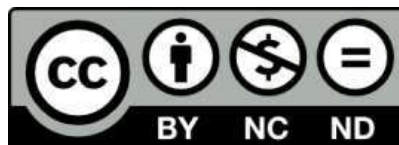


EFICIENCIA DE UN ELECTROCOAGULADOR COMO ALTERNATIVA PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA ALIMENTARIA



POVEDA ÁVILA JUAN DIEGO  
VELA CAMACHO OSCAR GABRIEL



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2021

EFICIENCIA DE UN ELECTROCOAGULADOR COMO ALTERNATIVA PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA ALIMENTARIA

POVEDA ÁVILA JUAN DIEGO  
VELA CAMACHO OSCAR GABRIEL

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director  
JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO  
Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2021

**Autoridades Académicas**

**P. JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.**

Rector General

**P. EDUARDO GONZÁLEZ GIL, O.P.**

Vicerrector Académico General

**P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.**

Rector Sede Villavicencio

**P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**Mg. Ing. YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN**

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

**Nota De Aceptación**

---

---

---

---

---

**Ing. YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN**

Decana de Facultad

---

**JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO**

Director Trabajo de Grado

---

**CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA**

jurado

---

**DIEGO ANDREY CORTÉS NARANJO**

jurado

Villavicencio, junio de 2021.

## Dedicatoria

*A Dios por guiarme día a día y permitirme llegar a este momento tan importante en mi vida; por enseñarme a soñar y tener fe.*

*A mis padres Jesús Poveda y Estela Ávila, por su amor y apoyo incondicional, quienes con gran esfuerzo me han ayudado a labrar un buen camino; por enseñarme los valores y principios para ser la persona que soy; por creer siempre en mí y ser una de las razones para lograr mis metas.*

*A mis hermanos, que han aportado su granito de arena para llegar hasta donde me encuentro hoy y seguir mejorando.*

Juan Diego Poveda Ávila

*A Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida de manera satisfactoria, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y darme la fuerza y la sabiduría necesaria en los momentos difíciles.*

*A mi madre Karina Camacho por darme la vida, por brindarme todo su amor y su apoyo en cada etapa por la cual he atravesado y a mi padre Juan Sánchez por ser mi modelo a seguir, por motivarme en los momentos difíciles y felicitarme en los buenos.*

*A mi querida Abuelita Mariana por los buenos valores que me inculcó desde niño, por educarme con tanto amor y de la mejor manera posible, por enseñarme a ser un buen ser humano. A mis tres hermanos Melany, Juan y Nicolás, por la compañía, las alegrías y el amor que me brindan cada día; por ser la razón que me impulsa a continuar cada día, para mostrarles que con paciencia y esfuerzo todo se puede lograr y no rendirse a la mitad de un camino. A mi novia Yesika Camacho por todo el apoyo que me brindó tanto emocional como académico, por motivarme y ayudarme a ser una mejor persona en todos los aspectos de mi vida, por todos sus consejos y por todo su amor.*

Oscar Gabriel Vela Camacho

## Contenido

|                                                        | Pág. |
|--------------------------------------------------------|------|
| Resumen .....                                          | 11   |
| Abstract .....                                         | 12   |
| 1. Introducción .....                                  | 13   |
| 2. Planteamiento del Problema .....                    | 16   |
| 2.1 Formulación en Torno al Problema.....              | 18   |
| 3. Objetivos.....                                      | 19   |
| 3.1 Objetivo General.....                              | 19   |
| 3.2 Objetivos Específicos .....                        | 19   |
| 4. Alcance del Proyecto .....                          | 20   |
| 5. Antecedentes.....                                   | 21   |
| 6. Justificación .....                                 | 24   |
| 7. Marco Referencial .....                             | 26   |
| 7.1. Marco Conceptual .....                            | 26   |
| 7.2. Marco Teórico .....                               | 27   |
| 7.2.1. Agua residual en la industria alimentaria ..... | 27   |
| 7.2.2. La electroquímica .....                         | 29   |
| 7.2.3. Celdas electroquímicas .....                    | 31   |
| 7.2.4. La electrocoagulación.....                      | 31   |
| 7.2.5. Tipos de conexión.....                          | 33   |
| 7.2.6. Tipos de reactores .....                        | 34   |
| 7.2.7. Eficiencias de remoción.....                    | 35   |
| 7.2. Marco Legal.....                                  | 36   |
| 8. Metodología.....                                    | 38   |
| 8.1. Fase 1. Experimental .....                        | 39   |
| 8.1.1. Montaje del prototipo.....                      | 39   |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 8.1.2. Muestreos y caracterización.....                         | 39 |
| 8.1.3. Diseño factorial .....                                   | 41 |
| 8.2. Fase 2. Configuración Óptima.....                          | 42 |
| 8.2.1. Análisis estadístico.....                                | 42 |
| 8.2.2. Ajustes en la celda electrolítica.....                   | 42 |
| 8.2.3. Muestreo y caracterización final .....                   | 42 |
| 8.2.4. Ejecución del tratamiento.....                           | 42 |
| 8.3. Fase 3. Eficiencia del Tratamiento .....                   | 43 |
| 8.3.1. Determinación de la eficiencia de remoción.....          | 43 |
| 8.3.2. Análisis de normatividad .....                           | 43 |
| 8.3.3. Costos operativos .....                                  | 43 |
| 9. Resultados y Discusión.....                                  | 45 |
| 9.1. Resultados Fase 1. Experimental .....                      | 45 |
| 9.1.1. Construcción del prototipo.....                          | 45 |
| 9.1.2. Muestreos y caracterización del diseño experimental..... | 46 |
| 9.1.3. Aplicación del diseño experimental .....                 | 48 |
| 9.2. Resultados Fase 2. Configuración Óptima .....              | 55 |
| 9.2.1. Análisis estadístico MANOVA en IBM SPSS .....            | 55 |
| 9.2.2. Adecuación de la celda electrolítica.....                | 57 |
| 9.2.3. Datos muestreo y caracterización final .....             | 57 |
| 9.2.4. Operación del tratamiento óptimo.....                    | 58 |
| 9.3. Resultados Fase 3. Eficiencia del Tratamiento.....         | 61 |
| 9.3.1. Eficiencia de remoción.....                              | 61 |
| 9.3.2. Cumplimiento de normatividad .....                       | 63 |
| 9.3.3. Cuantificación de costos operativos.....                 | 64 |
| 10. Impacto Social y Humanístico del Proyecto .....             | 67 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 11. Conclusiones .....    | 68 |
| 12. Recomendaciones ..... | 69 |
| 13. Bibliografía.....     | 70 |
| Anexos.....               | 77 |

## Lista de Tablas

|                                                                                         | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Resumen de resultados relevantes de trabajos relacionados .....                | 23   |
| Tabla 2. Descripción de métodos para el análisis físico-químico del agua residual ..... | 40   |
| Tabla 3. Factores y niveles del diseño factorial 3x2 .....                              | 41   |
| Tabla 4. Resultados caracterización de muestras compuestas .....                        | 47   |
| Tabla 5. Descripción de las condiciones operativas para los tratamientos .....          | 48   |
| Tabla 6. Datos promedio obtenidos de la aplicación del diseño factorial 3*2 .....       | 50   |
| Tabla 7. Prueba multivariante MANOVA del diseño factorial .....                         | 56   |
| Tabla 8. Caracterización fisicoquímica del agua para el tratamiento elegido .....       | 57   |
| Tabla 9. Comparación del efluente tratado respecto a la normatividad .....              | 64   |

## Lista de Figuras

|                                                                                                       | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Interacciones que toman lugar en la electrocoagulación .....                                | 33   |
| Figura 2. Celda electrolítica tipo tanque rectangular .....                                           | 35   |
| Figura 3. Representación metodológica en diagrama de flujo .....                                      | 38   |
| Figura 4. Dimensionamiento de la celda de electrocoagulación experimental .....                       | 45   |
| Figura 5. Ejecución de tratamientos del diseño factorial .....                                        | 49   |
| Figura 6. Porcentajes de remoción de DQO de acuerdo a las muestras compuestas .....                   | 51   |
| Figura 7. Porcentajes de remoción de SST de acuerdo a las muestras compuestas .....                   | 53   |
| Figura 8. Tratamientos ejecutados a las muestras compuestas .....                                     | 54   |
| Figura 9. Ejecución de la configuración de tratamiento elegido .....                                  | 59   |
| Figura 10. Resultados de parametros complementarios del tratamiento elegido .....                     | 60   |
| Figura 11. Concentración de DQO, SST y DBO <sub>5</sub> antes y despues del tratameinto elegido ..... | 61   |
| Figura 12. Efluente industrial antes y después del tratamiento .....                                  | 63   |

## Resumen

En este trabajo de grado, se evaluó el tratamiento de los efluentes provenientes de la industria del pan de arroz mediante la tecnología de electrocoagulación. En primer lugar, se realizó el dimensionamiento y construcción de una celda prototipo en operación Batch, con capacidad de 5 litros. Posteriormente, se empleó la metodología de diseño factorial  $3 \times 2$ , donde se manipularon los factores de corriente, separación entre electrodos y tiempo, evaluados en dos niveles cada uno, con el fin de determinar los efectos sobre las variables de respuesta demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST). Además, los resultados obtenidos del diseño factorial en términos de porcentaje de remoción, fueron analizados estadísticamente con una prueba multivariante mediante el software IBM SPSS statistics.

El análisis estadístico permitió la elección de una configuración óptima entre los 8 tratamientos implementados a través del diseño factorial. Las condiciones de operación del tratamiento elegido fueron, corriente de 2 Amperios, separación entre electrodos 15mm, tiempo de tratamiento de 40 minutos, obteniendo remociones de 84,8%, 82,1% y 82,2% para DQO, SST y DBO<sub>5</sub>, respectivamente. Adicionalmente, el sistema trabajó a una densidad de corriente de  $0,924\text{mA}/\text{cm}^2$ , tensión de 4,3 Voltios y con electrodos Al/Fe en conexión monopolar.

Por otra parte, el efluente tratado se comparó con la resolución 631/2015, evidenciando que los parámetros DQO, SST y DBO<sub>5</sub>, excedieron los VLMP estipulados en la norma, sin embargo, el pH y la temperatura estuvieron dentro del rango aceptable. Finalmente, se discutieron aspectos económicos determinando consumos teóricos de energía y electrodos de  $1,145\text{kWh}/\text{m}^3$  y de  $89,46\text{gAl}/\text{m}^3$  a 40 min, respectivamente. De la misma manera, se calculó el costo operativo teórico del tratamiento, obteniendo un valor de  $\$2.229,8/\text{m}^3$ .

**Palabras claves:** Electrocoagulación, densidad de corriente, ánodo aluminio, efluentes pan de arroz, costos operativos.

### Abstract

In this work, the technology of electrocoagulation for the treatment of effluents from bread of rice industry was evaluated. First, the sizing and construction of a prototype cell in batch operation, with a capacity of 5 liters, was carried out. Subsequently, the 3\*2 factorial design methodology was used, where the factors of current, separation between electrodes and time, evaluated at two levels each, were manipulated in order to determine the effects on the response variables chemical oxygen demand (COD) and total suspended solids (TSS). In addition, the results obtained from the factorial design in terms of percentage removal were statistically analyzed with a multivariate test using IBM SPSS statistics software.

The statistical analysis allowed the choice of an optimal configuration among the 8 treatments implemented through the factorial design. The operating conditions of the chosen treatment were 2 Ampere current, 15 mm electrode spacing, treatment time of 40 minutes, obtaining removals of 84.8%, 82.1% and 82.2% for COD, TSS and BOD<sub>5</sub>, respectively. Additionally, the system worked at a current density of 0.924mA/cm<sup>2</sup>, voltage of 4.3 Volts and with Al/Fe electrodes in monopolar connection.

On the other hand, the treated effluent was compared with resolution 631/2015, evidencing that the parameters COD, TSS and BOD<sub>5</sub>, exceeded the VLMP stipulated in the standard, however, pH and temperature were within the acceptable range. Finally, economic aspects were discussed, determining theoretical energy and electrode consumption of 1,145kWh/m<sup>3</sup> and 89.46gAl/m<sup>3</sup> at 40 min, respectively. In the same way, the theoretical operating cost of the treatment was calculated, obtaining a value of \$2,229.8/m<sup>3</sup>.

**Key words:** Electrocoagulation, current density, aluminum anode, rice bread effluent, operating costs.

## 1. Introducción

El recurso hídrico es indispensable para el desarrollo del ser humano, siendo utilizado tanto en la vida cotidiana en actividades como la hidratación, la preparación de alimentos, el aseo personal, entre otras; así como en los procesos de la industria alimentaria -durante las etapas de producción y limpieza de equipos- (Muñoz & Sánchez, 2018), y en la agricultura, la cual a nivel mundial requiere un gran consumo de agua dentro de su producción (Picazo, 1995). Por esta razón, se requiere una gran cantidad de agua para la realización de dichas actividades, la cual es cada vez más requerida debido al desarrollo social e industrial en el que se encuentra constantemente la humanidad, ocasionando un incremento constante en la demanda de agua, sin embargo, esto también se traduce en una mayor generación de agua residual, repercutiendo nocivamente en la salud pública y el medio ambiente.

Los principales usos del recurso hídrico se dan en tres sectores, el agrícola, el doméstico y el industrial, siendo este último el de mayor interés en esta investigación (Muñoz & Sánchez, 2018). El sector industrial presenta una gran demanda de agua para sus procesos de producción y además es uno de los principales generadores de aguas residuales. Según el Estudio Nacional del Agua (ENA), se estima una demanda para el sector industrial de 1074,6 millones de m<sup>3</sup>/año y vertimientos por 910,2 millones de m<sup>3</sup>/año (IDEAM, 2019).

Una de las industrias que presenta mayor demanda del recurso hídrico es la industria alimentaria, debido a que los usos del agua en dicha industria son muy variados y específicos, como lo son la limpieza y desinfección de equipos y personal, procesos de esterilización, de calentamiento, de mezclado, entre otros, lo que ocasiona a su vez, la generación de una gran cantidad de agua residual que se caracteriza generalmente por una elevada carga de materia orgánica y sólidos en suspensión (Muñoz & Sánchez, 2018; Picazo, 1995).

De acuerdo con lo anterior, la generación de aguas residuales es cada vez mayor y la cantidad de contaminantes que presenta también lo es, aumentando a su vez la contaminación de

los cuerpos hídricos en los cuales son vertidas dichas aguas. Por otra parte, el tratamiento de las aguas residuales de esta industria suele enfrentar complicaciones debido a que las características de dichas aguas varían y están condicionadas a la actividad principal del sector alimentario donde se generen, lo que ha hecho que con las tecnologías de tratamiento convencionales no siempre se logren obtener los mejores resultados, debido a la sensibilidad a contaminantes y fluctuaciones en los afluentes (Nava *et al.*, 2014).

Debido a estas problemáticas de tratamiento, a la afectación de los cuerpos hídricos y a la gran necesidad de proveer de agua potable de calidad a la población en desarrollo, ha surgido la necesidad de investigar tecnologías alternativas que permitan la protección, conservación y recuperación del recurso hídrico, lo que ha dado lugar al desarrollo de múltiples estudios que tienen como objetivo buscar alternativas para reducir la contaminación de los cuerpos hídricos a causa de aguas residuales (Arango, 2005).

Muchas de las tecnologías alternativas no convencionales que actualmente son estudiadas e implementadas, han sido abordadas anteriormente, aunque su desarrollo no se ha dado ampliamente, como es el caso de la electrocoagulación, que consiste en la eliminación de contaminantes que se encuentran presentes en el agua residual a través de la aplicación de energía eléctrica (Arango, 2005).

Algunas de las investigaciones hechas sobre esta tecnología abarcan sectores de la industria alimentaria como el lácteo o vinazas (Arango & Garcés, 2007a; Davila *et al.*, 2011; López & Harnisth, 2016), por lo cual, se pretende abordar un sector diferente a los mencionados, mediante el abordaje de un sector de la industria alimentaria que es típico de la región en la cual se realizará la investigación. Por esta razón y teniendo en cuenta que en el departamento del Meta se realiza la producción típica de Pan de arroz, en el presente trabajo se propone un prototipo de electrocoagulador para el tratamiento de aguas residuales generadas en una industria alimentaria en el sector de la fabricación de pan de arroz, empleando un diseño de celda electroquímica

experimental, con el cual se pretende establecer la configuración óptima de funcionamiento de acuerdo los parámetros DQO,  $\text{DBO}_5$ , SST, conductividad eléctrica, pH y temperatura.

## 2. Planteamiento del Problema

El hombre en el transcurso de la historia para la satisfacción de sus necesidades ha requerido del uso de agua. Es por esto, que el aumento de la población y sus actividades, conllevan a daños de carácter medioambiental, siendo los efluentes de actividades agrícolas, urbanas e industriales, los más relevantes en la contaminación del recurso hídrico (Aguilar, 2015; Bravo *et al.*, 2013; Paredes & Brito, 2012). Dichos efluentes causan impactos por sus cargas contaminantes, sin embargo, son participes en el ciclo del agua, desde su captación hasta su retorno a los cuerpos de agua (WWAP, 2017), siempre que presenten cargas asimilables para la naturaleza. Es por ello, que en La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) tienen en cuenta problemáticas como la escasez y contaminación del recurso hídrico, reflejadas en el objetivo número 6 de los ODS, “Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos” (Naciones Unidas, 2018).

La contaminación de los cuerpos de agua superficial está dada por fuentes puntuales y fuentes difusas (Bravo *et al.*, 2013). Una fuente puntual de contaminación son los efluentes líquidos de las industrias alimenticias. Esta industria es una de las más amplias y de fuerte impacto ambiental, ya sea por sus procesos productivos o por el producto en sí (Restrepo, 2006); los efluentes de este sector son muy diversos, debido a que abarca industrias como beneficio de ganado, pesquero, láctea, azucarera, cervecera y destilerías (Noukeu *et al.*, 2016; Restrepo, 2006); entre otras. Los efluentes de esta industria representan una mayor problemática medio ambiental, debido a que emplean volúmenes considerables de agua, y posteriormente se convierten en vertimientos (Aramendi *et al.*, 2001).

Sin embargo, la industria alimenticia debe satisfacer las necesidades de consumo de la sociedad contemporánea. Debido a estas demandas se requiere aumentar la oferta de sus productos, por lo tanto en la fabricación de estos se emplea agua de excelente calidad en distintos procesos como lavado, limpieza y desinfección, haciendo de sus efluentes uno de los de mayor carga contaminante por materia orgánica, demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos en suspensión, grasas y algunos nutrientes (Arango & Garcés, 2007a; Duek, 2016; Iannacone & Molano, 2018). Dichas características de efluentes líquidos de

la industria alimentaria varían según los procesos realizados, de allí la importancia de su tratamiento.

Para el 2017 el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales en Colombia tan solo fue del 42 y 85% respectivamente, estos porcentajes únicamente contemplan sectores que cuentan con conexión a alcantarillado público (Parra *et al.*, 2018). Dejando por fuera, industrias apartadas de los cascos urbanos. Si bien, los tratamientos biológicos son los más empleados; como el aerobio en una empresa de golosinas en Manizales (Peña *et al.*, 2015), o anaerobios, como es el caso de dos empresas de bebidas en la costa atlántica Colombiana (Vásquez, 2013), estos sistemas de tratamiento, presentan desventajas en su operación. Requieren de un tiempo de aclimatación o arranque, así como mayor tiempo de retención hidráulica (Crombet *et al.*, 2016), en la mayoría de los casos del régimen de días. Además de que son sensibles a la presencia de compuestos tóxicos, su capacidad de remoción de carga orgánica es susceptible a la inestabilidad del afluente que ingresa al tratamiento (Nava *et al.*, 2014). Por lo que, estos tratamientos pueden presentar dificultades operativas, para industrias ubicadas en zonas rurales y con fluctuaciones de afluente.

Por lo anterior, es necesario buscar y adaptar alternativas tecnológicas, que favorezcan el tratamiento de efluentes líquidos (Arango, 2005), como son los provenientes de la industria alimenticia. De este modo, dichos tratamientos deben satisfacer alta efectividad y bajos costos de operación, la electrocoagulación es una de estas alternativas, en la cual toman lugar sus condiciones operativas como tensión, voltaje, material de electrodos, distancia entre electrodos, tipo de conexión y tiempo de retención, fundamentales para obtener resultados óptimos (Arango & Garcés, 2007a). En este sentido, la electrocoagulación puede plantearse como una alternativa al tratamiento de efluentes líquidos de esta industria. Si bien, no es una tecnología nueva, su estudio y desarrollo para este tipo de industria, es bajo en comparación con tecnologías tradicionales (Restrepo *et al.*, 2006).

Es por esto, que se plantea un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de una industria alimentaria, provenientes de una empresa fabricante de pan de arroz. Este tipo de industria es robusta en el departamento del Meta, puesto que es un producto típico de

la región. Siendo una práctica culinaria tradicional de la región, pero su consumo ha llevado a la consolidación del clúster Pan de arroz del Meta con unos 25 productores, que responden a una demanda de alrededor de 15.000 paquetes diarios (Otero *et al.*, 2017). Que en su fabricación se requiere un alto consumo de agua y que a su vez generan aguas residuales con altas cargas contaminantes, sólidos y grasas.

## **2.1 Formulación en Torno al Problema**

De la problemática anteriormente expuesta, surge la proposición de una celda electroquímica de prototipo como una posible alternativa al tratamiento de aguas residuales, resultantes del proceso productivo de una fábrica de pan de arroz. De manera que, se evalué el efecto de diferentes configuraciones de celda, en la disminución de contaminación del efluente.

Por lo que, la presente investigación pretende responder la siguiente formulación: ¿Cuál será la configuración óptima de tiempo, tensión, separación de electrodos y densidad de corriente, para que un electrocoagulador pueda lograr un tratamiento eficiente de las aguas residuales de una industria alimentaria, en términos de DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos totales, conductividad eléctrica, pH y temperatura?

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

Evaluar la eficiencia en la remoción de cargas contaminantes en aguas residuales de una fábrica de pan de arroz, mediante la tecnología de electrocoagulación de flujo discontinuo, con el propósito proponer esta tecnología como una alternativa de tratamiento.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Construir un prototipo experimental de electrocoagulador para el tratamiento de agua residual.
- Caracterizar las variables físico-químicas del agua residual provenientes de una industria alimentaria.
- Establecer la configuración óptima para el funcionamiento el electrocoagulador.
- Determinar la eficiencia del electrocoagulador mediante los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, conductividad eléctrica, pH y temperatura.

#### **4. Alcance del Proyecto**

La presente investigación pretende determinar la eficiencia de un prototipo experimental de electrocoagulación tipo batch de flujo discontinuo, partiendo del tratamiento de aguas residuales de una industria alimentaria fabricante de pan de arroz.

El trabajo está encaminado directamente hacia las empresas productoras del clúster pan de arroz del Meta, centrados a nivel departamental en los municipios de Restrepo y Villavicencio, (véase el Anexo C). Para efectos del desarrollo de la investigación y por decisión unilateral de la empresa, que representa una industria alimentaria consolidada en el departamento del Meta, su información no será divulgada en este documento. Sin embargo, esta empresa permitió el acceso a sus instalaciones para la debida toma de muestras de agua residual, como se propone en la metodología. La eficiencia de este prototipo es determinada mediante el análisis y comparación de las aguas residuales sin tratamiento y una vez aplicado el tratamiento, a través de pruebas de laboratorio.

El desarrollo de este proyecto de investigación, se realizó durante el segundo semestre del año 2020, con el ánimo de evaluar el comportamiento y desempeño de esta tecnología como posible alternativa de tratamiento del agua residual de la industria en cuestión y así mismo, ampliar los conocimientos que se tienen sobre la electrocoagulación para otras industrias del sector alimentario. De esta manera, a través de la investigación se pretende establecer una configuración óptima para el adecuado funcionamiento del electrocoagulador, con la posibilidad de ser replicado y/o escalado a otras industrias del sector alimentario.

## 5. Antecedentes

La tecnología de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales, ha sido mayormente estudiada para su aplicación en efluentes de industrias textiles, curtiembre, galvanoplastia y cosméticos (Aguilar *et al.*, 2019; Bermeo & Tinoco, 2016; Costa *et al.*, 2019; Deniz & Akarsu, 2018; Gilpavas *et al.*, 2017; Heidmann & Calmano, 2010). Los desarrollos en Colombia en otras industrias diferentes a estas son escasos, sin embargo, hay algunas investigaciones similares al tema de estudio (Arango, 2005; Arango & Garcés, 2007a, 2007b; Davila *et al.*, 2011; Restrepo *et al.*, 2006).

Arango & Garcés (2007a), en su investigación hacen énfasis de los aspectos de diseño para óptimos resultados de la electrocoagulación aplicada en la industria láctea. Estos se centran en el número de electrodos, distancia entre electrodos, zonas de flotación, zona de reacciones y zona de sedimentación. La cantidad de electrodos es determinada mediante la ecuación denominada *Número de Electrodos*, considerando las dimensiones de la celda y el grosor de los electrodos, sin embargo, estas últimas dos las establece el investigador según el volumen a tratar. Esta ecuación es aplicada a una celda electrolítica rectangular. Por ello, se adopta para esta investigación. En cuanto a las zonas de la celda, si bien, teóricamente existen los fenómenos de flotación y sedimentación, estos dependen de la procedencia del agua, por lo que se debería considerar mejor esta característica si se habla de aspectos de diseño óptimos.

Por otra parte, Valero *et al.* (2011), consideran la electrocoagulación, como una alternativa más ecológica a los efluentes generados en la industria de las almendras. Los autores realizaron un escalado de condiciones experimentales en flujo discontinuo a un piloto industrial, acoplado a un sistema de tratamiento continuo con capacidad para 1 m<sup>3</sup>/h denominado TREAC-EC. Sin embargo, no se hace explícito un diseño metodológico que dé cuenta de los criterios para determinar las condiciones experimentales de operación a escala laboratorio. En última instancia, cabe aclarar que el piloto industrial contempló el ajuste de pH y conductividad, pero finalmente descartaron estas medidas, pues su aplicación aumentaba considerablemente los costos sin cambios significativos en los porcentajes de remoción.

Por otra parte, Dávila *et al.*, (2011) abordaron la vinaza, que es un subproducto líquido de la destilación de alcohol, utilizando un diseño experimental  $L_9$  ( $3^4$ ) del método Taguchi, para evaluar el desarrollo de la electrocoagulación-electroflotación. De acuerdo a este diseño, las condiciones iniciales de operación presentan rangos amplios, lo que implicaría que, de la corrida elegida, aun se puedan acotar las condiciones de operación y determinar si se obtienen resultados favorables. En este sentido, para la investigación particular se contempla un diseño factorial  $3 \times 2$ , con rangos de condiciones iniciales de acuerdo a reportes teóricos.

Aguilar (2015), aplicó la electrocoagulación para el tratamiento de efluentes en una industria de pinturas y pegamentos, basado en un reactor batch. Al igual que Valero *et al.* (2011), también fue ajustado el pH inicial, pero desistieron de este ajuste, pues no hubo cambios relevantes en la remoción de DQO. En este sentido, el ajuste del parámetro de pH no se contempla para este trabajo. Si bien este trabajo no se enfoca en industria alimentaria, muestra otra clase de industria para la aplicación de esta tecnología, destacando la electrocoagulación para la remoción de contaminantes y la calidad de los lodos generados (Aguilar, 2015).

Finalmente, López & Harnisth (2016) emplearon un diseño factorial  $2^3$  para establecer las mejores condiciones de tiempo, número de electrodos y voltaje para la celda de electrocoagulación en la industria láctea. Es importante mencionar que, en este trabajo, no se varió la corriente y tampoco se determinó la densidad de corriente, pues son términos relevantes para calcular el consumo de energía de la celda y analizar la eficiencia.

De acuerdo con estos proyectos uno de los vacíos en conocimiento son específicamente las configuraciones de variación de amperaje y su relación con el voltaje, lo cual da sentido a la investigación propia. En la Tabla 1, se muestran algunos trabajos con experiencias que tuvieron diferentes manejos de las variables en cuestión.

Tabla 1. Resumen de resultados relevantes de trabajos relacionados

| País                                  | Aplicación                                                              | Principales Resultados                       |                                       | Características                                                                      |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       |                                                                         | Remoción                                     | Condiciones Iniciales                 |                                                                                      |
| Colombia(Arango & Garcés, 2007a)      | Industria láctea                                                        | DQO 85,58%-95,1%                             | 54.05A/m <sup>2</sup>                 | Ajuste de pH y agitación interna.                                                    |
| España(Valero <i>et al.</i> , 2011)   | Industria de almendras                                                  | COT 79%<br>DQO 81%<br>DBO <sub>5</sub> 67%   | 5mA/cm <sup>2</sup><br>5.7pH<br>15min | Ajuste de pH y conductividad.<br>Escalado a un piloto industrial                     |
| Colombia(Davila <i>et al.</i> , 2011) | Tratamiento de vinaza, subproducto líquido de la destilación de alcohol | ST 50%<br>COT 25%<br>DQO 61%                 | 20mA/cm <sup>2</sup>                  | Agitación interna.<br>Ajuste de pH y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . Método Taguchi. |
| Perú (Aguilar, 2015)                  | Industria de pinturas y pegamentos                                      | DQO 87%                                      | 5A<br>10 electrodos<br>15min          | Ajuste de pH.                                                                        |
| Ecuador(López & Harnisth, 2016)       | Industria láctea                                                        | DQO 82,42%<br>DBO <sub>5</sub> 93%<br>SS 76% | 12v<br>12 electrodos<br>60min         | Diseño factorial 2 <sup>3</sup> .                                                    |

Nota: industrias varias no tradicionales en la aplicación de la electrocoagulación, destacando sus principales resultados de remoción y condiciones de operación, por Poveda & Vela (2021).

## 6. Justificación

Los tratamientos de agua residual son diversos y han presentado una evolución a lo largo del tiempo. Sin embargo, a pesar de que en su momento se han desarrollado con gran eficiencia, a medida que el desarrollo social aumenta y el sector industrial crece, los impactos ambientales son también mayores (Paredes & Brito, 2012), ocasionando que en muchos casos estos tratamientos no logren ser lo suficientemente buenos para reducir la contaminación y mejorar la calidad del agua proveniente de las actividades de producción industrial.

Frente a esto, se ha vuelto cada vez más necesaria la búsqueda, creación e implementación de nuevos métodos de tratamiento de aguas residuales que sean económicos y eficaces, por lo cual han surgido alternativas como los denominados “tratamientos naturales de aguas residuales”, tales como las lagunas de oxidación, los sistemas de infiltración y los humedales artificiales, que se han desempeñado de buena forma y han sido económicamente viables (Arias & Brix, 2003). Sin embargo, además de estos tratamientos también han surgido tecnologías como la fotocatálisis (Rueda *et al.*, 2020), el tratamiento por membranas (Mendes, 2019), procesos avanzados de oxidación (Gillpavas *et al.*, 2017) y últimamente por electroquímica (Davila *et al.*, 2011; Deniz & Akarsu, 2018; López & Harnisth, 2016), los cuales dependiendo del área o industria de aplicación resultan ser tecnologías eficientes.

La ingeniería electroquímica es una tecnología que ha adquirido gran interés en los últimos años, gracias a las diferentes técnicas de depuración de efluentes con las que cuenta, como la electrodeposición, la electrodiálisis, la electrólisis, la electrocoagulación y la electroflotación (Paredes & Brito, 2012). Específicamente la electrocoagulación, es la que mayor interés ha tenido y la que ha surgido en los últimos años como un método de tratamiento eficaz, que consiste en la eliminación de los contaminantes que se encuentran suspendidos en los efluentes a través de la aplicación de electricidad (Arango, 2005).

Entre las principales ventajas del tratamiento por electrocoagulación se encuentran una menor generación cantidad de lodos y más compactos, bajos niveles de sólidos disueltos y no requiere almacenamiento o uso de químicos. Además, debido a la factibilidad de su

implementación, la electrocoagulación es un método fácilmente replicable, gracias a que requiere equipos simples y sencillos de operar, logrando ser una gran alternativa en los procesos de tratamiento de aguas residuales (Arango, 2005; Restrepo *et al.*, 2006).

A pesar de que la electrocoagulación se considera una técnica relativamente nueva, su implementación se ha dado desde 1906, año en el que se otorgó la primera patente para la aplicación de esta tecnología. Sin embargo, su abordaje ha sido poco, debido a que esta técnica no se utilizó en gran medida desde sus inicios por los altos costos que significa su implementación en esos tiempos, teniendo que asumir un alto costo de energía y la necesidad de cambiar los electrodos, dejando como opción más viable los métodos convencionales que ya existían en su momento (Arango, 2005). Por otra parte, gracias a los avances tecnológicos que se han tenido en los últimos años, se han facilitado los estudios académicos acerca de esta técnica y aunque han sido pocos, mediante éstos ha sido posible postular la electrocoagulación como una técnica eficiente y económicamente viable.

Sin embargo, aunque se han desarrollado diferentes estudios académicos acerca de esta técnica, la electrocoagulación no ha pasado en gran medida desde el ámbito académico hacia su aplicación en la vida real. Por lo tanto, a pesar de la información que se tiene acerca de las ventajas de su aplicación mediante los estudios realizados en determinados casos, no se cuenta con información específica para su aplicabilidad en cada una de las industrias o del tipo de agua residual que se puede tratar de manera más eficiente.

Por esta razón, mediante el trabajo de investigación y la aplicación de esta tecnología en una empresa fabricante de pan de arroz, se pretende mostrar la aplicabilidad de éste método de tratamiento, considerando su eficiencia en la remoción de la DQO, DBO<sub>5</sub> y SST. Empleando una configuración específica de electrocoagulación, posicionándola como solución alternativa al problema del tratamiento de aguas residuales de una industria alimentaria. Además, de aportar investigación a las posibilidades de uso esta técnica en otras industrias, disminuyendo de esta manera los impactos que son causados en el medio ambiente por la poca implementación de métodos de tratamiento para las aguas residuales, que sean eficientes y de bajo costo.

## 7. Marco Referencial

### 7.1. Marco Conceptual

La *Electroquímica* es una tecnología que incorpora el estudio de la interacción y la correlación de los procesos químicos y eléctricos mediante el uso de reacciones de oxido-reducción, es decir, es una tecnología que hace uso de la electricidad para forzar reacciones químicas, lo cual permite aplicaciones industriales (Arango & Garcés, 2007a; Gilpavas *et al.*, 2008). Estas *Reacciones de oxido-reducción* son reacciones electroquímicas conocidas como reacciones Redox, que se basan en la transferencia de electrones entre un conjunto de especies químicas oxidantes y reductoras (Gilpavas *et al.*, 2008).

Dentro de las diferentes técnicas que conforman la electroquímica se encuentra la *Electrocoagulación*, proceso que utiliza la energía eléctrica para eliminar los contaminantes que se encuentran presentes en un medio acuoso. Esta técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas, con el fin de provocar reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes en el agua (Arango, 2005).

El *Agua residual* que es tratada en estos procesos, es entendida como el agua que contiene materiales contaminantes disueltos o en suspensión luego de ser usada en una comunidad o industria, la cual presenta diferentes parámetros fisicoquímicos y biológicos que determinan su calidad, entre los cuales se reconocen la *Temperatura*, que es el grado o nivel térmico al que se encuentra el agua e influye en las reacciones químicas y biológicas; la *Conductividad eléctrica*, que es la medida de la capacidad que tiene el agua para conducir la electricidad; el *pH*, que representa la intensidad ácida o básica que tiene una solución; los *Sólidos*, que indican la cantidad de materia sólida, suspendida o disuelta que se encuentra presente en el agua; la *demanda biológica de oxígeno* (DBO<sub>5</sub>), que es una estimación de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable, y la *demanda química de oxígeno* (DQO), que es la cantidad de oxígeno que se requiere para realizar la degradación química de los contaminantes presentes en el agua (Cruz *et al.*, 2014; Robles & López, 2017).

La implementación de este proceso se lleva a cabo en un *Electrocoagulador*, el cual es un equipo que cumple la función de reactor o celda electroquímica. Dentro de este equipo se encuentran dispuestos los electrodos, los cuales están conectados a una fuente de poder externa (Arango, 2005). Estos electrodos son generalmente de Aluminio y/o Hierro, que se desempeñan como *Ánodo*, siendo el electrodo de sacrificio donde se generan los iones metálicos; o como *Cátodo*, que es donde se liberan burbujas de hidrogeno gaseoso que permiten la flotación de las partículas coaguladas (Aguilar, 2015).

Por su parte, la fuente de poder externa desempeña un papel importante para el adecuado funcionamiento del equipo y por lo tanto del proceso en sí, debido a que permite regular los parámetros: *Corriente*, que representa la cantidad de flujo de electrones que es suministrada al sistema de electrocoagulación, lo que a su vez determina la cantidad de iones liberados por los respectivos electrodos (Restrepo *et al.*, 2006); *Tensión*, trabajo que debe hacer un agente externo para hacer fluir una corriente por una resistencia y que este siempre en equilibrio; en este sentido la *Resistencia eléctrica* representa la oposición del conductor al paso de la corriente eléctrica que por él circula (Barco *et al.*, 2012).

El proceso de electrocoagulación da lugar a dos procesos físicos diferentes, el primero es la *Sedimentación*, que es un proceso de clarificación del agua por acción de la gravedad a través de la precipitación de los contaminantes, y el segundo es la *Flotación*, que es un proceso para la separación de sólidos en el agua mediante la remoción de materias en suspensión (Robles & López, 2017).

## **7.2. Marco Teórico**

### **7.2.1. Agua residual en la industria alimentaria**

El crecimiento económico y social que se ha presentado en los últimos tiempos, ha traído consigo el incremento de las necesidades e intereses por parte de la sociedad, lo que ha ocasionado que la industria alimentaria deba afrontar retos cada vez más grandes en cuanto a lo que a la satisfacción de la demanda de productos y servicios se refiere. De acuerdo con esto, es preciso mencionar que

la industria alimentaria es una de las industrias con mayor demanda a nivel social, por lo cual, sus procesos de producción son cada vez más grandes, lo que implica un mayor uso del recurso hídrico, generando así mismo, la necesidad de implementar procesos óptimos para el tratamiento de los efluentes resultantes de la producción y de esta manera mitigar el impacto causado sobre los cuerpos hídricos (Arango & Garcés, 2007b).

El elevado consumo del recurso hídrico en los procesos productivos de la industria alimentaria, se debe a la necesidad de este para el desarrollo de las distintas fases y procesos que hacen parte de la producción de un producto. Dentro de las fases y procesos que generalmente integran los procesos productivos de la industria alimentaria se encuentran, el lavado de materias primas y equipos, los procesos térmicos de calentamiento y enfriamiento, procesos de cocción y mezcla, entre otros; de los cuales se generan diferentes tipos de aguas residual, las cuales se clasifican en agua sanitaria, agua de enfriamiento y caldera, y agua de procedimiento (Muñoz & Sánchez, 2018).

En el trabajo realizado por (Picazo, 1995) se menciona que en el sector agroalimentario, el cual está relacionado con la industria alimentaria por las actividades productivas que aborda; el agua residual se caracteriza por la presencia de una alta carga orgánica, un contenido moderado de sólidos y un bajo contenido o incluso inexistente de materiales tóxicos o peligrosos. Sin embargo, las características del agua residual pueden ser muy variadas, debido a que son directamente influenciadas por las materias primas y el tipo de proceso productivo que se aplique.

Las características del agua residual son determinas con base en los parámetros utilizados para la medición de la calidad de la misma, entre los cuales se encuentran los parámetros físicos, químicos y biológicos. Entre los parámetros físicos se destacan el color, la turbidez, la temperatura y la conductividad eléctrica; en los parámetros químicos destacan el pH, coloides, sólidos y metales pesados, y en los parámetros biológicos se encuentran la demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico, entre otros (Cruz *et al.*, 2014).

Según el estudio desarrollado por (Noukeu *et al.*, 2016) teniendo en cuenta 11 tipos de industrias alimenticias de Camerún, entre las características fisicoquímicas y biológicas que

generalmente se pueden presentar en las aguas residuales de la industria alimenticia, se tienen valores de pH que oscilan entre 4,07 y 7,63, la conductividad eléctrica varía entre 20,40  $\mu\text{s}/\text{cm}$  y 1487  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , la  $\text{DBO}_5$  oscila entre 20,33 mg/l y 25044,67 mg/l, y la DQO se encuentra entre 434,3 mg/l y 357.725 mg/l. Sin embargo, en el trabajo realizado por Restrepo (2006), en la que se tienen en cuenta la industria láctea, cárnica, sector azucarero y el procesamiento de aceites vegetales, se expone que en la industria alimentaria se pueden presentar valores de  $\text{DBO}_5$  de 1.700 mg/L hasta 50.000 mg/L y en cuanto a la DQO, los valores presentados varían entre 2.300 mg/L y 60.000mg/L.

Para el tratamiento de las aguas residuales se han implementado a lo largo del tiempo diferentes tecnologías, sin embargo, los métodos convencionales y más difundidos, son los biológicos y físico-químicos, en los que se utilizan microorganismos altamente sensibles y se realiza la aplicación de agentes químicos o polímeros sintéticos, respectivamente (Aguilar, 2015; Arango & Garcés, 2007a). Dentro de estos tratamientos, se encuentra la coagulación química, que consiste en la adición de agentes químicos al agua para generar la neutralización de las cargas de las partículas que se encuentran disueltas o suspendidas, dando como resultado una menor repulsión entre estas mismas y por lo tanto una mayor aglomeración que hace que dichas partículas se precipiten, es decir, mediante la adición de agentes químicos se logra la sedimentación de los contaminantes (Arango & Garcés, 2007a).

### **7.2.2. La electroquímica**

Es una tecnología que se ha presentado como el resultado de la conversión entre la energía eléctrica y la energía química, cuyos procesos se basan en dos principios; la transformación de la energía liberada por una reacción espontánea a energía eléctrica, o viceversa, donde la energía eléctrica es utilizada para generar una reacción química no espontánea (Chang, 2017).

En las reacciones que se presentan en la electroquímica, conocidas como reacciones redox, se genera un “intercambio entre los electrones de los electrodos y los iones o moléculas de la solución”, por lo que se requiere que haya una especie química que ceda electrones y otra que los reciba (Gilpavas *et al.*, 2008). La especie que cede los electrones de su estructura química al medio

se conoce como la reductora y esta queda con una carga mayor a la que tiene originalmente, y la especie que acepta los electrones se conoce como oxidante y esta queda con una carga menor (Gilpavas *et al.*, 2008).

La ecuación química general que representa las reacciones electroquímicas es la siguiente (Gilpavas *et al.*, 2008):



Donde,

O, es la especie oxidada

$ne^-$ , es el número de electrones transferidos por mol R,

es la especie reducida

Mediante esta ecuación es posible evidenciar que la especie reductora que cede los electrones se convierte en una especie oxidada y la especie oxidante, es decir, la que recibe los electrones, se convierte en una especie reducida (Gilpavas *et al.*, 2008).

Dentro de las reacciones electroquímicas, es necesario tener en cuenta la *Ley de Faraday*, mediante la cual se establece que la conductividad eléctrica de la disolución electrolítica se relaciona directamente con las reacciones que se producen en los electrodos, debido a que, la cantidad de un electrodo que se descompone en la celda electrolítica es directamente proporcional al paso de corriente eléctrica a través de la disolución en la celda (Hernández, 2011). En esta relación, se tienen en cuenta variables como la densidad de corriente, el peso molecular y la cantidad de electrodo disuelto, debido a que todas estas intervienen en la reacción química (Gilpavas *et al.*, 2008). De esta manera, para tener un valor de la carga que atraviesa la celda, se usa la constante de Faraday, la cual expresa la carga eléctrica de un mol de electrones, teniendo un valor de 96.470 coulomb/mol  $e^-$  (Chang, 2017).

La electroquímica es una tecnología que ha tenido mayor desarrollo y aplicación en los últimos años, teniendo sus principales aplicaciones en el tratamiento de efluentes líquidos, gaseosos y de suelos, para lo cual, las principales técnicas que se han implementado son la electrodialisis, la electroflotación, la electrocoagulación y la oxidación directa e indirecta, debido

a que estos métodos implican bajos costos y ventajas técnicas significativas (Gilpavas *et al.*, 2008; Rodrigo *et al.*, 2014)

### **7.2.3. Celdas electroquímicas**

Las celdas electroquímicas se dividen en galvánicas donde ocurren reacciones espontáneas y electrolíticas donde ocurren reacciones no espontáneas. Dentro de este segundo tipo de celda encontramos las celdas electrolíticas, también llamados reactores para electrocoagulación. Que se pueden clasificar en reactores de flujo continuo, que operan con un flujo de alimentación y un flujo de descarga de igual valor; se encuentran también los reactores de flujo discontinuo o tipo batch, que operan por cargas; en este sentido, se agrega la alimentación, seguidamente se lleva a cabo el proceso en un determinado tiempo y, una vez finalice, el reactor es descargado (Frontana *et al.*, 2014). Este último específicamente, cobra importancia en esta investigación puesto que se trabajó con este concepto, y es utilizado mayormente a escala laboratorio. La importancia de este tipo de reactores, es que permite el estudio de distintos procesos y parámetros de interés a ser controlados (Arango & Garcés, 2007a). Otro aspecto, es que los resultados obtenidos pueden ser empleados para realizar un escalado del proceso, como por ejemplo un piloto industrial.

### **7.2.4. La electrocoagulación**

Con el fin de reducir el uso de agentes químicos en los procesos de tratamiento, ha surgido como alternativa a la coagulación química el proceso de electrocoagulación, cuyo fundamento es por medio de reacciones redox lograr la formación de coagulante, con capacidad de desestabilizar partículas suspendidas, emulsionadas o disueltas presentes en el agua (Arango & Garcés, 2007a; Restrepo *et al.*, 2006; Roa *et al.*, 2014). Esto es posible, por la liberación de iones de placas metálicas que son electrodos (ánodo y cátodo), las cuales usualmente son de hierro o aluminio y están sumergidas en el agua (Restrepo *et al.*, 2006; Roa *et al.*, 2014; Valero *et al.*, 2011).

Por otra parte, la corrosión de las placas con la aplicación de energía eléctrica, suministra los iones  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{2+}$ , que actúan como coagulantes presentando un comportamiento similar a los coagulantes químicos (Restrepo *et al.*, 2006; Roa *et al.*, 2014; Valero *et al.*, 2011). Esto si se usa

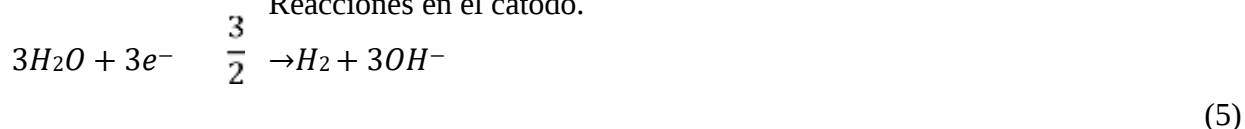
placas de aluminio o hierro como ánodo, sin embargo, puede ser empleados otros materiales (Robles & López, 2017). Debido a la oxidación del electrodo ánodo, se da la formación del coagulante como se aprecia en la Figura 1.

De acuerdo a lo anterior, las reacciones que se presentan en la celda electrolítica cuando se ha elegido el aluminio como ánodo, es la hidrolización de estos iones formando largas cadenas  $AlO-Al-OH$ , así como especies monoméricas y poliméricas (Aguilar, 2015; Deniz & Akarsu, 2018; Restrepo *et al.*, 2006). Contrario que, en el cátodo se da la reducción del agua (Aguilar, 2015; Deniz & Akarsu, 2018). Las reacciones redox varían, según los materiales elegidos para ánodo y cátodo.

Reacciones en el ánodo con electrodo de aluminio.



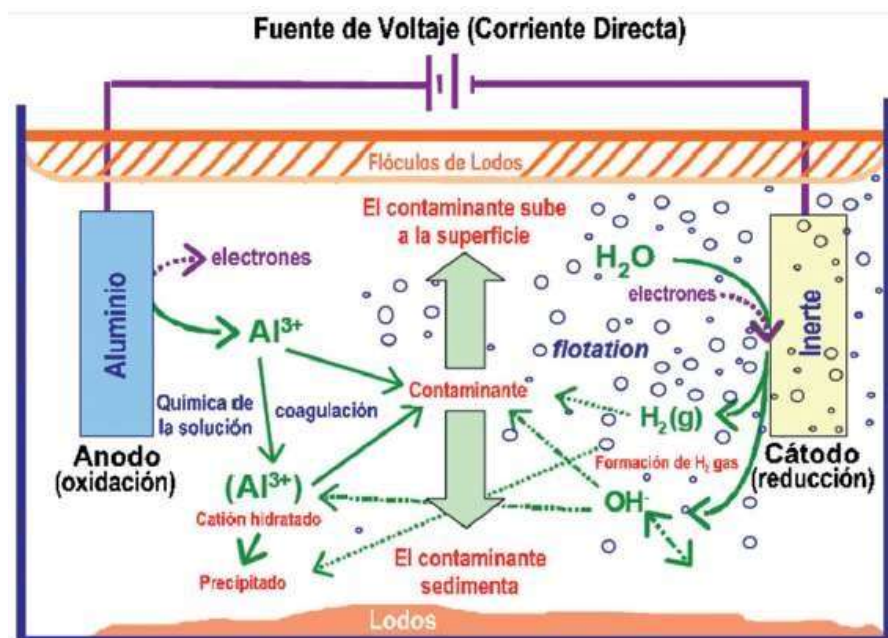
Reacciones en el cátodo.



Por otra parte, así como el material del electrodo, hay otros factores que tienen influencia sobre el proceso de electrocoagulación. El pH es uno de ellos, puede afectar la eficiencia de la corriente y remoción de un contaminante en un rango específico de pH, sin embargo, generalmente valores de pH cercanos a 7, ha presentado remociones aceptables (Restrepo *et al.*, 2006), o incluso en un rango óptimo 6 a 8, dependiendo de la naturaleza del contaminante (Roa *et al.*, 2014). En cuanto a la densidad de corriente, esta determina la cantidad de iones que se liberan de los electrodos, pero también se puede perder energía aumentando la temperatura del agua innecesariamente (Roa *et al.*, 2014), así un incremento en la densidad de corriente y el tiempo, pueden mejorar el tratamiento, pero también elevar los costos de operación (Restrepo *et al.*, 2006; Roa *et al.*, 2014). La separación o distancia entre electrodos, es determinante para

aspectos como la duración, sedimentación y eficiencia del tratamiento, siendo sugeridas distancias mayores a 1 cm (Arango & Garcés, 2007a).

Figura 1. Interacciones que toman lugar en la electrocoagulación



Nota: Procesos generales que pueden ocurrir como producto del proceso de electrocoagulación, en un reactor tipo tanque rectangular. Adaptado de Roa *et al.*, (2014).

### 7.2.5. Tipos de conexión

Los reactores electroquímicos operan bajo parámetros eléctricos, como corriente y voltaje que son suministrados por una fuente de energía externa, y afectados por la resistencia dentro de la celda. Los rangos de corriente y voltaje varían según el tipo de conexión eléctrica. Existen dos arreglos o tipos de conexión, el monopolar que usa una conexión eléctrica para cada electrodo, manteniendo así ambas caras del electrodo activas. Por otra parte, la conexión bipolar solo usa dos conexiones eléctricas, en este sentido, los electrodos extremos presentan un lado anódico y catódico respectivamente (Frontana *et al.*, 2014).

Según Mollah *et al.*, (2004) la conexión monopolar presenta algunas ventajas, como menor consumo de energía, mayor formación de coloides y su relación con la densidad de corriente.

Diferentes investigaciones han usado este tipo de conexión con resultados favorables, como se evidencia en (Davila *et al.*, 2011; López & Harnisth, 2016; Manchego & Zabala, 2019; Valero *et al.*, 2011).

#### **7.2.6. Tipos de reactores**

En el tratamiento de efluentes líquidos industriales se encuentran diseños de reactores acuerdo a la geometría de los mismos (Frontana *et al.*, 2014). Además, se debe considerar la procedencia, propiedades, características y contaminantes que presente un efluente determinado (Restrepo *et al.*, 2006).

**7.2.6.1. Reactor tipo filtro prensa.** Este reactor se constituye por dos marcos, el primero soporta el ánodo y el segundo soporta el cátodo, que al acoplarse forman un sello evitando así fugas del electrolito (Restrepo *et al.*, 2006). Además, es de construcción simple, presenta versatilidad en su conexión eléctrica y con la implementación de turbulencia puede incrementar la transferencia de masa (Frontana *et al.*, 2014).

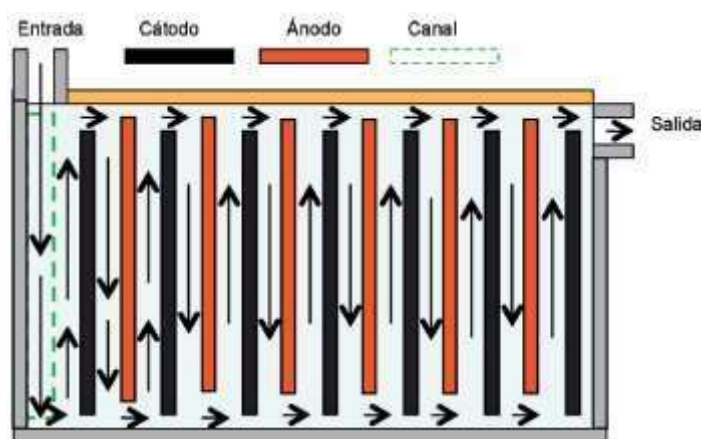
**7.2.6.2. Reactor de lecho fluidizado.** Emplean electrodos tridimensionales, se obtiene un aumento del área específica superficial que mejora la eficiencia, pero el electrodo de trabajo son partículas conductoras movilizadas por medios mecánicos o por el fluido de alimentación (Frontana *et al.*, 2014; Restrepo *et al.*, 2006).

**7.2.6.3 Reactor con electrodo giratorio.** Se basa en la rotación del electrodo cátodo ubicado en el centro de la celda, y el ánodo se encuentra fijo alrededor de este (Restrepo *et al.*, 2006). Su configuración puede ser por disco giratorio o cilindro giratorio, siendo el segundo empleado para el tratamiento de efluentes y conexión eléctrica en forma bipolar (Frontana *et al.*, 2014).

**7.2.6.4 Reactor tipo tanque rectangular.** Este tipo de reactor es el más usado en procesos industriales, su geometría rectangular permite que los electrodos sean colocados en forma de placas con disposición paralela verticalmente (Frontana *et al.*, 2014), a una separación constante

entre placa y placa. El diseño debe velar una distribución uniforme del electrolito de alimentación con la superficie de los electrodos como se aprecia en la Figura 2 (Frontana *et al.*, 2014). Esto para obtener la mayor área de electrodos de sacrificio disponible para las reacciones. Por otra parte, su versatilidad permite hacer uso de los tipos de conexión eléctrica monopolar (en paralelo) o bipolar (en serie) (Restrepo *et al.*, 2006), y además su operación puede ser en flujo continuo o discontinuo.

Figura 2. Celda electrolítica tipo tanque rectangular



Nota: Configuración de celda y disposición general de electrodos, tanto en operación de flujo continuo como flujo discontinuo. Adaptado de Frontana *et al.*, (2014).

#### 7.2.7. Eficiencias de remoción

Los sistemas de tratamiento convencionales de agua residual, se pueden encontrar rangos de eficiencia que se mueven entre 64-80% para DQO, 60-86% para DBO<sub>5</sub> y para 72-80% SST (Chuchón & Aybar, 2008; Peña *et al.*, 2015; Vásquez, 2013). En relación a los sistemas no convencionales de tipo electrocoagulador, se ha evidenciado porcentajes de remoción en un rango entre 61-95% para DQO, 67-82% para DBO<sub>5</sub> y para 76-98% SST (Arango & Garcés, 2007a; Davila *et al.*, 2011; López & Harnisth, 2016; Valero *et al.*, 2011). Por lo tanto, la determinación de la eficiencia, entendida como el porcentaje de remoción de un determinado contaminante u parámetros de agua; se expresa como la relación la diferencia de la concentración final e inicial, entre la concentración final de un contaminante, multiplicado por 100 (Chuchón & Aybar, 2008).

La eficiencia normalmente se calcula en función de los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub> y SST para aguas residuales domésticas y no domésticas; sin embargo, también es aplicable en un contaminante específico como, por ejemplo, un metal pesado.

## **7.2. Marco Legal**

Por medio de la Ley 9 de 1979 se dictan medidas sanitarias y de protección del ambiente. En el Art. 3 se establece un control sanitario de acuerdo con los usos del agua sin tener en cuenta ningún orden de prioridad. Además, en el Art. 10 establece que todo vertimiento de residuos líquidos debe someterse a requisitos y condiciones que establezca el Ministerio de Salud y en el Art. 15 establece la obligación de informar a la entidad delegada la calidad del afluente de los sistemas de tratamiento (Congreso de la República de Colombia, 1979).

En el Decreto 3930 de 2010 se establecen disposiciones para el ordenamiento del recurso hídrico en el Capítulo III; se clasifican los usos del agua y los criterios de calidad para la destinación de este recurso en los Capítulos IV y V; se describen las prohibiciones respecto a vertimientos en el Capítulo VI y se establecen los requerimientos para la obtención del permiso de vertimientos en el Capítulo VII (Presidencia de la República de Colombia, 2010).

Por medio de la Resolución 631 de 2015 se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a los cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. En el Art. 5 se establece el valor máximo permisible para temperatura. En el Art. 6 se establecen los valores máximos permisibles para los parámetros microbiológicos y en el Art. 12 se presentan los valores máximos permisibles para parámetros fisicoquímicos en aguas residuales no domésticas (ARnD), específicamente los que corresponden a las ARnD provenientes de actividades que hacen parte del sector de Alimentos y Bebidas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

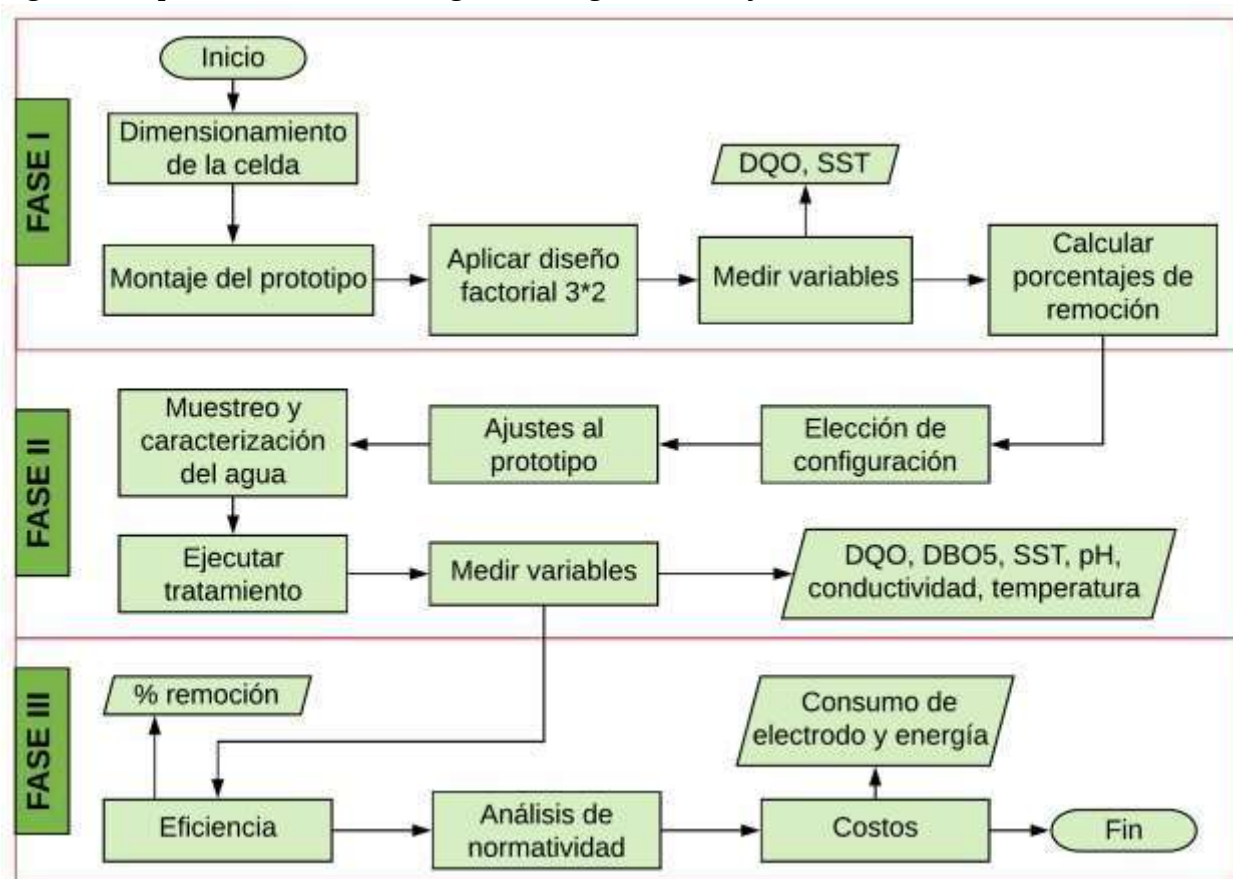
En el Decreto 050 de 2018 se establece, en el Art 3, se modifica el artículo 2.2.3.3.4.9 del Decreto 1076 de 2015, a través del cual se define que el interesado en obtener un permiso de vertimiento al suelo debe solicitar ante la autoridad ambiental una solicitud que contenga toda la

información mencionada en el artículo 2.2.3.3.5.2. En el Art 8, se modifican los requisitos del permiso de vertimientos y en el Art 9 se modifican los requerimientos de la Evaluación Ambiental del Vertimiento (Presidencia de la República de Colombia, 2018).

## 8. Metodología

Para este proyecto, se eligió una investigación de tipo experimental. Según Hernández *et al.*, (2010), contempla la manipulación de variables independientes, para observar sus resultados y analizar los efectos sobre variables dependientes. Esto con el fin determinar la eficiencia del electrocoagulador para el tratamiento de aguas residuales de una industria alimentaria. A continuación, en la Figura 3 se presenta la ruta metodológica propuesta en el desarrollo de la investigación.

Figura 3. Representación metodológica en diagrama de flujo



Nota: Diagrama de flujo que sigue la ruta metodológica propuesta en tres fases, por Poveda & Vela (2021).

## 8.1. Fase 1. Experimental

### 8.1.1. Montaje del prototipo

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, no se evidencia una sistematización para el diseño y operación en cuanto a reactores de electrocoagulación; debido a que los estudios realizados son mayormente a nivel laboratorio (Aguilar, 2015; Arango & Garcés, 2007a; Frontana *et al.*, 2014). Es por esto, que se eligió una celda electrolítica tipo tanque rectangular con operación en lote o tipo batch. Para el cual, se establecieron las dimensiones de largo, ancho y alto en 25, 15 y 20 cm respectivamente para un volumen total de 7,5L, y una capacidad de tratamiento de 5L.

Como mencionan Arango & Garcés (2007a), se presentan tres regiones de distribución de la celda. Estas zonas se distribuyen en la altura establecida; disponiendo de 12 cm en zona de reacción, y para las zonas flotación y sedimentación, 4 cm respectivamente. En cuanto al material y número de electrodos, se determinan a partir de la revisión bibliográfica. Siendo el aluminio y hierro con mejores resultados reportados (Arango & Garcés, 2007a; Davila *et al.*, 2011; López & Harnisth, 2016; Valero *et al.*, 2011). Por otra parte, el número de electrodos se determinará, de acuerdo a la ecuación 6 presentada por (Arango & Garcés, 2007a), evaluado la separación entre electrodos en dos valores. Otro aspecto, es el tipo de conexión entre electrodos, optando por un arreglo monopolar en paralelo.

Número de electrodos

$$= \frac{(\text{largo de la celda}) - (\text{dis. electrodos a cara lateral} * 2)}{(\text{separación entre electrodos} + \text{espesor de placa})} \quad ((6))$$

### 8.1.2. Muestreos y caracterización

Para realizar los tratamientos, fue necesario hacer una toma de muestras. De modo que, siguiendo los instructivos para la toma de muestras de aguas residuales industriales (ARI), dictado por el IDEAM (IDEAM, 2007). Se planteó el plan de muestreo descrito a continuación. Una vez identificado el punto de muestreo, se aplicó el método volumétrico manual, hasta completar un volumen de 4L. El muestreo consta de un periodo de 2,5 horas cada 30 minutos. En cuanto al

análisis físico-químico de las muestras de agua, los procedimientos metodológicos para estos, se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de métodos para el análisis físico-químico del agua residual

| Método de Análisis                                                                                | Procedimiento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Parámetro                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Reflujo cerrado<br>Métodos normalizados 5220 D y TP0086 IDEAM                                     | Se hizo precalentamiento del digestor, hasta alcanzar 150°C. En tubos de 16x100mm, se agregaron 2,5mL de la muestra (diluida), 1,5mL de solución de digestión y 3,5mL ácido sulfúrico con sulfato de plata añadido. Los tubos con las muestras y los blancos para digestión, se colocaron en el digestor, y se esperó la estabilización a 150°C, para iniciar la digestión por 2 horas. Posteriormente se retiraron y se dejaron enfriar en una gradilla. Luego, los tubos se introdujeron en el espectrofotómetro ajustado a 500nm y se registró la absorbancia. Por último, se multiplico el dato por - 810,15 determinado por (Rojas, 2018) y a su vez por el factor de dilución para obtener el valor de DQO de la muestra. | Demanda química de oxígeno                                       |
| Sólidos totales en suspensión secados a 103 – 105°C<br>Métodos normalizados 2540 D y TP0088 IDEAM | Previamente se realizó la rotulación y limpieza de las capsulas más papel filtro y fueron secadas en horno a 105°C por 20 minutos; posteriormente fueron registrados los datos de peso inicial. Luego en el montaje de Erlenmeyer con desprendimiento lateral, embudo Buchner y bomba de vacío; se inició el filtrado depositando de forma graduada 25ml de las muestras, una vez filtrada, con ayuda de pinzas se colocó nuevamente el papel filtro en la capsula para secado en horno durante 1h a 105°C. Por último, se registró el peso del conjunto capsula y papel filtro, con este peso final se determinan los SST de la muestra.                                                                                       | Sólidos totales suspendidos                                      |
| Electrométrico                                                                                    | Las sondas previamente eran lavadas con agua destilada. Posteriormente se introducían en los recipientes con las muestras, para la estabilización de los datos se esperaba alrededor de 2 minutos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Temperatura<br>Potencial de Hidrógeno<br>Conductividad eléctrica |

Nota: Ruta detallada de los procedimientos de laboratorio realizados para el análisis físico-químico del agua residual, por Poveda & Vela (2021).

### 8.1.3. Diseño factorial

Para la investigación se propuso un diseño experimental factorial 3x2. Este consiste en la manipulan dos o más variables independientes, evaluadas en dos o más nivel según el investigador (Hernández *et al.*, 2010). Las variables independientes corresponden a los aspectos de diseño o configuración de la celda electrolítica, que son corriente, separación entre placas y tiempo de retención, evaluados en 2 niveles, como se muestra en la Tabla 3, y la variable dependiente, será el comportamiento de la DQO y SST del agua residual. Los valores para los diferentes niveles, se encuentran dentro de un rango, de acuerdo a las conclusiones de la bibliografía (Aguilar, 2015; Arango & Garcés, 2007a; Deniz & Akarsu, 2018; Frontana *et al.*, 2014; Gilpavas *et al.*, 2017; López & Harnisth, 2016; Valero *et al.*, 2011).

Tabla 3. Factores y niveles del diseño factorial 3x2

| Factores                    | Unidad           | Nivel 1 | Nivel 2 |
|-----------------------------|------------------|---------|---------|
| Corriente                   | Amperio (A)      | 2       | 3       |
| Separación entre electrodos | Milímetros (mm)  | 15      | 25      |
| Tiempo de retención         | Tiempo (minutos) | 20      | 40      |

Nota: Los niveles corresponden a la variación en los valores de los factores o variables independientes, por Poveda & Vela (2021).

**8.1.3.1 Hipótesis nula.**  $H_{01}$ , las configuraciones de corriente y separación entre electrodos no afectan de manera directa el comportamiento de la DQO y SST.

$H_{02}$ , las configuraciones de corriente y tiempo no afectan de manera directa el comportamiento de la DQO y SST.

**8.1.3.2 Hipótesis alternativa.**  $H_{a1}$ , las configuraciones de corriente y separación entre electrodos afectan de manera directa el comportamiento de la DQO y SST.

$H_{a2}$ , las configuraciones de corriente y tiempo afectan de manera directa el comportamiento de la DQO y SST.

## **8.2. Fase 2. Configuración Óptima**

### **8.2.1. Análisis estadístico**

Para evaluar el comportamiento de las configuraciones de celda y las hipótesis planteadas, se realizó un análisis multivariado de varianza MANOVA mediante el software IBM SPSS Statistics. Los datos ingresados para la prueba multivariante fueron los resultados obtenidos a partir del diseño experimental. Las variables independientes DQO y SST, se expresaron en términos de porcentaje de remoción determinados con la ecuación (7).

### **8.2.2. Ajustes en la celda electrolítica**

El proceso de EC da lugar a la formación de espumas sobrenadantes y/o lodos sedimentables. En relación a estos aspectos y comportamiento en general de la estructura de la celda, se puede evidenciar y realizar ajustes convenientes en la celda electrolítica.

### **8.2.3. Muestreo y caracterización final**

Se realizó una muestra compuesta, tal y como se describe en el apartado 8.1.2, para efectuar el tratamiento elegido; con la particularidad de que en esta ocasión se caracterizó el agua de acuerdo a los parámetros estipulados en la pregunta problema, demanda química de oxígeno DQO, demanda bioquímica de oxígeno DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos totales SST, pH, temperatura y conductividad eléctrica. El análisis de la DBO<sub>5</sub>, fue enviada a un laboratorio externo certificado por el IDEAM para este parámetro.

### **8.2.4. Ejecución del tratamiento**

El tratamiento con la configuración resultante del diseño experimental, se aplicó nuevamente y agregando el análisis de DBO<sub>5</sub>. Para los parámetros DQO y SST se realizaron tres replicas, con los métodos descritos en la Tabla 2.

### **8.3. Fase 3. Eficiencia del Tratamiento**

La evaluación de la eficiencia del reactor y tratamiento resultante de la fase II; contemplo el porcentaje de remoción de dicho tratamiento, análisis comparativo basados en la normatividad vigente de aguas residuales, consumo del electrodo y consumo de energía de la celda electroquímica.

#### **8.3.1. Determinación de la eficiencia de remoción**

La eficiencia de remoción de concentración en parámetros físico-químicos, en términos de porcentajes; se determinó por medio de la ecuación (9), donde C es la concentración del parámetro a analizar (Chuchón & Aybar, 2008). Este término es importante, pues ayuda a escoger las configuraciones óptimas de la celda y a sustentar los resultados de la misma (Arango & Garcés, 2007a; Deniz & Akarsu, 2018; Valero *et al.*, 2011).

$$\%Remoción = \frac{(C_{afluente} - C_{efluente})}{C_{afluente}} * 100 \quad (7)$$

#### **8.3.2. Análisis de normatividad**

En cuanto al cumplimiento de la normatividad, se analizaron los resultados obtenidos en la configuración óptima, producto del diseño experimental. Comparando los valores límites máximos permisibles, para el sector de elaboración de productos alimenticios, dictado por la Resolución 631 de 2015 en su artículo 12.

#### **8.3.3. Costos operativos**

El principal costo de un tratamiento de electrocoagulación, se relaciona con el consumo de energía eléctrica, que este demande. Este consumo de energía se calcula por medio de la ecuación (8), para hallar el consumo de energía ( $C_{energía}$ ), se considera el voltaje (U), la corriente (i), tiempo de

tratamiento (t) y el volumen tratado (v) (Deniz & Akarsu, 2018). Junto con el consumo de energía, otra característica de eficiencia es el desgaste de los electrodos. Puesto que estos actúan como reactivo en el tratamiento (Aguilar, 2015). Este consumo del electrodo ( $C_{electrodo}$ ), se determina con la ecuación (9), y las variables son la corriente (i), tiempo de tratamiento en segundos (t), peso molecular del electrodo (M), número de electrones (z), número de Faraday (F) y el volumen tratado (v) (Deniz & Akarsu, 2018).

$$C_{energía} = \frac{U * i * t}{v} \quad (8)$$

$$C_{electrodo} = \frac{i * t * M}{z * F * v} \quad (9)$$

Una vez determinados los consumos operativos, la cuantificación de los costos operativos (CO) se basa en el precio de mercado para la energía eléctrica ( $\alpha$ ) y el material de electrodo ( $\beta$ ), ver ecuación 10 (Deniz & Akarsu, 2018).

$$CO = \alpha * C_{energía} + \beta * C_{electrodo} \quad (10)$$

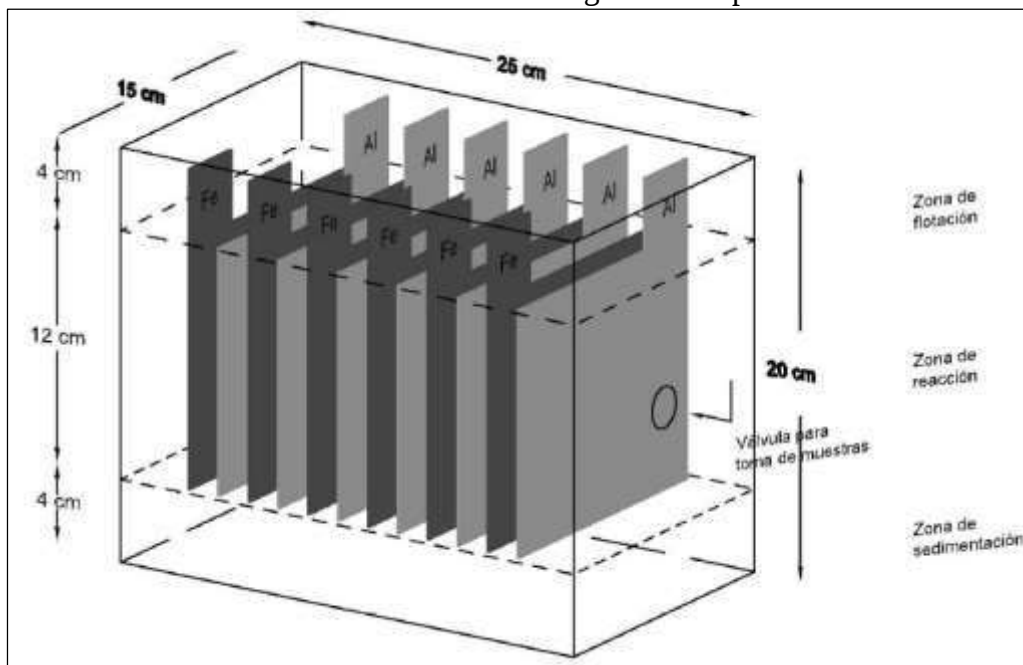
## 9. Resultados y Discusión

### 9.1. Resultados Fase 1. Experimental

#### 9.1.1. Construcción del prototipo

La construcción de la celda de electrocoagulación se realizó con base en el dimensionamiento inicial planteado en la metodología, el cual fue desarrollado teniendo en cuenta la información reportada en la literatura. Este dimensionamiento se evidencia en la Figura 4, en el que se definió la implementación de electrodos de hierro y aluminio como ánodo y cátodo respectivamente, debido a que según (Arango, 2005) es un arreglo adecuado para un estudio experimental; dentro de una celda tipo Batch con unas medidas de 20 cm de alto, 25 cm de largo y 15 cm de ancho; además se definieron las zonas de flotación, reacción y sedimentación.

Figura 4. Dimensionamiento de la celda de electrocoagulación experimental



Nota: Celda de electrocoagulación experimental, con definición de las zonas de flotación, reacción y sedimentación respectivamente, por Poveda & Vela (2021).

Por otra parte, la cantidad de electrodos a utilizar se determinó con base en el factor de separación entre electrodos. De esta manera, teniendo en cuenta que según (Arango & Garcés, 2007a), para separaciones entre electrodos inferiores a 10 mm el proceso se hace prolongado, se definieron valores de 15 y 25 milímetros, con los que de acuerdo a la ecuación (8), el número de electrodos a utilizar se determinó de la siguiente manera:

$$\text{Número de electrodos}_{15} = \frac{(250\text{mm}) - (25\text{mm} * 2)}{(15\text{mm} + 1,5\text{mm})} = 12,121 \quad 5(6)$$

$$\text{Número de electrodos}_{15} \cong 12 \quad ((6))$$

$$\text{Número de electrodos}_{25} = \frac{(250\text{mm}) - (25\text{mm} * 2)}{(25\text{mm} + 1,5\text{mm})} = 7,547 \quad ((6))$$

$$\text{Número de electrodos}_{25} \cong 8 \quad ((6))$$

De acuerdo con lo anterior, se determinó que para llevar a cabo el proceso de electrocoagulación teniendo en cuenta un factor de separación entre electrodos de 15mm, se necesitan 12 electrodos en la celda. De igual manera, para el factor de separación de 25mm se aplicó el mismo procedimiento matemático, con el que se determinó que la cantidad de electrodos necesarios es 8.

### **9.1.2. Muestreos y caracterización del diseño experimental**

El proceso de muestreo se realizó con el agua residual que ingresa a la trampa de grasas de la fábrica de pan de arroz. Para este proceso se llevaron a cabo dos diferentes muestreos los días 16 de septiembre y 16 de octubre del año 2020 respectivamente. Por medio de los cuales, se obtuvieron dos muestras compuestas, con las que se llevó a cabo la caracterización del agua residual de la fábrica de pan de arroz. Los valores obtenidos de cada uno de los parámetros analizados en la caracterización de las muestras compuestas, se evidencian en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados caracterización de muestras compuestas

| Muestra     | Fecha      | Temperatura | pH             | Conductividad | SST     | DQO                 |
|-------------|------------|-------------|----------------|---------------|---------|---------------------|
|             |            | °C          | Unidades<br>pH | μS/cm         | mg/L    | mgO <sub>2</sub> /L |
| Compuesta 1 | 16/09/2020 | 19,2        | 4,4            | 1.776         | 1.792,5 | 8.887,3             |
| Compuesta 2 | 16/10/2020 | 18,3        | 4,2            | 2.089,5       | 2.082,4 | 6.505,5             |

Nota: Caracterización de las muestras dos muestras compuestas de agua residual obtenidas de la fábrica de pan de arroz, por Poveda & Vela (2021).

Como se muestra en la Tabla 4, según el análisis realizado al agua residual de la fábrica, esta presentó durante el período de estudio, una temperatura mínima de 18,3°C; el valor del pH se situó entre 4,2 y 4,4, lo que indica que el agua residual de esta fábrica es ácida; esto se explica debido a la presencia de residuos ácidos grasos del queso, harina de pan, levadura y arroz en el efluente, los cuales son productos utilizados en el proceso de producción y cuyo pH es ácido. Estos resultados concuerdan con la caracterización realizada por (Noukeu *et al.*, 2016) a los efluentes de las fábricas CAMLAIT y OK FOOD, donde se obtuvieron valores de pH de 4,53 y 4,14 respectivamente; las cuales son fábricas de lácteos y galletas, cuyos efluentes se componen de productos similares a los presentes en el agua residual tratada en esta investigación.

Además, se presentó una conductividad mínima de 1.776 μS/cm, lo que representa una alta conductividad eléctrica (CE) en comparación con los valores 1.097,67 μS/cm y 1.068,33 μS/cm obtenidos por (Noukeu *et al.*, 2016) en los efluentes de las fábricas CAMLAIT y OK FOOD respectivamente; aunque, para Aguilar, 2015, es una CE aceptable según los valores trabajados en su investigación. Estos niveles de CE se deben a que este parámetro depende directamente de la cantidad de sólidos y minerales disueltos en el agua, de esta manera, el elevado contenido de residuos sólidos orgánicos y sales procedentes del proceso productivo del pan de arroz, explica los altos niveles de CE del agua residual de esta fábrica.

Por otra parte, la demanda química de oxígeno (DQO), tuvo un valor mínimo de 6.505,5 mgO<sub>2</sub>/L, esto se debe a que la DQO es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica y oxidable presente en el agua residual, por lo que se entiende que representa la contaminación orgánica presente en el efluente (Iannacone & Molano, 2018). Por lo tanto, el alto valor de DQO está dado por la gran cantidad de materia orgánica presente en el efluente proveniente de las diferentes etapas del proceso de producción. Así mismo, el agua residual presentó una cantidad mínima de sólidos suspendidos totales (SST) de 1.792,5 mg/L, lo cual como se mencionó anteriormente, es debido a la presencia de diferentes residuos sólidos procedentes del proceso productivo.

### 9.1.3. Aplicación del diseño experimental

Para cada una de las muestras compuestas se realizaron 4 tratamientos, para un total de 8 tratamientos resultantes del diseño factorial 3\*2 planteado, dichos tratamientos tuvieron las condiciones operativas que se muestran en la Tabla 5. Además, en la Figura 5, se aprecia la puesta en marcha de los tratamientos C y H, respectivamente.

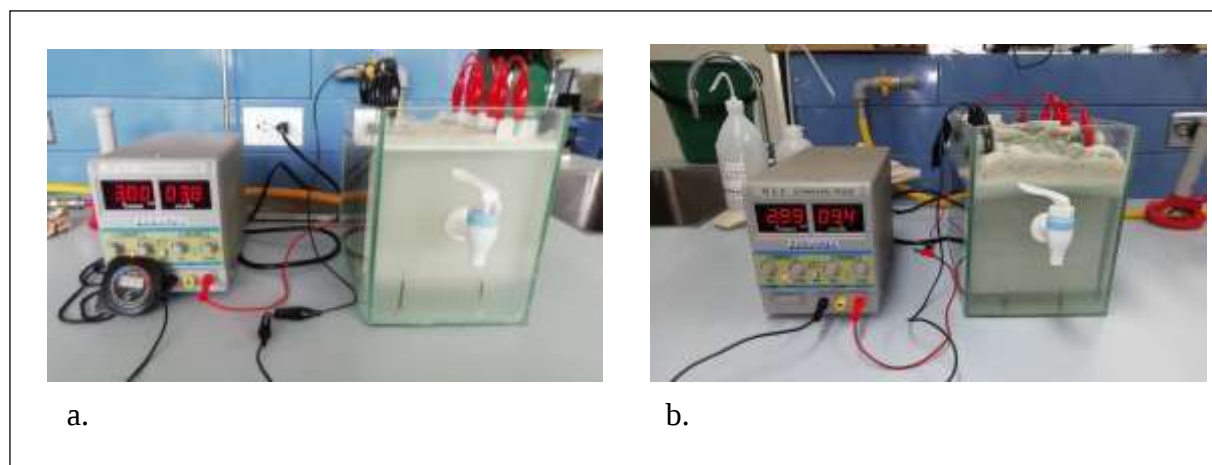
Tabla 5. Descripción de las condiciones operativas para los tratamientos

| Tratamiento | Variables     |                               |              |
|-------------|---------------|-------------------------------|--------------|
|             | Corriente (A) | Separación de electrodos (mm) | Tiempo (min) |
| A           | 2             | 15                            | 20           |
| B           | 2             | 15                            | 40           |
| C           | 3             | 15                            | 20           |
| D           | 3             | 15                            | 40           |
| E           | 2             | 25                            | 20           |
| F           | 2             | 25                            | 40           |
| G           | 3             | 25                            | 20           |
| H           | 3             | 25                            | 40           |

Nota: Descripción de las condiciones operativas definidas para cada uno de los ocho tratamientos ejecutados, por Poveda & Vela (2021).

Estas condiciones operativas, son el resultado de evaluar cada una de las variables independientes entre sí, es decir, teniendo en cuenta la aplicación de una determinada cantidad de corriente, con una separación entre electrodos específica durante un período de tiempo definido. Por esta razón, cada uno de los tratamientos definidos es diferente, permitiendo determinar su influencia en eficiencia del proceso para las variables dependientes.

Figura 5. Ejecución de tratamientos del diseño factorial



Nota: **a.** Tratamiento C (3 A, 15 mm, 20 min) realizado el 16 de septiembre del año 2020. **b.** Tratamiento H (3 A, 25 mm, 40 min) realizado el 16 de octubre del año 2020, por Poveda & Vela (2021).

Después de la ejecución de cada uno de los tratamientos planteados, se obtuvieron los resultados que se aprecian en la Tabla 6, la cual contiene los valores de cada parámetro analizado en relación con el tratamiento implementado. Además, es preciso mencionar que con la muestra Compuesta 1 se ejecutaron los tratamientos A, B, C, D y con la muestra Compuesta 2 se llevaron a cabo los tratamientos E, F, G y H, respectivamente.

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 6, en la Figura 6 y Figura 7 se expresan los porcentajes de remoción de DQO y SST obtenidos con cada uno de los tratamientos. Así mismo, la Figura 8 se comparan los resultados en cuanto a los parámetros de pH, temperatura y conductividad eléctrica.

Tabla 6. Datos promedio obtenidos de la aplicación del diseño factorial 3\*2

| Muestra     | Temperatura | pH             | Conductividad | SST     | DQO                 |
|-------------|-------------|----------------|---------------|---------|---------------------|
|             | °C          | Unidades<br>pH | µS/cm         | mg/L    | mgO <sub>2</sub> /L |
| Compuesta 1 | 19,2        | 4,4            | 1.776         | 1.792,5 | 8.887,3             |
| Tr A        | 26,7        | 5,4            | 319           | 320     | 2.005,1             |
| Tr B        | 27,3        | 6,9            | 257,5         | 227,5   | 1.118               |
| Tr C        | 27,4        | 5,2            | 307,5         | 337,5   | 1.806,6             |
| Tr D        | 26,9        | 5,1            | 293           | 290     | 1.486,6             |
| Compuesta 2 | 18,3        | 4,2            | 2.089,5       | 2.082,5 | 6.505,5             |
| Tr E        | 23,4        | 6,7            | 385,5         | 505     | 1.620,3             |
| Tr F        | 25,4        | 7,8            | 233           | 327,5   | 1.911,9             |
| Tr G        | 25,4        | 6,9            | 377,5         | 422,5   | 2.009,2             |
| Tr H        | 25,95       | 7,4            | 288           | 322,5   | 1.685               |

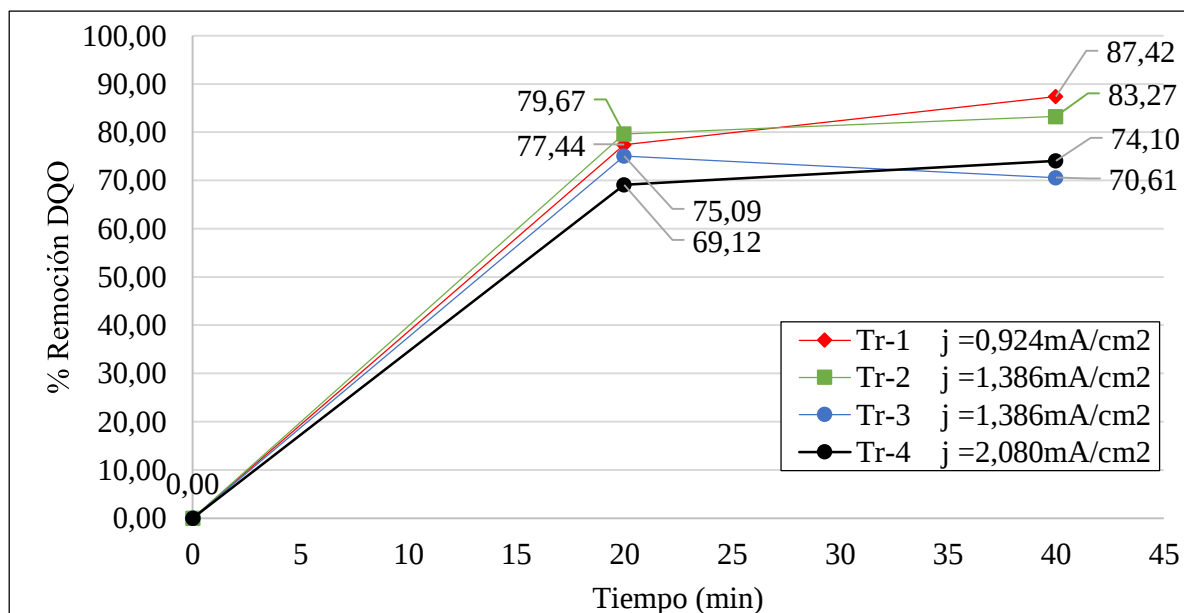
Nota: Datos obtenidos de la aplicación del diseño factorial para los parámetros fisicoquímicos evaluados, por Poveda & Vela (2021).

La Figura 6 muestra una tendencia general de incremento del porcentaje de remoción de DQO a través del tiempo, donde el mejor resultado de remoción obtenido fue de 87,42% en el Tr B, y el menor porcentaje de remoción fue de 69,12% en el Tr G; sin embargo, el menor porcentaje de remoción de DQO obtenido en esta fase tiene un buen nivel en comparación con los resultados obtenidos por otras investigaciones, como en la realizada por (Gilpavas *et al.*, 2008), donde el porcentaje de remoción de DQO obtenido fue de 50,67%. El aumento en los porcentajes de remoción se debe según López & Harnisth (2016), al aumento de las cargas positivas que son liberadas en el medio acuoso como producto de la oxidación del Al, las cuales son iones metálicos que tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que se han desestabilizados durante el proceso. Además, mediante los resultados obtenidos es posible determinar que, al aumentar la distancia entre los electrodos y el voltaje aplicado a la celda, se presentó una disminución en los porcentajes de remoción de DQO, lo cual difiere de los resultados obtenidos por Arango & Garcés (2007a) donde se evidenció una tendencia de aumento en el

porcentaje de remoción de la DQO al aumentar la densidad de corriente y la distancia entre electrodos.

Por otra parte, el Tr F, presentó un comportamiento disímil a los demás tratamientos, donde se evidencia una disminución en el porcentaje de remoción, lo que se traduce en un aumento de la DQO durante el tratamiento. Aunque según Gilpavas *et al.*, (2008), la disminución de la eficiencia en los procesos de electrocoagulación puede deberse a la formación de una placa de óxido en el cátodo, sin embargo, esto no explica el aumento de la DQO durante un mismo tratamiento después de transcurridos 20 minutos más de tratamiento, por consiguiente, este valor atípico puede deberse a discrepancias u errores presentados en algún punto durante el proceso de análisis de DQO, en la adición de reactivos o en la toma de la muestra.

Figura 6. Porcentajes de remoción de DQO de acuerdo a las muestras compuestas



Nota: Los ocho tratamientos del diseño factorial se agrupan en cuatro tratamientos, de la siguiente manera Tr-1(Tr A 20 min-Tr B 40min), Tr-2(Tr C 20min-Tr D 40min), Tr-3(Tr E 20min-Tr F 40min) y Tr-4(Tr G 20 min-Tr H 40min), por Poveda & Vela (2021).

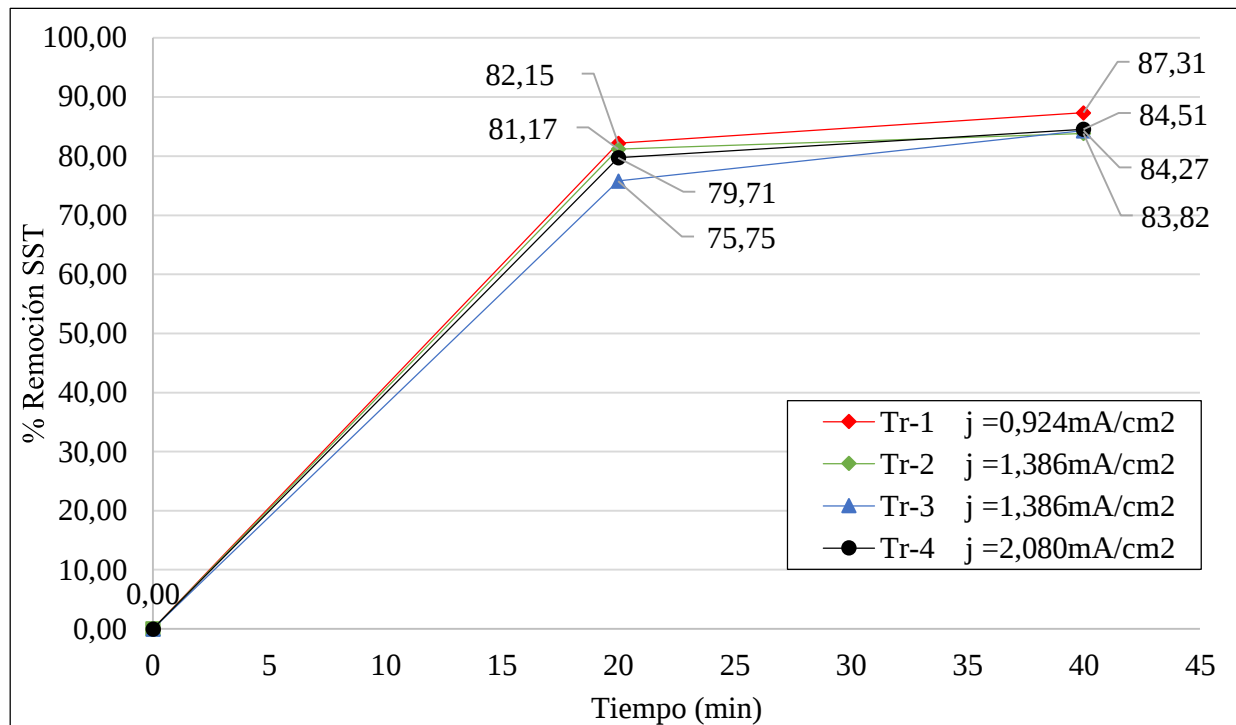
En la Figura 7 se evidencia un comportamiento similar en los 8 tratamientos realizados respecto al porcentaje de remoción de SST, los cuales presentan un aumento en el porcentaje de

remoción a través del tiempo, sin embargo, el cambio significativo se evidenció en los 4 tratamientos ejecutados durante los primeros 20 minutos. Posterior a esto, el porcentaje de remoción aumentó con el paso del tiempo en los tratamientos a 40 minutos, aunque los cambios no presentan una gran variación en comparación con los primeros 20 min. De esta manera, el tratamiento 1 fue el que presentó los mejores resultados en términos de porcentaje de remoción, con un valor de 87,42% a los 40 minutos, así mismo, el porcentaje de remoción más bajo presentado fue el del tratamiento 3 a los 20 minutos, con un valor de 75,75%, sin embargo, a pesar de ser el más bajo obtenido en este estudio, este representa un buen porcentaje de remoción de SST en comparación con las eficiencias de remoción obtenidas en otras investigaciones, como el estudio realizado por López & Harnisth (2016), en el cual la eficiencia más alta de remoción de sólidos suspendidos obtenida fue de 76,81%.

El aumento de los porcentajes de remoción se traduce en una reducción de la cantidad de SST; según López & Harnisth (2016), esto se debe a que los sólidos que se encuentran suspendidos en el agua alcanzan la densidad adecuada para su floculación, pudiendo precipitarse en la celda y sedimentarse en la zona inferior o a través de la flotación almacenarse en la zona superior. Este proceso de floculación se da luego de la formación de hidróxidos de hierro en el ánodo, generando la aglomeración de los coloides, especialmente los cargados negativamente, además de otras partículas contaminantes que interactúan con dichos aglomerados, las cuales son removidas a través de atracciones electrostáticas (Restrepo *et al.*, 2006).

De acuerdo con la Figura 8, es posible afirmar que el comportamiento del pH en todos los tratamientos ejecutados es similar, debido a que en cada uno de los tratamientos el pH aumentó respecto al valor inicial de pH de la muestra compuesta. Además, se evidenció que el pH aumenta con el paso del tiempo durante el tratamiento, como se aprecia en los tratamientos A y B, siendo estos a los 20 y 40 minutos de tratamiento respectivamente, en donde se presentó un pH de 5,35 en el tratamiento A y un pH de 6,9 en el tratamiento B. Según Arango (2005), el incremento del pH en el proceso de electrocoagulación a condiciones ácidos, se genera durante la electrolisis y ha sido atribuido a la reacción del hidrógeno en el cátodo, es decir que, el pH incrementa cuando el hidrógeno es liberado en el cátodo, aumentando de esta manera los puentes de hidrógeno en el agua residual.

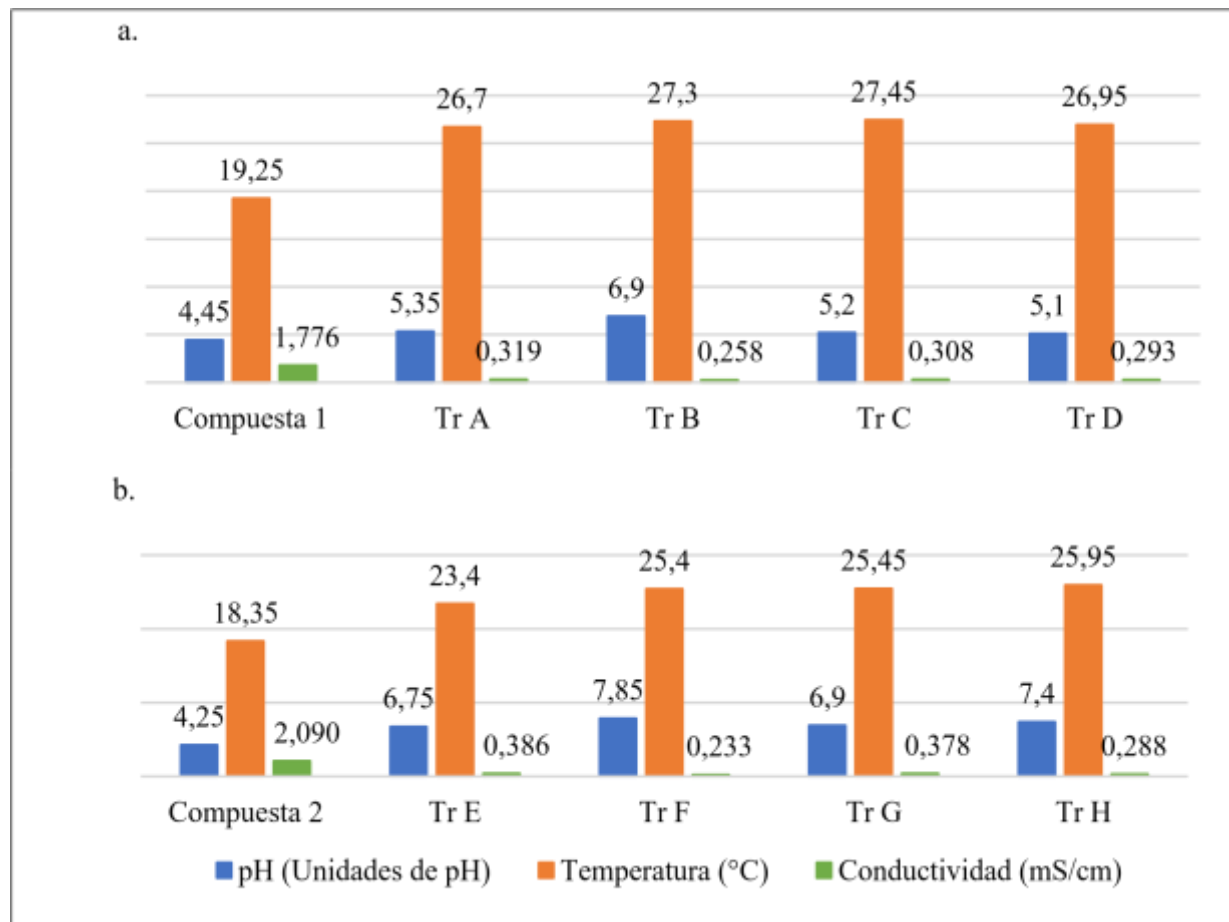
Figura 7. Porcentajes de remoción de SST de acuerdo a las muestras compuestas



Nota: Los ocho tratamientos del diseño factorial se agrupan en cuatro tratamientos, de la siguiente manera Tr-1(Tr A 20 min-Tr E 40 min), Tr-2(Tr B 20 min-Tr F 40min), Tr-3(Tr C 20 min-Tr G 40 min) y Tr-4(Tr D 20min-Tr H 40 min), por Poveda & Vela (2021).

Así mismo, la temperatura presentó un comportamiento similar, con valores crecientes en cada uno de los tratamientos respecto a la muestra compuesta, como en el caso de la Compuesta 1, la cual tuvo un valor inicial de  $19,25^{\circ}\text{C}$  y posteriormente presentó valores de  $26,7^{\circ}\text{C}$  y  $27,3^{\circ}\text{C}$  en los tratamientos A y B respectivamente a los 20 y 40 minutos. Según Robles & López (2017), este aumento en la temperatura se debe a la relación directamente proporcional existente entre la temperatura y la intensidad de corriente aplicada, debido a las reacciones químicas producidas por el paso de la corriente eléctrica hacia el agua residual inducida a través de los electrodos.

Figura 8. Tratamientos ejecutados a las muestras compuestas



Nota: **a.** Valores de temperatura, pH y conductividad eléctrica de los tratamientos realizados con la muestra compuesta 1. **b.** Valores de temperatura, pH y conductividad eléctrica de los tratamientos realizados con la muestra compuesta 2, por Poveda & Vela (2021).

Por otra parte, la conductividad eléctrica tuvo un comportamiento diferente, presentando valores decrecientes en los tratamientos respecto a las muestras compuestas, como se evidencia en la Compuesta 1, cuyo valor inicial fue 1,77mS/cm y posteriormente fue de 0,319 mS/cm y 0,258 mS/cm en los tratamientos A y B respectivamente. Este comportamiento con tendencia decreciente en los tratamientos con el paso del tiempo, también se presentó en el trabajo realizado por Hernández (2011), quien explica que, durante la electrocoagulación en la planta piloto, utilizando placas intermedias, la conductividad disminuyó en todos los ensayos. De la misma manera, Gilpavas *et al.*, (2008) reportó en su investigación una disminución considerable de la conductividad en todos los tratamientos, argumentando que esto es debido a la gran proximidad

entre iones que se genera cuando una solución está muy concentrada o muy contaminada, lo que ocasiona la inhibición de su capacidad de transmitir corriente; esta afirmación se puede corroborar, teniendo en cuenta que mediante la electrocoagulación, se genera la concentración de las diferentes partículas sólidas presentes en el agua residual en la zona superior e inferior de la celda electroquímica a través de los fenómenos de precipitación y flotación de los flóculos formados durante el proceso, lo que ocasiona que la presencia de iones en la zona intermedia de la celda, es decir, en la zona de reacción, se reduzca con el paso del tiempo, disminuyendo así mismo la conductividad en el sistema.

## 9.2. Resultados Fase 2. Configuración Óptima

### 9.2.1. Análisis estadístico MANOVA en IBM SPSS

La prueba multivariante resultante del análisis MANOVA, permitió evaluar el efecto individual y la interacción entre los factores corriente, separación entre electrodos y tiempo, sobre las variables de respuesta DQO y SST. Como se puede observar en la Tabla 7, la corriente no presentó diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) en la remoción de DQO y SST. Sin embargo, la separación entre electrodos y tiempo presentaron efectos individuales significativos ( $p < 0,05$ ) en cuanto a la remoción de DQO y SST.

Además, en la Tabla 7 aprecia que, el efecto de la interacción corriente y separación entre electrodos es significativo ( $p < 0,05$ ) de manera que se acepta la hipótesis alternativa  $Ha_1$  y se rechaza la hipótesis nula  $Ho_1$ . Por otra parte, la interacción corriente y tiempo indica que no hay diferencia significativa ( $p > 0,05$ ) sobre las variables de respuesta, como consecuencia se acepta la hipótesis nula  $Ho_2$  y se rechaza la hipótesis alternativa  $Ha_2$ .

El efecto de la corriente de manera individual no resultó significativo sobre la remoción de las variables de respuesta, esto pudo ser causa de la poca variación de la misma, es decir de 2A a 3A. Sin embargo, al combinarse con la separación entre electrodos sí hay diferencias, posiblemente se debe a que las dos variables influyen en la densidad de corriente  $j$ .

Tabla 7. Prueba multivariante MANOVA del diseño factorial

| Efecto        |                    | Valor     | F                      | gl de hipótesis | gl de error | Sig. |
|---------------|--------------------|-----------|------------------------|-----------------|-------------|------|
| Intersección  | Traza de Pillai    | 1,000     | 37927,780 <sup>b</sup> | 2,000           | 7,000       | ,000 |
|               | Lambda de Wilks    | ,000      | 37927,780 <sup>b</sup> | 2,000           | 7,000       | ,000 |
|               | Traza de Hotelling | 10836,509 | 37927,780 <sup>b</sup> | 2,000           | 7,000       | ,000 |
|               | Raíz mayor de Roy  | 10836,509 | 37927,780 <sup>b</sup> | 2,000           | 7,000       | ,000 |
| Corriente     | Traza de Pillai    | ,018      | ,064 <sup>b</sup>      | 2,000           | 7,000       | ,939 |
|               | Lambda de Wilks    | ,982      | ,064 <sup>b</sup>      | 2,000           | 7,000       | ,939 |
|               | Traza de Hotelling | ,018      | ,064 <sup>b</sup>      | 2,000           | 7,000       | ,939 |
|               | Raíz mayor de Roy  | ,018      | ,064 <sup>b</sup>      | 2,000           | 7,000       | ,939 |
| SepElectrodos | Traza de Pillai    | ,823      | 16,295 <sup>b</sup>    | 2,000           | 7,000       | ,002 |
|               | Lambda de Wilks    | ,177      | 16,295 <sup>b</sup>    | 2,000           | 7,000       | ,002 |
|               | Traza de Hotelling | 4,656     | 16,295 <sup>b</sup>    | 2,000           | 7,000       | ,002 |
|               | Raíz mayor de Roy  | 4,656     | 16,295 <sup>b</sup>    | 2,000           | 7,000       | ,002 |
| Tiempo        | Traza de Pillai    | ,913      | 36,621 <sup>b</sup>    | 2,000           | 7,000       | ,000 |
|               | Lambda de Wilks    | ,087      | 36,621 <sup>b</sup>    | 2,000           | 7,000       | ,000 |
|               | Traza de Hotelling | 10,463    | 36,621 <sup>b</sup>    | 2,000           | 7,000       | ,000 |
|               | Raíz mayor de Roy  | 10,463    | 36,621 <sup>b</sup>    | 2,000           | 7,000       | ,000 |
| Corriente     | * Traza de Pillai  | ,600      | 5,255 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,040 |
| SepElectrodos | Lambda de Wilks    | ,400      | 5,255 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,040 |
|               | Traza de Hotelling | 1,501     | 5,255 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,040 |
|               | Raíz mayor de Roy  | 1,501     | 5,255 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,040 |
| Corriente     | * Traza de Pillai  | ,413      | 2,466 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,155 |
| Tiempo        | Lambda de Wilks    | ,587      | 2,466 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,155 |
|               | Traza de Hotelling | ,705      | 2,466 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,155 |
|               | Raíz mayor de Roy  | ,705      | 2,466 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,155 |
| SepElectrodos | Traza de Pillai    | ,265      | 1,264 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,340 |
| * Tiempo      | Lambda de Wilks    | ,735      | 1,264 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,340 |
|               | Traza de Hotelling | ,361      | 1,264 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,340 |
|               | Raíz mayor de Roy  | ,361      | 1,264 <sup>b</sup>     | 2,000           | 7,000       | ,340 |
| Corriente     | * Traza de Pillai  | ,068      | ,255 <sup>b</sup>      | 2,000           | 7,000       | ,782 |
| SepElectrodos | Lambda de Wilks    | ,932      | ,255 <sup>b</sup>      | 2,000           | 7,000       | ,782 |
| * Tiempo      | Traza de Hotelling | ,073      | ,255 <sup>b</sup>      | 2,000           | 7,000       | ,782 |
|               | Raíz mayor de Roy  | ,073      | ,255 <sup>b</sup>      | 2,000           | 7,000       | ,782 |

Nota: Efecto de la interacción entre los tres factores no resultó significativa, por la poca variación en la corriente, por Poveda & Vela (2021).

De acuerdo con lo anterior y considerando los resultados de la fase I, se eligió como configuración óptima las condiciones de operación del tratamiento B. Esto, porque el consumo de energía a 2A es menor que a 3A. La separación entre electrodos de 15 mm favorece la interacción de las reacciones electroquímicas. El tiempo de tratamiento a 40 min logró los mayores porcentajes de remoción. Además, en parámetros como pH, conductividad y temperatura, se obtuvo valores aceptables

### 9.2.2. Adecuación de la celda electrolítica

Por otra parte, la celda de electrocoagulación fue sometida a un cambio en su diseño; específicamente se ajustó la altura de la válvula para toma de muestras, pasando de una altura de 10 cm a 5 cm. Esto debido a que en la fase I, al tomar las muestras correspondientes a los tratamientos; la turbulencia generada al abrir la válvula, permitía que algunos de los flóculos formados presentes en la zona de flotación, logaran entrar en la muestra de agua.

### 9.2.3. Datos muestreo y caracterización final

Una vez elegido el tratamiento B, como la configuración con mejores resultados para los parámetros analizados, este fue repetido nuevamente siendo necesario tomar una nueva muestra compuesta para la ejecución de dicho tratamiento elegido. Los valores para los distintos parámetros se pueden apreciar en la Tabla 8 para la muestra compuesta (afluente) y para el tratamiento B (efluente). El parámetro de DBO<sub>5</sub>, fue analizado por un laboratorio externo (véase Anexo A y B).

Tabla 8. Caracterización fisicoquímica del agua para el tratamiento elegido

| Muestra       | Fecha     | Temperatura | pH             | Conductividad | SST  | DQO                 | DBO <sub>5</sub>    |
|---------------|-----------|-------------|----------------|---------------|------|---------------------|---------------------|
|               |           | °C          | Unidades<br>pH | µS/cm         | mg/L | mgO <sub>2</sub> /L | mgO <sub>2</sub> /L |
| Compuest<br>0 | 30/10/202 | 20,5        | 4,8            | 1133,6        | 1540 | 7167                | 2788 a Final        |

Tabla 8. Continuación

|      |           |      |     |       |     |        |     |
|------|-----------|------|-----|-------|-----|--------|-----|
|      | 30/10/202 |      |     |       |     |        |     |
| Tr B | 0         | 21,5 | 7,4 | 993,3 | 275 | 1085,6 | 496 |

Nota: La caracterización en términos generales, contrasta los resultados de la fase I, por Poveda & Vela (2021).

#### 9.2.4. Operación del tratamiento óptimo

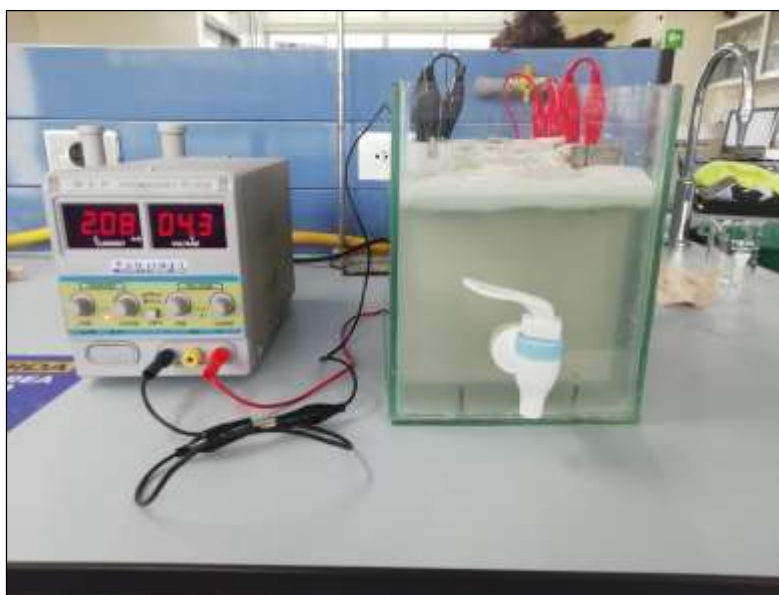
El tratamiento elegido como configuración óptima del electrocoagulador para tratar los efluentes de la fábrica de pan de arroz, opero bajo las siguientes condiciones; amperios, separación entre electrodos y tiempo de retención con los valores 2 A, 15 mm y 40 min respectivamente. Como se observa en la Tabla 1 y otras bibliografías, algunos autores no reportan datos de densidad de corriente o tensión, donde el primero dato nos ayuda a hacer un escalado del sistema y el segundo se requiere para calcular el consumo de energía. Es por esto que además de la configuración antes mencionada, el sistema trabajo a densidad de corriente y tensión de 9,24 A/m<sup>2</sup> (0,924mA/cm<sup>2</sup>) y 4,3V respectivamente. En la Figura 9, se aprecia la puesta en marcha de dicho tratamiento.

La densidad se encuentra dentro de los rangos según la literatura para distintos efluentes industriales. Este término es relevante, pues repercute sobre aspectos como porcentaje de remoción del contaminante, consumo de energía, consumo de electrodo, temperatura y permite escalar a un prototipo de mayor capacidad. Valero et al., (2011), trabajaron con densidades de 2,5, 5, 10 y 20 mA/cm<sup>2</sup> experimentalmente, sin embargo, al escalarlo a tamaño preindustrial redujeron la densidad a  $j = 4,1\text{mA/cm}^2$ . Altas densidades admiten celdas más pequeñas, sin embargo, densidades demasiado traen problemas como generación de gas en exceso, desperdicio de energía y reducción en la eficacia debida a la sobredosificación (Mendes, 2019). Esto indica la importancia de procesos experimentales, en donde se hace un primer acercamiento y a partir de estos, por qué no, mejorar los resultados obtenidos.

Por otro lado, también hay una interacción con la variable separación entre electrodos, pues a mayor separación mayor densidad, sin embargo, como se muestra en la Figura 6 y Figura

7 una alta densidad no se traduce en mayor porcentaje de remoción. Robles & López (2017), reportan una mejora significativa en el efecto de la electrocoagulación al disminuir la separación de 50mm a 25mm, mejorando también variables como temperatura y densidad, además mencionan que la resistividad del agua en el reactor es directamente proporcional a la separación de electrodos. Cuando los electrodos están más distantes, la velocidad de reacciones electroquímicas es más lenta, por lo tanto, menos efectiva la coagulación.

Figura 9. Ejecución de la configuración de tratamiento elegido



Nota: Por Poveda & Vela (2021).

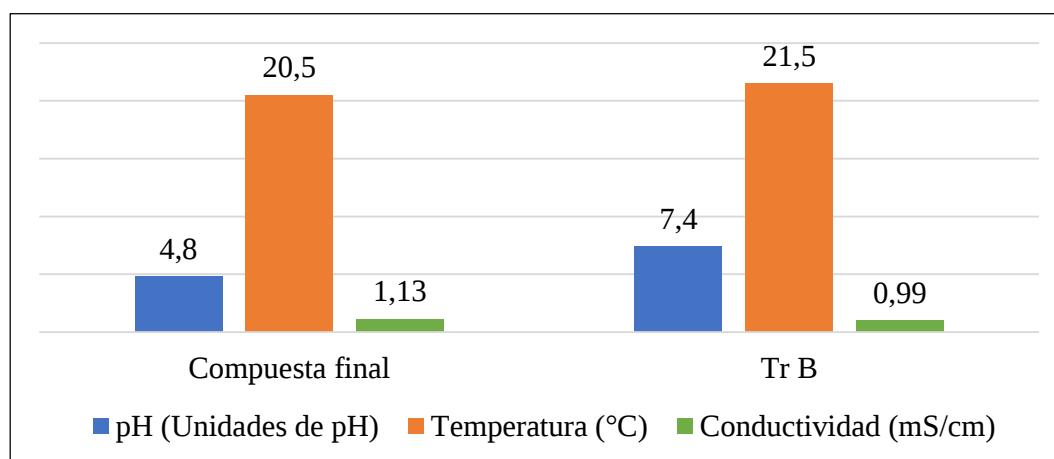
Las celdas electrolíticas deben tener una distancia óptima entre electrodos, para evitar zonas con diferente velocidad de reacción o reacciones parasitas, disminuyendo la eficiencia de corriente (Frontana *et al.*, 2014). Es por esto, que se busca una correcta eficiencia, es decir un equilibrio entre porcentaje de remoción, tiempo, consumo de energía y consumo de electrodo.

A partir de la  $DBO_5$  y DQO, se calculó la relación de biodegradabilidad  $DBO_5/DQO$  donde se observa un leve aumento de 0,389 a 0,456 para la muestra compuesta y el Tr B respectivamente. De acuerdo con (Pire *et al.*, 2011; Posada & Mosquera, 2007), estas relaciones de biodegradabilidad se encuentran catalogados como poco biodegradable con una relación  $DBO_5/DQO$  entre (0,3-0,5). Esto indica que los efluentes de la fábrica de pan de arroz presentan

una alta contaminación por compuestos inorgánicos, por lo tanto, estos efluentes pueden ser refractarios a los tratamientos biológicos convencionales. Sin embargo, no deben ser descartados por completo, como menciona Posada & Mosquera (2007), se podría incluir pretratamientos o bien una sedimentación primaria.

El ajuste inicial del pH en tratamientos de EC, es bastante común, generalmente se opta por llevar a un pH ácido (Aguilar, 2015; Arango & Garcés, 2007a; Davila *et al.*, 2011; Valero *et al.*, 2011). En el presente trabajo no se ajustó el pH inicial, como se muestra en la Figura 10, se tuvo un pH de 4,8 y 7,4 en el inicio y final del tratamiento respectivamente. En aguas residuales acidas el pH suele aumentar debido a la generación de hidrógeno molecular por la reducción del cátodo (Mendes, 2019). Las ventajas de no requerir ajuste de pH son ahorro de productos químicos, la conductividad no aumenta en gran medida y se simplifica el proceso de EC (Valero *et al.*, 2011).

Figura 10. Resultados de parametros complementarios del tratamiento elegido



Nota: Por Poveda & Vela (2021).

Arango (2005), menciona que para aumentar la conductividad eléctrica es recomendable adicionar NaCl, sin embargo, para un desarrollo normal del proceso de electrocoagulación, se recomienda que la cantidad de  $\text{Cl}^-$  se mantenga en 20%. Esto sugiere, que un exceso en la adición de NaCl al agua residual, puede ocasionar efectos negativos en la eficiencia del proceso. De esta manera, la conductividad muestra una ligera disminución al finalizar el tratamiento respecto a su valor inicial, los cuales fueron 0,99 y 1,13 mS/cm, respectivamente. Esto se debe a que, como se

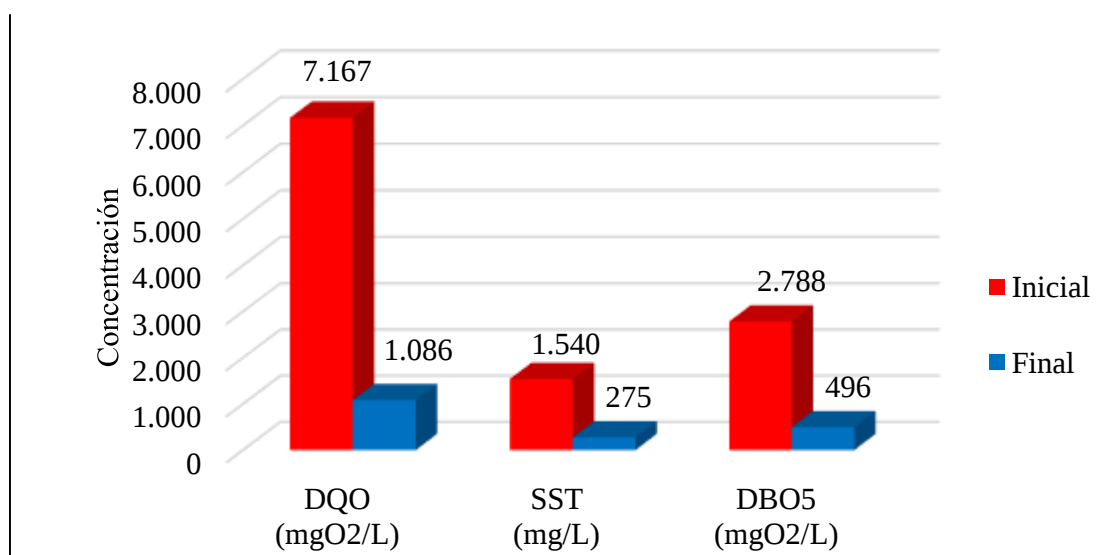
mencionó previamente, el proceso de formación de flóculos ocasiona que las partículas se aglomeren en la zona inferior y superior de la celda a través de los procesos de sedimentación y flotación respectivamente, lo que genera una disminución de los iones dispersos en el sistema y por lo tanto la capacidad de estos para transmitir electricidad se inhibe (Gilpavas *et al.*, 2008).

### 9.3. Resultados Fase 3. Eficiencia del Tratamiento

#### 9.3.1. Eficiencia de remoción

Aplicando la ecuación (7), se obtuvieron los porcentajes de remoción 84,8%, 82,1% y 82,2% para DQO, SST y DBO<sub>5</sub> respectivamente. La ejecución del tratamiento B por segunda vez, como se aprecia en la Figura 11 presentó un comportamiento similar al de la fase I, haciéndose presente la rápida formación de espumas y la precipitación de flocs. Sin embargo, los porcentajes de remoción de la fase I fueron levemente superiores.

Figura 11. Concentración de DQO, SST y DBO<sub>5</sub> antes y después del tratamiento elegido



Nota: Por Poveda & Vela (2021).

En el proceso de elaboración de pan de arroz hay pérdidas de materias primas, que consecuentemente terminan en el efluente del mismo, y que aportan a la DBO<sub>5</sub>, así como las aguas

provenientes de las baterías sanitarias en las instalaciones de la empresa, para los que se obtuvo una remoción del 82,2%. En la industria láctea la pérdida de leche o subproductos, aportan entre 90 y 95% de DBO<sub>5</sub> (López & Harnisth, 2016).

La Figura 11 muestra la variación en la concentración de DQO en el efluente de la fábrica y en el efluente del reactor EC una vez realizado el tratamiento en laboratorio, alcanzando una reducción del 84,8%. La reducción de DQO en un proceso de EC, se da principalmente por los mecanismos de oxidación y adsorción en hidróxidos de aluminio, debido a la atracción electrostática y el atrapamiento físico (Mendes, 2019). Esto cuando se utiliza aluminio como electrodo ánodo o de sacrificio. En la Tabla 1, se muestran reducciones en la DQO entre el 61% hasta el 87%, mediante la aplicación de esta tecnología en distintos efluentes industriales (Aguilar, 2015; Arango & Garcés, 2007b; Davila *et al.*, 2011; López & Harnisth, 2016; Valero *et al.*, 2011). Para los análisis de porcentaje de remoción, es preciso señalar las variables de tiempo, volumen tratado y procedencia del efluente. Aguilar (2015), reporta una reducción del 87% de DQO en tan solo 15min con un volumen de 4,5L, por su parte, López & Harnisth (2016), reportaron reducción de DQO hasta del 82,4% en un volumen de 33L con exposición de 60min.

En la Figura 12 se aprecian en el vaso de precipitado del lado izquierdo el efluente producto de la fabricación de pan arroz y del lado derecho el efluente resultante del proceso de EC. Visualmente hay un cambio entre las dos muestras, reflejado en el 82,1% de reducción de SST. Esto debido a la acción coagulante del hidróxido de aluminio formado por la oxidación del ánodo. Los iones de aluminio de carga positiva desestabilizan las cargas negativas de los coloidales, de esta forma los sólidos en suspensión se aglomeran y se mejora la turbidez del agua tratada (López & Harnisth, 2016). El aumento en el tiempo de residencia, genera más hidróxidos y gas, favoreciendo la floculación o precipitación de las partículas formadas.

Figura 12. Efluente industrial antes y después del tratamiento



Nota: A la izquierda se observa el efluente del proceso de pan de arroz sin tratamiento, y a la derecha el efluente después del tratamiento B, por Poveda & Vela (2021).

En los últimos años algunos autores han optado por evaluar sistemas híbridos de electrocoagulación, acoplados bien sea a tratamientos biológicos o fisicoquímicos. Esto con el objetivo de aumentar las eficiencias de remoción en los efluentes industriales y lograr el cumplimiento de normatividad aplicable. Hernández (2016), analizó un tratamiento fisicoquímico, uno por EC y el sistema acoplado, sin embargo, no observo efectos sinérgicos en relación a los parámetros evaluados, porque la eficiencia de este último fue menor, respecto a los sistemas de manera independiente. Por otra parte Brenes (2019), estudio los sistemas de digestor anaerobio y electrocoagulación como tratamientos primario y secundario, respectivamente, para aguas residuales domésticas. Finalmente Mendes (2019), aplico un sistema denominado ElectroBiorreactor de Membrana (EMBR), obteniendo mejoras en la eliminación de algunos compuestos y nutrientes además de reducir el ensuciamiento de la membrana, respecto al sistema MBR. Según Mendes (2019), una operación intermitente ON/OFF de electrolisis, ayuda al desprendimiento de posibles películas de óxido generadas en el electrodo.

### ***9.3.2. Cumplimiento de normatividad***

En este apartado se realizó un contraste de los resultados obtenidos con la configuración elegida; frente a los valores límites máximos permisibles (VLMP) que trata la Resolución 631 de 2015, de los parámetros fisicoquímicos estudiados en esta investigación. Como se aprecia en la Tabla 9, solo la temperatura y el potencial de Hidrogeno se encuentran dentro del rango de VLMP. El

parámetro de pH, representa un criterio importante para la elección de configuración del tratamiento, pues logra un pH superior tendiente a neutro sin ajuste inicial del mismo.

Por otro lado, los parámetros de SST, DQO y DBO<sub>5</sub>; sobrepasan los VLMP establecidos en el Artículo 12, sector de Alimentos y Bebidas de acuerdo con la resolución. Sin embargo, al ser un primer acercamiento de esta tecnología a las características de este tipo de efluente, en futuras investigaciones se puede aspirar a mejorar este margen.

El marco normativo colombiano, se rige por la Resolución 631 de 2015 para vertimiento a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillado público. Este aplica para empresas, que se encuentren cerca a cuerpos de agua superficial o bien cuenten con conexión al alcantarillado público.

Tabla 9. Comparación del efluente tratado respecto a la normatividad

| Valores    | Temperatura | pH          | SST  | DQO                 | DBO <sub>5</sub>    | Conductividad |
|------------|-------------|-------------|------|---------------------|---------------------|---------------|
|            | °C          | Unidades pH | mg/L | mgO <sub>2</sub> /L | mgO <sub>2</sub> /L | μS/cm         |
| Res 631/15 | <40         | 6,00 a 9,00 | 200  | 600                 | 400                 | N/A           |
| Tr B       | 21,5        | 7,4         | 275  | 1.085,6             | 496                 | 993,3         |

Nota: Por Poveda & Vela (2021).

El panorama cambia cuando una empresa no cuenta con alguna de las situaciones anteriores, y debe hacer vertimiento al suelo. Para tal caso, el Decreto 050 de 2018 contiene una serie de requisitos, que el interesado debe presentar para solicitar permiso de vertimiento al suelo, descritos en su Artículo 6; por lo tanto, no hay VLMP establecidos, sino que estos van en función del estudio de suelo seleccionado para tal fin.

### 9.3.3. Cuantificación de costos operativos

Los costos operativos principales en un tratamiento de electrocoagulación, están dictados por el consumo de energía y desgaste del electrodo de sacrificio. Como mencionan Deniz & Akarsu (2018), los análisis económicos son importantes cuando se considera la aplicación práctica de un

método de tratamiento. Dentro de un análisis económico cabe resaltar el coste inicial de la inversión; sin embargo, para efectos de esta investigación se consideraron los aspectos técnicos de costos operativos.

El proceso de EC por la oxidación anódica permite que cierta cantidad del electrodo ánodo sea disuelto, esta cantidad de aluminio disuelto se calculó utilizando la ley de Faraday según la ecuación (9). Para una corriente (i) 2A, tiempo de tratamiento (t) 40 min, peso molecular del electrodo (M) 26,98g/mol, número de electrones (z) 3, número de Faraday (F) 96.500C/mol y el volumen tratado (v) 5L, valores correspondientes a la configuración óptima elegida.

$$C_{energía} = \frac{U * i * t}{v} \quad ((8))$$

$$C_{energía} = \frac{4,3v * 2A * 0,666h}{0,005m^3} = 1,145kWh/m^3 \quad ((8))$$

Se determinaron teóricamente consumos de energía y electrodo de 1,145kWh/m<sup>3</sup> y de 89,46gAl/m<sup>3</sup> a 40 min, respectivamente, para una densidad de corriente de 0,924mA/cm<sup>2</sup>. De acuerdo a las tarifas de energía para servicio no residencial en el departamento del Meta según EMSA (2021), se halló un promedio de \$622,33/kWh para el primer trimestre del año 2021. En cuanto al material del electrodo Al, se estimó un precio del mercado aproximado de \$16,96/g Al (ALUAZ, 2021). Considerando estos dos aspectos en costos operativos, y utilizando la ecuación (9) se determinó teóricamente un costo operativo del tratamiento de \$2.229,8/m<sup>3</sup>.

Con el uso de ánodos de Al se han reportado mejores remociones (Aguilar, 2015; Davila et al., 2011); su desventaja es un costo de material más elevado. Una configuración con electrodos más económicos (Fe/Fe) disminuye el costo operativo del tratamiento. Por lo que, se debe evaluar su eficiencia, Arango & Garcés (2007a), obtuvieron remociones de 95,1% y 85,58% para ánodos de Fe y Al, respectivamente. De igual manera Deniz & Akarsu (2018), reportan una eficiencia del

95,6% en la eliminación de boro, con una configuración de electrodos Fe/Al y costo operativo de \$2,35USD/m<sup>3</sup>.

$$C_{electrodo} = \frac{i * t * M}{z * F * v} \quad ((9))$$

$$C_{electrodo} = \frac{2A * 2400s * 26,98g}{3 * 96500 C/mol * 0,005m^3} = 89,46g/m^3 \quad ((9))$$

El cálculo de costos operativos en la literatura es escaso, aún más, para el tipo de efluente tratado en esta investigación. Por esto, y a modo de ejemplo, Deniz & Akarsu (2018), determinaron un consumo de energía de 17,33kWh/m<sup>3</sup> y desgaste de electrodo de 1,2kg/m<sup>3</sup> a 70 min de tratamiento, para la eliminación de boro en agua. En el caso de Hernández (2016), obtuvo un consumo de 1,425kWh/m<sup>3</sup> en el tratamiento de efluentes de una planta de beneficio. En cuanto al tratamiento de aguas residuales domésticas, Brenes (2019), indicó un consumo de energía de 5,87kWh/m<sup>3</sup> y por su parte Mendes (2019), aplicando distintas densidades de corriente reportó consumos de ánodo entre 20 a 74,1gAl/m<sup>3</sup> y un consumo energético de tan solo 0,16kWh/m<sup>3</sup>. La importancia de los análisis económicos, radica en que ayudan en la toma de decisiones para la elección de un sistema de tratamiento, en comparación a otras alternativas.

## **10. Impacto Social y Humanístico del Proyecto**

El tratamiento de los efluentes líquidos industriales ha sido generalmente asumido como una obligación para el cumplimiento de la normativa, más que una responsabilidad de protección y cuidado con el ambiente. Es por esto que, en el marco de la responsabilidad social empresarial, es un compromiso medioambiental que las empresas deben asumir por los beneficios obtenidos del recurso hídrico. De esta manera, mediante la aplicación de la tecnología de electrocoagulación en la industria alimentaria, se pretende reconocer las ventajas económicas y ambientales de su implementación en esta industria, con el fin de que pueda ser articulada a proyectos de innovación y modernización en empresas del clúster del pan de arroz en el Meta, alcanzando un reconocimiento social por la calidad de sus productos y su compromiso por el desarrollo sostenible.

De esta misma forma, la implementación de esta tecnología en la industria del pan de arroz permitirá una mayor visibilidad de la electrocoagulación y su aplicabilidad para el tratamiento de los efluentes de diferentes sectores industriales, demostrando sus ventajas operativas en un ámbito real, a través de la disminución de la cantidad de lodos generados en comparación con otros métodos de tratamiento, a la vez de reducir el requerimiento de productos químicos para su ejecución.

Para el ámbito ambiental, este proyecto supone un aporte significativo, debido a que la eficiencia y bajos costos operativos obtenidos con esta tecnología, permiten identificarla como una gran alternativa para las empresas del sector alimentario, promoviendo un mayor tratamiento del agua residual que se genera en la región. Así mismo, se fomenta la investigación sobre la aplicabilidad de esta tecnología en otros sectores y/o actividades industriales en las que se generan aguas residuales y de esta manera se reduzca la contaminación ocasionada a los cuerpos hídricos por los efluentes industriales.

## 11. Conclusiones

1. Los resultados obtenidos en la fase I operando la celda de electrocoagulación propuesta, demuestra su potencial aplicativo en la industria alimentaria. Siendo las características de entrada 1.792,5 mg/L SST, 8.887,3 mgO<sub>2</sub>/L y 2.082,4mg/L SST, 6.505,5 mgO<sub>2</sub>/L DQO, presentado medias de remoción de 77,09% y 82,33% para DQO y SST, respectivamente.
2. El análisis estadístico indicó que la corriente no tiene un efecto significativo en el proceso, debido a la poca variación de esta, siendo de 2A hasta 3A. Sin embargo, el efecto de la combinación corriente y separación entre electrodos resultó significativo, pues las dos variables influyen en la densidad de corriente, siendo esta última uno de los parámetros relevantes en la electrocoagulación.
3. La configuración óptima elegida trabajó a una corriente de 2A, separación entre electrodos de 15mm, tiempo de tratamiento de 40 minutos, densidad de corriente de 0,924mA/cm<sup>2</sup> y tensión de 4,3V, alcanzando para las condiciones de entrada remociones del 84,8%, 82,1% y 82,2% para DQO, SST y DBO<sub>5</sub> respectivamente.
4. Las concentraciones de DQO, SST y DBO<sub>5</sub> del tratamiento elegido no cumplen con la Resolución 631/2015 porque exceden los VLMP; sin embargo, el pH y la temperatura estuvieron dentro del rango que estipulado en la norma.
5. Se obtuvo un consumo de energía bajo de 1,145kWh/m<sup>3</sup> y el desgaste de electrodo fue de 89,46gAl/m<sup>3</sup>, para un costo operativo teórico de \$2.229,8 COP/m<sup>3</sup>.

## 12. Recomendaciones

1. Con base en los resultados del diseño experimental, se recomienda la manipulación de la conductividad para mejorar la resistividad eléctrica dentro de la celda electrolítica.
2. En este trabajo se emplearon electrodos Al/Fe en conexión monopolar. Algunos autores han reportado eficiencias de remoción igual o superiores con otros materiales de electrodos en distintos efluentes industriales, por lo que es recomendable verificar el tratamiento con materiales más económicos usando electrodos Fe/Fe o aleaciones como acero inoxidable.
3. Los efluentes líquidos de la producción de pan de arroz presentan alto contenido de sólidos y grasas. En aras de mejorar la eficiencia de remoción, se recomienda la implementación de pretratamientos para estos parámetros y favorecer la electrocoagulación. De igual forma, evaluar sistemas híbridos con electrocoagulación, acoplado como tratamiento primario o secundario.
4. Debido a la exposición prolongada del tratamiento, se recomienda en próximas investigaciones, realizar análisis del posible aluminio residual, debido a que no se descartan sobredosis del coagulante formado *in situ*.

### 13. Bibliografía

- Aguilar, E. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio. [https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4303/Aguilar\\_ae.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4303/Aguilar_ae.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Aguilar, E., Marrufo S., & Neyra A. (2019). Reduction of total chromium levels from raw tannery wastewater via electrocoagulation using response surface methodology. *Journal of Ecological Engineering*, 20(11), 217–224. <https://doi.org/10.12911/22998993/113191>
- Aluaz. (2021). *aluaz somos aluminio*. Lámina Lisa. <https://aluaz.com/producto/lamina-lisa/>
- Aramendi, S., Sarasua, M., Marañón, J., San Martín, A., & Villanueva, J. (2001). *Industria alimentaria y medio ambiente* (1st ed.). [http://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/ud\\_fp\\_ea/es\\_def/adjuntos/UD\\_FP\\_Industria\\_alimentaria\\_y\\_medio\\_ambiente\\_2004HR.pdf](http://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/ud_fp_ea/es_def/adjuntos/UD_FP_Industria_alimentaria_y_medio_ambiente_2004HR.pdf)
- 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, Á., & Garcés, L. (2007a). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(147), 56–67. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidadeafit/article/download/764/672/>
- Arango, Á., & Garcés, L. (2007b). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Producción Mas Limpia*, 2(2), 23–30. [http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/526/1/PL\\_V2N2\\_2330\\_electrocoagulación.pdf](http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/526/1/PL_V2N2_2330_electrocoagulación.pdf)
- Arias, C., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17–24. <https://www.redalyc.org/pdf/911/91101302.pdf>
- Barco, H., Rojas, E., & Restrepo, E. (2012). *Física principios de electricidad y magnetismo* (Primera ed.). Universidad Nacional de Colombia.

- <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/51068/9789587612837.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Bermeo, M., & Tinoco, O. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada. *Industrial Data*, 19(2), 91. <https://doi.org/10.15381/idata.v19i2.12844>
- Bravo, L., Saldaña, P., Izurieta, J., & Mijangos, M. (2013). *La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3336.7843>
- Brenes, H. (2019). *Evaluación de un sistema de electrocoagulación como tratamiento secundario para el efluente de un digestor anaeróbico*. [Tesis de pregrado, Universidad de Costa Rica]. Repositorio. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2020/12/TFGHellenBrenesVargas.pdf>
- Chang, R. (2017). Electroquímica. 12 aed. McGraw-Hill Interamericana., pp. 813–830).
- Chuchón, S., & Aybar, C. (2008). Evaluación de la capacidad de remoción de bacterias coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá”, Ayacucho, Perú. *Ecología Aplicada*, 7(1–2), 165. <https://doi.org/10.21704/rea.v7i1-2.372>
- Congreso de la República de Colombia. (1979). Ley 9 de 1979. Por la cual se dictan medidas Sanitarias. Diario Oficial No. 35308. [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/LEY\\_0009\\_DE\\_1979.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/LEY_0009_DE_1979.pdf)
- Costa, J., Costa, V., Pereira, E., & Paranhos, C. (2019). Removal of Cr(VI) from Wastewater of the Tannery Industry by Functionalized Mesoporous Material. *Silicon*. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00315-1>
- Crombet, S., Abalos, A., Rodríguez, S., & Pérez, N. (2016). Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 49–56. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57715>
- Cruz, A., Diez, A., Bernal, L., & Barrera, C. (2014). Parámetros fisicoquímicos y biológicos de la calidad del agua. En *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales* (pp. 45–64). Reverté Ediciones.
- Davila, J., Machuca, F., & Marrianga, N. (2011). Treatment of vinasses by electrocoagulationelectroflotation using the Taguchi method. *Electrochimica Acta*, 56(22), 7433–7436. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.07.015>

- Deniz, F., & Akarsu, C. (2018). Operating Cost and Treatment of Boron from Aqueous Solutions by Electrocoagulation in Low Concentration. *Global Challenges*, 2(5–6), 1800011. <https://doi.org/10.1002/gch2.201800011>
- Duek, A. (2016). El agua en las industrias alimenticias de Mendoza (Argentina): estimación de los requerimientos hídricos y la potencialidad de reúso agrícola. *Revista Ambiente e Agua*, 11(2), 279–290. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Electrificadora del Meta. (EMSA). (2021). Tarifas Energía. <https://www.electrificadoradelmeta.com.co/newweb/tarifas-energia-2-2/#1615827204617291e40f8-c264>
- Frontana, B., Vásquez, R., & Barrera, C. (2014). Celdas de laboratorio y reactores industriales electroquímicos. En *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales* (pp. 81–118). Reverté Ediciones.
- Gilpavas, E., Arbeláez, E., Sierra, L., White, C., Oviedo, C., & Restrepo, P. (2008). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales [Universidad EAFIT]. <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/cuadernosinvestigacion/article/download/1279/1158/>
- Gilpavas, E., Arbeláez, P., Medina, J., & Acosta, D. (2017). Combined electrocoagulation and electro-oxidation of industrial textile wastewater treatment in a continuous multi-stage reactor. *Water Science and Technology*, 76(9), 2515–2525. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.415>
- Heidmann, I., & Calmano, W. (2010). Removal of Ni, Cu and Cr from a galvanic wastewater in an electrocoagulation system with Fe- and Al-electrodes. *Separation and Purification Technology*, 71(3), 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.12.016>
- Hernández, D. (2016). *Tratamiento acoplado fisicoquímico-electrocoagulación para incrementar la remoción de la materia orgánica de un agua residual de rastro municipal* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca]. Repositorio <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/65337/TESIS-splitmerge.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Hernández, P. (2011). Investigación Sobre Procesos Avanzados De Tratamiento Y Depuración De Las Aguas Mediante Electrocoagulación. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de

- Madrid.]. Repositorio  
[http://oa.upm.es/7755/1/PABLO\\_SANTIAGO\\_HERNANDEZ\\_LEHMANN.pdf](http://oa.upm.es/7755/1/PABLO_SANTIAGO_HERNANDEZ_LEHMANN.pdf)
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2010). Metodología de la investigación 5a ed. McGraw-Hill Interamericana. <http://ebooks7-24.com.craiustadigital.usantotomas.edu.co/?il=285>
- Iannacone, J., & Molano, J. (2018). Tratamiento de efluentes de la industria alimentaria por coagulación-floculación utilizando almidón de *Solanum Tuberosum* L. ‘Papa’ como alternativa al manejo convencional. *Biotempo*, 15(1), 83–112. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v15i1.1699>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM). (2007). *Toma de muestras de aguas residuales*. [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM).. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018* [https://cta.org.co/biblionet/estudio-nacional-del-agua-2018/#:~:text=Este%20studio%20proporciona%20m%C3%A1s%20informaci%C3%B3n,las%20%C3%A1reas%20y%20subzonas%20hidrogr%C3%A1ficas\)..](https://cta.org.co/biblionet/estudio-nacional-del-agua-2018/#:~:text=Este%20studio%20proporciona%20m%C3%A1s%20informaci%C3%B3n,las%20%C3%A1reas%20y%20subzonas%20hidrogr%C3%A1ficas)..)
- López, P., & Harnisth, A. (2016). Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Enfoque UTE*, 7(1), 13–21. <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/enfoqueute/v7n1/1390-6542enfoqueute-7-01-00013.pdf>
- Manchego, I., & Zabala, G. (2019). *Implementación de un electrocoagulador a escala laboratorio que permita la remoción de arsénico en agua*. [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás.]. Repositorio  
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/19479/2019ivanmanchego?sequence=9&isAllowed=y>
- Mendes, L. (2019). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación acoplada a un MBR para minimizar el ensuciamiento de la membrana y obtener efluentes de alta calidad. [Tesis doctoral, Universidad de Alicante]. Repositorio  
[https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/90307/1/tesis\\_lyvia\\_mendes\\_predolin.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/90307/1/tesis_lyvia_mendes_predolin.pdf)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos

- puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.  
[https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1res\\_631\\_marz\\_2015.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1res_631_marz_2015.pdf)
- Mollah, M., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114(1–3), 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>
- Muñoz, S., & Sánchez, R. (2018). El agua en la industria alimentaria. *Boletín de La Sociedad Española de Hidrología Médica*, 33(2), 157–171. <https://doi.org/10.23853/bsehm.2018.0571>
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. <https://doi.org/LC/G.2681-P/Rev.3>
- Nava, L., Gasperín, R., & Durán, A. (2014). Comparación de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1), 101–112. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n1/v30n1a9.pdf>
- Noukeu, N. A., Gouado, I., Priso, R. J., Ndongo, D., Taffouo, V. D., Dibong, S. D., & Ekodeck, G. E. (2016). Characterization of effluent from food processing industries and stillage treatment trial with *Eichhornia crassipes* (Mart.) and *Panicum maximum* (Jacq.). *Water Resources and Industry*, 16, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.07.001>
- Otero, M., Giraldo, W., & Vega, J. (2017). Comunicación y mercadeo. Estudio cualitativo para el desarrollo de la marca de Pan de arroz. *Luciérnaga-Comunicación*, 9(18), 72–84. <https://doi.org/10.33571/revistaluciernaga.v9n18a6>
- Paredes, J., & Brito, R. (2012). Recuperación electroquímica del agua del Alpechín del Aceite de Oliva, para evitar la contaminación del medio ambiente y su reutilización como agua de riego. *Observatorio Medioambiental*, 15, 219–234. <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/40339/38717>
- Parra, A. M., Castillo P, D. M., Rojas V, J. F., Puerto G, C. F., & Villalba H, N. A. (2018). *Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2014 - 2017*. [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2019/Ene/informe\\_sectorial-cuatrenio\\_2014-2017\\_.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2019/Ene/informe_sectorial-cuatrenio_2014-2017_.pdf)

- Peña, G., Cuesta, F., & Betancur, J. (2015). Remoción de carga contaminante en aguas residuales industriales a escala de laboratorio. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 157–168. <https://doi.org/10.22490/21456453.1413>
- Picazo, J. (1995). Aguas residuales en las industrias agroalimentarias: caracterización y sistemas de tratamiento y depuración. *Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental*, 8, 39–58. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7435861.pdf>
- Pire, M., Rodríguez, K., Fuenmayor, M., Fuenmayor, Y., Acevedo, H., Carrasquero, S., & Díaz, A. (2011). Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 21(2), 5–19. <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v21n2/v21n2a01.pdf>
- Posada, L., & Mosquera, S. (2007). Biodegradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales de una empresa de pinturas. [Tesis de pregrado, Universidad EAFIT. Medellín]. Repositorio [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/362/LuisaFernanda\\_PosadaUribe\\_2007.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/362/LuisaFernanda_PosadaUribe_2007.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Presidencia de la República de Colombia. (2010). *Decreto 3930 de 2010*. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec\\_3930\\_2010.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_3930_2010.pdf)
- Presidencia de la República de Colombia. (2018). *Decreto 050 del 2018*. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones. <http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%2050%20DEL%2016%20ENERO%20DE%202018.pdf>
- Restrepo, A., Arango, A., & Garcés, L. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción+Limpia*, 1(2), 58–77. <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/514>

- Restrepo, M. (2006). Producción más limpia en la industria alimentaria. *Produccion + Limpia*, 1(1), 87–101.  
[https://www.researchgate.net/publication/277184965\\_Produccion\\_mas\\_Limpia\\_en\\_la\\_Industria\\_Alimentaria](https://www.researchgate.net/publication/277184965_Produccion_mas_Limpia_en_la_Industria_Alimentaria)
- Roa, G., Linares, I., Amaya, A., & Barrera, C. (2014). Electrocoagulación. In *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales* (pp. 165–180). Reverté Ediciones.
- Robles, L., & López, F. (2017). Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación. [Tesis de pregrado, *Universidad de la Salle*]. Repositorio.  
[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1314&context=ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1314&context=ing_civil)
- Rodrigo, M., Cañizares, P., Llanos, J., Lobato, J., Martínez, F., Sáez, C., & Barrera, C. (2014). Fundamentos de electroquímica ambiental. In *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales* (pp. 1–44). Reverté Ediciones.
- Rojas, C. (2018). *Capacitación curvas de patrón DQO*. Universidad Santo Tomás.
- Rueda, J., Levchuk, I., Fernández, P., & Sillanpää, M. (2020). A critical review on application of photocatalysis for toxicity reduction of real wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, 258(120694), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120694>
- Valero, D., Ortiz, J. M., García, V., Expósito, E., Montiel, V., & Aldaz, A. (2011). Electrocoagulation of wastewater from almond industry. *Chemosphere*, 84(9), 1290–1295. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.032>
- Vásquez, G. (2013). *Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la Costa Atlántica Colombiana*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C]. [http://www.bdigital.unal.edu.co/49437/1/panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnologia anaerobia en la costa atlantica colombiana.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/49437/1/panorama%20del%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20con%20tecnologia%20anaerobia%20en%20la%20costa%20atlantica%20colombiana.pdf)
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, Aguas residuales: El recursos desaprovechado* (UNESCO). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>

## Anexos

Anexo A. Resultados de la concentración de  $\text{DBO}_5$  para la muestra compuesta del efluente de la fábrica de pan de arroz, tomada el día 30 de octubre del año 2020.



Página 1 de 1

### RESULTADO DE ANALISIS

T.A.38926

|                   |                          |                               |                              |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Solicitante:      | JUAN DIEGO POVEDA ÁVILA  | Dirección:                    | Calle 11. Sur # 11 - 45 Este |
| Contacto:         | No Reporta               | Teléfonos:                    | 3196245203 - 3123439815      |
| MUESTRA No.       | 1                        | Plan de monitoreo:            | N.A.                         |
| Fecha de toma:    | 2020/10/30               | Hora de Toma:                 | 08:00                        |
| Departamento:     | Mérida                   | Municipio:                    | Restrepo                     |
| Vereda/Barrio:    | Caney Alto               | Fuente:                       | Producción de Pan de Arroz   |
| Punto:            | Trampa de Grasas         | Lugar de muestreo:            | Vereda Caney Alto            |
| Coordenadas:      | N:4°17'19" W:73°33'56"   | Altitud:                      | 502msnm                      |
| Clase de muestra: | Agua Residual Industrial | Tipo de muestra:              | Compuesta                    |
| Fecha Recepción:  | 2020/10/30               | Fecha de emisión del reporte: | 2020/11/04                   |

| ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO |                    |                       |                   |           |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|-----------|
| PARÁMETRO               | UNIDAD             | MÉTODO                | FECHA DE ANÁLISIS | RESULTADO |
| $\text{D.B.O}_5$        | mg $\text{O}_2$ /L | 5M 5210 B 5M 4500 O G | 2020/10/30        | 2788      |

NOE FRANCISCO JIMENEZ M.  
Jefe de Laboratorio  
P.O. 0556

TECNO Ambiental S.A.S.  
Asesoría y Laboratorio  
N.T. 227.001.729 - 8

Los resultados indicados como « (menor que) » corresponden a los límites de cuantificación de los métodos de ensayo.  
Muestra realizada por EL SOLICITANTE. En consecuencia los datos que figuran en este Reporte, no constituyen una garantía de la representatividad de la muestra y por tanto se refiere única y exclusivamente a dicha muestra. El laboratorio no es responsable del origen o la fuente de donde ha sido tomada la muestra.  
Resultados válidos únicamente para las muestras analizadas.  
Prohibida la reproducción parcial de este informe sin la autorización de TECNO Ambiental SAS.  
TF0055/REV01 FIN DEL RESULTADO

Anexo B.Resultados de la concentración de  $\text{DBO}_5$  para la muestra del efluente producto del tratamiento B, tomada el día 30 de octubre del año 2020.



**TECNO Ambiental S.a.s.**  
Asesoría y Laboratorio



### RESULTADO DE ANALISIS

Página 1 de 1

**T.A.38927**

|                   |                          |                               |                              |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Solicitante:      | JUAN DIEGO POVEDA ÁVILA  | Dirección:                    | Calle 11 Sur # 11 - 45 Este  |
| Contacto:         | No Reporta               | Teléfonos:                    | 3196245203 - 3123439815      |
| MUESTRA No.       | 2                        | Plan de monitoreo:            | N.A.                         |
| Fecha de toma:    | 2020/10/30               | Hora de Toma:                 | 11:50                        |
| Departamento:     | Meta                     | Municipio:                    | Villavicencio                |
| Vereda/Barrio:    | Agua Clara               | Fuente:                       | Tratamiento de Agua Residual |
| Punto:            | Laboratorio de Aguas     | Lugar de muestreo:            | Universidad Santo Tomás      |
| Coordenadas:      | N:4°07'18" W:73°36'57"   | Altitud:                      | 426msnm                      |
| Clase de muestra: | Agua Residual Industrial | Tipo de muestra:              | Puntual                      |
| Fecha Recepción:  | 2020/10/30               | Fecha de emisión del reporte: | 2020/11/04                   |

### ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

| PARÁMETRO          | UNIDAD               | MÉTODO                  | FECHA DE ANÁLISIS | RESULTADO |
|--------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|-----------|
| D.B.O <sub>5</sub> | mg O <sub>2</sub> /l | SM 5210 B - SM 4500 O G | 2020/10/30        | 496       |

**NOE FRANCISCO JIMENEZ M.**  
Jefe de Laboratorio  
P.01.0056

**TECNO Ambiental S.a.s.**  
Asesoría y Laboratorio  
RIT. 022.001.730 - 0

Los resultados indicados como « (menor que) » corresponden a los límites de cuantificación de los métodos de ensayo.  
Muestreo realizado por **EL SOLICITANTE**. En consecuencia los datos que figuran en este Reporte, no constituyen una garantía de la representatividad de la muestra y por tanto se refiere única y exclusivamente a dicha muestra. El laboratorio no es responsable del origen o la fuente de dónde ha sido tomada la muestra.  
Resultados válidos únicamente para las muestras analizadas.  
Prohibida la reproducción parcial de este informe sin la autorización de TECNOAmbiental SAS.  
TF0055/REV10

FIN DEL RESULTADO

Anexo C. Mapa de ubicación general de algunos productores del clúster de pan de arroz, en el departamento del Meta.

