül, E., Cordeiro, A., Hunziker, D., Abete, V., & Lobach, S. (2017). Aguas residuales el recurso desaprovechado. *El Abreguense*, 3, 123. [http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas\\_Residuales\\_composicion.pdf](http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf)
- Vera, M. (2007). *Química general* Unidad x: Electroquímica (p. 18).
- Vidales, A., Leos, M., & Campos, M. (2010). Extracción de grasas y aceites en los efluentes de una industria automotriz. *Conciencia Tecnológica*, 1(40), 29–34.