



**Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la planta de beneficio animal del municipio de Girardot, Cundinamarca.**

Daniela Valentina Cardoso Aragón

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, abril de 2020

**Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación  
para el tratamiento de efluentes generados en la planta de beneficio  
animal del municipio de Girardot, Cundinamarca.**

Daniela Valentina Cardoso Aragón

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Ambiental**

Director:

Wilmar Alirio Botello Suarez

Línea de Investigación:

Manejo integrado de recurso hídrico

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2020

## **Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional**

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

***(Dedicatoria)***

*Dedicado a mi familia, quienes han sido mi apoyo absoluto a lo largo de mi vida, su ayuda y motivación constante me permiten ser cada día mejor. Dedico de igual manera a mis amigas, pues gracias a su apoyo y animo han dejado momentos inolvidables en este camino. Gracias a la vida, el universo, Dios y el destino por cada experiencia vivida.*

## **Agradecimientos.**

Agradecer a cada uno de los profesores que tuve el privilegio de conocer a lo largo de todo este camino formativo profesional. Sin embargo, quiero agradecer especialmente al profesor Wilmar Botello Suarez por aceptar ser el director de este proyecto. Gracias por su guía a lo largo del desarrollo de esta investigación, desde el inicio con la selección del tema y posteriormente direccionando la construcción de este, siempre con paciencia, amabilidad, respeto y rectitud como docente.

De igual manera, quiero agradecer a la empresa Ser regionales, por permitirme realizar este proyecto en base a características especiales que se identificaron en la PTAR que manejan, abriéndome la puerta de sus instalaciones para brindarme los requerimientos necesarios para el desarrollo de este; agradezco al personal de esta empresa por su amabilidad y ayuda en todo momento.

## Tabla de Contenido

<b>1. Resumen</b> .....	13
<b>2. Abstract</b> .....	13
<b>3. Introducción</b> .....	14
<b>4. Planteamiento del problema</b> .....	15
<b>4.1 Preguntas de investigación</b> .....	16
<b>4.1.1 General</b> .....	16
<b>4.1.2 Específicas</b> .....	17
<b>5. Justificación</b> .....	17
<b>6. Objetivos</b> .....	18
<b>6.1 Objetivo general</b> .....	18
<b>6.2 Objetivos específicos</b> .....	18
<b>7. Marco de referencia</b> .....	18
<b>7.1 Estado de arte</b> .....	18
<b>7.1.1 Internacional</b> .....	19
<b>7.1.2 Nacional</b> .....	20
<b>7.2 Marco teórico</b> .....	21
<b>7.2.1 Manejo de Residuos Líquidos:</b> .....	21
<b>7.2.2 Gestión del recurso hídrico:</b> .....	21
<b>7.2.3 Ingeniería en manejo hídrico</b> .....	22
<b>7.2.4 Sistema de tratamiento de aguas residuales</b> .....	22
<b>7.2.5 Calidad del agua</b> .....	22
<b>7.2.6 Procesos fisicoquímicos convencionales para el tratamiento de agua residual</b> .....	23
<b>7.2.7 Procesos Avanzados de Oxidación-POA</b> .....	23
<b>7.2.8 Química verde</b> .....	23
<b>7.3 Marco conceptual</b> .....	25
<b>7.3.1 Agua residual</b> .....	25
<b>7.3.2 Clasificación de agua residual</b> .....	25
<b>7.3.3 Composición de las aguas residuales</b> .....	26
<b>7.3.4 Parámetros fisicoquímicos que se evalúan para el tratamiento del agua residual</b> .....	26

7.3.5 Tipos de tratamiento para aguas residuales .....	27
7.3.6 Tipos de tratamiento para aguas residuales generadas durante el faenado bovino .....	28
7.3.7 Planta de Beneficio Animal .....	34
7.3.8 Proceso de sacrificio de ganado .....	34
7.3.9 Características de los vertimientos generados en los diferentes procesos del sacrificio animal.....	35
7.4 Marco normativo .....	36
7.5 Marco geográfico .....	38
7.5.1 Hidrografía .....	39
7.5.2 Economía.....	39
7.6 Marco institucional .....	41
<b>8. Metodología .....</b>	<b>41</b>
8.1. Metodología primer objetivo específico .....	41
8.1.1 Actividad 1: Visita técnica y recolección de muestra .....	42
8.1.2 Caracterización agua residual. ....	43
8.2 Metodología segundo objetivo específico .....	44
8.2.1 Evaluación del proceso Coagulación-Floculación .....	45
8.2.2. Evaluación proceso Electro-Fenton. ....	46
8.2.3 Evaluación del proceso mixto (C/F+E/F) .....	47
8.2.4 Análisis estadístico. ....	47
8.3 Metodología tercer objetivo específico:.....	48
8.4 Enfoque de Investigación .....	53
8.5 Alcance .....	53
8.6 Métodos .....	53
8.7 Técnicas.....	53
8.8 Instrumentos.....	54
8.9 Plan de Trabajo .....	54
<b>9. Resultados y Discusión .....</b>	<b>54</b>
9.1. Objetivo específico I: Elaborar un diagnóstico ambiental de los vertimientos de aguas residuales generados en la planta de beneficio animal del municipio. ....	54
9.1.1 Identificación del área de estudio .....	54

9.1.2 <i>Recolección de muestra</i> .....	56
9.1.3 <i>Caracterización fisicoquímica del agua residual</i> .....	57
9.2. <i>Objetivo específico II: Analizar la efectividad de los procesos Coagulación-Floculación y Electro-Fenton, considerando la eficiencia de remoción de la carga contaminante y los costos asociados durante el tratamiento de los efluentes de la planta de beneficio.</i> .....	60
9.2.1 <i>Coagulación-Floculación (C/F)</i> .....	60
9.2.1.1 <i>Efecto del pH</i> .....	61
9.2.1.2 <i>Efecto de la concentración de coagulante</i> .....	63
9.2.2 <i>Electro-Fenton (E/F)</i> .....	67
9.2.2.1 <i>Relación molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe + 2</i> .....	68
9.2.2.2 <i>Efecto del tiempo de reacción</i> .....	70
9.2.2.3 <i>Efecto del pH</i> .....	71
9.2.3 <i>Proceso Mixto</i> .....	75
9.3 <i>Objetivo específico III: Calcular el índice de química verde para cada uno de los procesos evaluados como medida para seleccionar la alternativa de mayor viabilidad desde el punto de vista ambiental.</i> .....	79
9.3.1 <i>Coagulación-Floculación</i> .....	79
9.3.2 <i>Electro-Fenton</i> .....	84
9.3.3 <i>Mixto</i> .....	90
10. <b>Conclusiones</b> .....	98
11. <b>Recomendaciones</b> .....	98
12. <b>Referencias bibliográficas</b> .....	99
13. <b>Anexos</b> .....	107

## Lista de Tablas

Tabla 1. Principios de Química Verde. ....	24
Tabla 2. Influencia de la dosis de coagulante. ....	31
Tabla 3. Normativa nacional aplicada al proyecto. ....	36
Tabla 4. Límites geográficos municipio. ....	39
Tabla 5. Marco institucional. ....	41
Tabla 6. Factor de biodegradabilidad en base a la relación DBO/DQO ....	43
Tabla 7. Metodología empleada para la evaluación de parámetros fisicoquímicos. ....	44
Tabla 8. Volumen de coagulante requerido para cada concentración. ....	46
Tabla 9. Variables independientes. ....	47
Tabla 10. Porcentaje de cumplimiento principios de química verde. ....	49
Tabla 11. Criterios para la evaluación de sustancias envueltas en los procesos químicos. ..	49
Tabla 12. Criterios de evaluación principios de la química verde. ....	50
Tabla 13. Caracterización fisicoquímica. ....	58
Tabla 14. Factor de biodegradabilidad de cada punto de muestreo. ....	59
Tabla 15. Resultados de turbidez y DQO para los valores de pH evaluados. ....	61
Tabla 16. Resultados de turbidez y DQO para las concentraciones de coagulante evaluados. ....	64
Tabla 17. Relación molar $H_2O_2/Fe^{+2}$ ....	68
Tabla 18. Parámetros fisicoquímicos en relación con la eficiencia de la relación molar. ....	69
Tabla 19. Parámetros fisicoquímicos con relación al tiempo. ....	70
Tabla 20. Parámetros fisicoquímicos en relación con el pH. ....	72
Tabla 21. Condiciones de operación usadas en el proceso E/F. ....	75
Tabla 22. Condiciones de operación usadas en el proceso Mixto. ....	75
Tabla 23. Parámetros fisicoquímicos del proceso mixto. ....	76
Tabla 24. Prueba sólidos volátiles. ....	76

Tabla 25. Recopilaciones principales resultados de las tres alternativas de tratamiento. ....	77
Tabla 26. Matriz de evaluación proceso Coagulación-Floculación basada en los criterios establecidos por Ribeiro et al, 2010. ....	81
Tabla 27. Calificación general de los principios de química verde. ....	83
Tabla 28. Datos para la construcción del gráfico Estrella Verde. ....	83
Tabla 29. Matriz de evaluación del proceso Electro-Fenton basada en los criterios establecidos por Ribeiro et al, 2010. ....	86
Tabla 30. Calificación general de los principios de química verde. ....	88
Tabla 31. Datos para la construcción del gráfico Estrella Verde. ....	89
Tabla 32. Matriz de evaluación del proceso Mixto basada en los criterios establecidos por Ribeiro et al, 2010. ....	92
Tabla 33. Calificación general de los principios. ....	96
Tabla 34. Datos para la construcción del gráfico Estrella Verde. ....	96

### **Lista de Figuras.**

Figura 1. Neutralización de cargas en presencia de coagulante. ....	29
Figura 2. Coagulación por adsorción. ....	30
Figura 3. Coagulación por barrido. ....	30
Figura 4. Interacciones presentes dentro de una celda electroquímica durante el proceso Electro-Fenton. ....	33
Figura 5. Ubicación geográfica de Girardot. ....	38
Figura 6. Ubicación de la PBA dentro del barrio San Miguel-Girardot, Cundinamarca. ....	40
Figura 7. Ubicación PBA dentro de Girardot, Cundinamarca. ....	40
Figura 8. Diagrama de proceso metodología objetivo específico I. ....	42
Figura 9. Diagrama de proceso metodología objetivo específico II. ....	45
Figura 10. Montaje de una celda electroquímica. ....	46
Figura 11. Diagrama de proceso metodología objetivo específico III. ....	48
Figura 12. Estructura gráfico de radar para la construcción de la estrella verde. ....	50

Figura 13. Infraestructuras que conforman la PTAR presente en la PBA de Girardot, Cundinamarca. ....	56
Figura 14. Configuración de la PTAR de la PBA. ....	57
Figura 15. Ensayo de jarras para la determinación de la dosis ideal de coagulante. ....	63
Figura 16. Ensayo de jarras para la evaluación del coagulante FeSO <sub>4</sub> a diferentes concentraciones. ....	65
Figura 17. Montaje celda electroquímica. ....	67
Figura 18. Prueba relación molar H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>+2</sup> transcurrido 24 horas desde su realización. ...	68
Figura 19. Diagrama de flujo del proceso Coagulación-Floculación. ....	80
Figura 20. Diagrama de flujo del proceso Electro-Fenton. ....	85
Figura 21. Diagrama de flujo del proceso Mixto. ....	91

### Lista de Gráficas

Gráfica 1. Determinación del pH ideal a partir de la disminución de turbidez y porcentaje de remoción de DQO. ....	62
Gráfica 2. Comportamiento de la turbidez y porcentaje de remoción de DQO bajo diferentes concentraciones de coagulante. ....	64
Gráfica 3. Test de Tukey. ....	66
Gráfica 4. Porcentaje de remoción de DQO y disminución de turbidez en base a la relación molar H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>+2</sup> . ....	69
Gráfica 5. Porcentaje de remoción de DQO y disminución de turbidez en base al transcurso del tiempo. ....	71
Gráfica 6. Comportamiento del pH a través del tiempo de reacción. ....	72
Gráfica 7. Disminución de la DQO y turbidez en base al pH. ....	73
Gráfica 8. Test de Tukey. ....	74
Gráfica 9. Porcentaje de remoción contaminante para cada proceso evaluado. ....	78
Gráfica 10. Estrella Verde del proceso Coagulación-Floculación. ....	84
Gráfica 11. Estrella Verde del proceso Electro-Fenton. ....	89
Gráfica 12. Estrella Verde del proceso Mixto. ....	97

## Lista de Abreviaturas

ARF	Agua Residual de Frigorífico
Cl	Cloruro
FeCl <sub>3</sub>	Cloruro de Hierro
C/F	Coagulación-Floculación
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
E/F	Electro-Fenton
KΩ	Kiloohmio
μS	microsiemens
NO <sub>3</sub>	Nitrato
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de Hidrógeno
PBA	Planta de Beneficio Animal
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
POA	Proceso de Oxidación Avanzada
PPT	Partes por billón
RPM	Revoluciones por minuto
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SSED	Sólidos Sedimentables
ST	Sólidos Totales
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfato
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Sulfato de Aluminio
FeSO <sub>4</sub>	Sulfato de Hierro
FAU	Unidades de Atenuación de Formacina
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
PCU	Unidades de Platino-Cobalto

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

## 1. Resumen

Las aguas residuales de frigorífico (ARF) presentan una alta carga contaminante, la cual debe ser estabilizada apropiadamente antes de su vertimiento. El objetivo del presente estudio consistió en la evaluación de los procesos de Coagulación-Floculación (C/F) y Electro-Fenton (E/F) como alternativas de tratamiento de las ARF generadas en la planta de beneficio animal del municipio de Girardot (Cundinamarca). Para ello, inicialmente se realizó la caracterización fisicoquímica de muestras de ARF colectadas en dicha planta. Posteriormente, fueron determinadas las variables operacionales óptimas de cada proceso, correspondientes a pH y dosis de coagulante (para C/F), y relación molar  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}$ , pH y tiempo de reacción (para E/F). Para establecer el desempeño de estas alternativas fue estimado el porcentaje de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Turbidez. También fue evaluada una aproximación integrada (C/F+E/F) y estimada la química verde de cada estrategia. Se encontró que los procesos C/F, E/F e integrado tuvieron, respectivamente, una remoción de 85%, 91,4% y 96,4% para DQO, y de 98%, 99,3% y 97,3% para turbidez. La estrategia C/F presentó el mayor acercamiento verde. En términos de desempeño operacional, se concluye que la opción C/F+E/F es la más promisoría para la remoción de la carga contaminante de ARF. No obstante, teniendo en cuenta que el efluente obtenido en cada una de las tres opciones evaluadas cumplió con los parámetros de vertimiento establecidos en la normatividad, el proceso C/F presentó una ventaja adicional, al requerir menor inversión (COP\$7000/m<sup>3</sup>) y presentar un mayor acercamiento verde (61%).

**Palabras clave:** *Demanda Química de Oxígeno, Procesos de tratamiento convencionales, Turbidez, Química verde.*

## 2. Abstract

Slaughterhouse wastewater (SWW) has a high pollutant load, which must be properly stabilized before discharge. The objective of this study is to evaluate the Coagulation-Flocculation (C/F) and Electro-Fenton (E/F) processes as treatment alternatives for the SWW generated in the animal benefit plant of the municipality of Girardot (Cundinamarca). For this, the physicochemical characterization of SWW samples collected in this plant was performed. Subsequently, the optimal operational variables of each process were corresponding, corresponding to pH and coagulant dose (for C/F), and  $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe} + 2$  molar ratio, pH and reaction time (for E/F). To establish the performance of these alternatives, the percentage of removal of the Chemical Oxygen Demand (COD) and Turbidity was estimated. An integrated approach (C/F + E/F) was also limited and the green chemistry of each strategy was estimated. The C/F, E/F and integrated processes were found to have, respectively, a removal of 85%, 91.4% and 96.4% for COD, and 98%, 99.3% and 97.3% for turbidity. The C/F strategy presented the greatest green approach. In terms of operational performance, it is concluded that the C/F + E/F option is the most promising for the removal of the contaminating load of SWW. However, taking into account that the effluent obtained in each of the three options evaluated complied with the discharge parameters established in the regulations, the C/F process presented an additional advantage, as it required less investment ( COP \$ 7000 / m<sup>3</sup> ) and present a greater green approach (61%).

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

**Keywords:** *Chemical Oxygen Demand, Conventional treatment processes, Green chemistry, Turbidity.*

### 3. Introducción

El comercio de carne es una de las actividades económicas más rentables a nivel mundial. En el año 2016, la producción mundial cárnica se estimó en 37 millones de toneladas, manteniéndose la perspectiva para los productores de este sector de manera favorable. (FAO,2017). Según Fedegan, en Colombia para el año 2018 se registró una producción cárnica de 935 Ton., lo cual corresponde al sacrificio de aproximadamente 4 millones de cabezas de ganado (Fedegan, 2018). Esta actividad contribuye en gran medida a la demanda hídrica del sector pecuario, la cual corresponde a 3.059,5 millones de  $m^3$  (8,5% de la demanda hídrica nacional) (SIAC,2015).

En la realización del sacrificio de bovinos y de los procesos sanitarios asociados, se estima un consumo de agua de aproximadamente 5 litros por cada kilo de peso vivo de la res(Industrial, 2008).En consecuencia, esta actividad genera un volumen considerable de aguas residuales, las cuales se caracterizan por tener altas concentraciones de carga orgánica contaminante, producto de la sangre y contenidos estomacales e intestinales, con rangos que oscilan entre 150-4635 mg/L y 500-15900 mg/L para demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), respectivamente (Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015) ;así mismo, estos efluentes presenta concentraciones elevadas de sólidos en suspensión producto de pelos, contenidos estomacales y estiércol, entre otros. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2015).

La Agencia ambiental de Protección Ambiental de los Estados Unidos-US EPA, en el año 2004, consideró a las aguas residuales de matadero como uno de los principales residuos industriales de tipo agrícola y alimentario, además de clasificarlas como uno de los efluentes más dañinos al medio ambiente (US EPA, 2004). Por lo tanto, debido al alto potencial contaminante, el vertimiento de este tipo de efluentes sin un tratamiento apropiado representa un riesgo a nivel ambiental y sanitario, al constituir una fuente de eutrofización y producir un efecto adverso sobre la vida acuática, generando entre otras problemáticas la desoxigenación de fuentes hídricas receptoras (Rodas & Botello,2016).

En Colombia existe una alta insuficiencia técnica, operativa y de infraestructura en relación a los sistemas de tratamiento de efluentes de frigorífico. Para el año 2017 el 90% de las plantas de beneficio animal del país presentaban falencias en la disposición final de las aguas residuales puesto que el 47% de estas vierte el efluente directamente a una fuente hídrica o sistema de alcantarillado, el 33% carecen de planes de gestión con respecto al uso de la sangre producto del proceso de sacrificio y faenado y el 57% carecen de presupuesto para el tratamiento del agua residual(Agencia de Noticias UN, 2017).Adicionalmente, dentro de las plantas de sacrificio animal que cuentan con sistemas de tratamiento, es necesario desarrollar estudios encaminados a mejorar su desempeño. Un claro ejemplo de este panorama lo representa la planta de beneficio animal del municipio de Girardot (Cundinamarca), la cual sacrifica en promedio 30 reses diarias, y cuenta con un sistema de estabilización convencional susceptible de optimización.

Las tecnologías adoptadas para la estabilización de efluentes de frigorífico son frecuentemente similares a las empleadas actualmente en el tratamiento de aguas residuales municipales. Estas incluyen tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario, dividido en procesos tales como el tratamiento fisicoquímico, tratamiento biológico, procesos de oxidación avanzada (POA) y procesos combinados (Valta et al.,2015). Por ejemplo, en países como Canadá, los mataderos de ciertas provincias pueden

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

descargar sus efluentes directamente en el sistema de alcantarillado municipal una vez han demostrado que mediante un tratamiento preliminar a las aguas se reduce la carga de DBO(Mittal,2006).

Teniendo en cuenta que los efluentes de frigorífico presentan un alto contenido de materia orgánica biodegradable, los procesos de tratamiento biológico basados en la estabilización anaerobia o aerobia del efluente, o la aplicación de sistemas integrados son altamente aceptados (Chan, Chong, Law, & Hassell, 2009). No obstante, el existo de estas aproximaciones requiere un riguroso control operacional, y la estabilización del efluente, en términos de remoción de carga contaminante de difícil degradación y nutrientes, puede llegar a ser insatisfactoria (Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015). Esto, sumado a la necesidad de emplear altos tiempos de retención hidráulica para su operación, y a las crecientes exigencias de las normativas ambientales en materia de vertimientos (en relación con las expectativas determinadas para el cumplimiento de límites y estándares de descarga) (Paramo-Vargas et al., 2015), conduce a la necesidad de evaluar otras estrategias que permitan optimizar el proceso de tratamiento.

Los procesos de tratamiento de efluentes de frigorífico tales como la Coagulación-Floculación han sido utilizados para la estabilización de la carga contaminante con diferente grado de éxito. El uso de coagulantes a base de sales de hierro y aluminio son potencialmente efectivos para la eliminación de sólidos en suspensión, macromoléculas, partículas coloidales y compuestos orgánicos hidrófobos. Por otra parte, POA tales como Electro-Fenton, actualmente han tenido un creciente interés en su aplicación para el tratamiento de aguas residuales industriales, debido a que presentan efectividad para la eliminación de contaminantes recalcitrantes, y además reducen la producción de lodos, tiempo de reacción corto y bajo consumo de energía(Paramo-Vargas et al.,2015).No obstante, la aplicación de estos procesos requiere mayor investigación, principalmente asociada a la posibilidad de integrar estos sistemas a fin de obtener mayores niveles de eficiencia y reducir los costos relacionados al consumo de reactivos.

Por lo anteriormente descrito, el principal objetivo de este estudio fue evaluar los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación como alternativas de tratamiento de aguas residuales generadas en la planta de beneficio animal del municipio de Girardot, Cundinamarca. Las variables operacionales de estos dos procesos, tales como la concentración de agentes químicos, pH y tiempo de reacción fueron optimizadas. Además, fueron comparados los niveles de remoción de materia orgánica de estas estrategias individualmente y de forma integrada, buscando aumentar la eficiencia de tratamiento. Finalmente, con el propósito de establecer la idoneidad de estas estrategias desde el punto de vista ambiental, fue adaptada una metodología para estimar la química verde de cada estrategia de tratamiento. Los datos obtenidos en este proyecto constituyen un aporte al estudio de procesos de estabilización de efluentes de frigorífico, y a la posibilidad de optimización del sistema de tratamiento establecido en la planta de beneficio animal del municipio de Girardot.

#### **4. Planteamiento del problema**

El procesamiento cárnico es una de las actividades que mayor demanda hídrica requiere. A nivel mundial, este proceso consume el 24% del agua dulce utilizada en el sector industrial alimenticio y el 29% del agua utilizada por el sector pecuario. En consecuencia, esta actividad genera un volumen considerable de efluentes, cuya composición está representada principalmente por la presencia de altas concentraciones de materia orgánica (grasas, proteínas y polisacáridos) y nutrientes, los cuales representan un serio riesgo ambiental y sanitario, en caso de ser vertidos a sistemas hídricos receptores sin experimentar un proceso de tratamiento apropiado (Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015).

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Colombia presenta serias deficiencias técnicas y operativas en relación a la eficiencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales generadas en la industria frigorífica. Según datos de la agencia de noticias de la universidad Nacional de Colombia (2017), aproximadamente el 90% de las plantas de beneficio animal del país no cuentan con sistemas de tratamiento de efluentes o planes de gestión integral de residuos líquidos eficientes. Adicionalmente, en la mayoría de los casos se desconoce la eficiencia real de los frigoríficos, en materia de remoción apropiada de la carga contaminante, lo cual supone fallas operativas o relacionadas con la infraestructura de estos procesos, y en consecuencia el incumplimiento de las disposiciones establecidas en normativas ambientales.

El municipio de Girardot (Cundinamarca) cuenta con una planta de sacrificio de bovinos que trata los efluentes que genera en las diversas etapas del beneficio. Este sistema de tratamiento (construido en 1999) tiene la capacidad para realizar el tratamiento convencional, enfocado principalmente a la remoción de sólidos suspendidos de las aguas residuales, con un porcentaje de remoción de carga contaminante que oscila de 60 a 70%. En consecuencia, considerando la alta carga orgánica de los efluentes tratados, y a la necesidad de sacrificio constante, este proceso puede presentar falencias, lo cual eventualmente imposibilita el vertimiento de los efluentes generados.

Este es uno de los municipios presentes en el departamento que cuenta con un sistema de tratamiento para efluentes provenientes del sacrificio animal. La planta de beneficio animal presente en el municipio cuenta dentro de sus instalaciones con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con la capacidad para realizar un tratamiento primario de los efluentes. Esta PTAR fue construida en el año 1999 y actualmente maneja un porcentaje de remoción de carga orgánica contaminante de 60 a 70%.

Para el año 2016, la Contraloría de Cundinamarca realizó la auditoria gubernamental con enfoque integral -Modalidad Especial Ambiental. En este informe afirmó que: *“la PTAR de la planta de beneficio animal no funciona correctamente, no se encuentra en buenas condiciones, hay presencia de olores ofensivos, por tanto, se cumple parcialmente con lo establecido en el Decreto 3930 de 2010 y la sentencia del 28 de marzo de 2014, saneamiento del Río Bogotá”* (p.35). En consecuencia, la necesidad de optimización de este proceso es una problemática ambiental crítica que requiere ser atenuada mediante el estudio de alternativas y aplicación de procesos encaminados a obtener un mejor proceso de tratamiento.

En la actualidad existen diversas opciones de tratamiento de efluentes de frigorífico, siendo los procesos de Coagulación-Floculación y oxidación avanzada (basada principalmente en la reacción de Fenton), algunas de las más promisorias. No obstante, en literatura científica ha sido poco explorado la posibilidad de evaluar estas operaciones en conjunto, a fin de obtener una mejor calidad del efluente. Así mismo, tampoco se ha considerado evaluar la capacidad de estas tecnologías, mediante la descripción de la química verde del proceso. Consecuentemente, el presente estudio busca dar un aporte a la resolución de las problemáticas anteriormente descritas.

## **4.1 Preguntas de investigación**

### **4.1.1 General**

¿Cuál es la mejor alternativa para disminuir la carga orgánica para el tratamiento de efluentes generados en la planta de beneficio animal del municipio de Girardot (Cundinamarca), considerando los procesos de Coagulación-Floculación y Electro-Fenton, y teniendo en cuenta los requerimientos de manejo de aguas residuales según lo establecido en las normas ambientales y sanitarias actuales?

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

#### **4.1.2 Específicas**

- ¿El sistema de tratamiento de agua residual actual cumple con los valores máximo permitidos según la Resolución 631 de 2015?
- ¿Los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación son los ideales para ser aplicados en el tratamiento de las aguas residuales de frigorífico?

### **5. Justificación**

En el país, gran parte de los sistemas de tratamiento de efluentes de frigorífico presentan dificultades de operación a nivel técnico y de infraestructura (Acero et al., 2013). Esto conduce a la necesidad apremiante para el estudio y desarrollo de estrategias que posibiliten la optimización de dichos sistemas. Un caso específico de este panorama se puede evidenciar en la planta de beneficio animal del municipio Girardot, (Cundinamarca), la cual presenta falencias en términos de remoción de la carga contaminante de los efluentes generados, producto de diferentes residuos incorporados al agua de proceso empleada durante cada una de las etapas de sacrificio animal (Contraloría de Cundinamarca, 2016).

Teniendo en cuenta que la PTAR es susceptible de optimización puesto que los procesos de tratamiento empleados actualmente carecen de la eficiencia adecuada para la disminución de la carga contaminante requerida por la normativa, se ve la necesidad de evaluar otras alternativas de mayor eficiencia para la eliminación de material orgánico, de manera que se pueda disminuir la carga contaminante aportada por la actividad de sacrificio bovino al sistema de alcantarillado y posteriormente a cuerpos hídricos como lo es el río Bogotá, fuente receptora de las aguas residuales producidas en el municipio.

Diferentes estudios han obtenido altas eficiencias de remoción de la carga orgánica presente en ARF empleando procesos de Coagulación-Floculación (C/F) y procesos de oxidación avanzada (POA) tales como Foto-Fenton y Electro-Fenton (E/F) (Bustillo-Lecompte and Mehrvar, 2015). El proceso de C/F es relativamente maduro, rentable y de fácil implementación (Ayeche 2012; Rodrigues et al. 2017; Rodrigues, Boaventura, and Madeira 2014), y se fundamenta en la desestabilización de las partículas coloidales que se logra mediante el uso de un coagulante para facilitar su aglomeración (Angulo Bedoya et al., 2008). El proceso E/F se considera ecológico pues emplea reactivos de reducida toxicidad y, permite llevarse a cabo a temperatura ambiente y a presión atmosférica, lo cual facilita su operación y reduce los costos asociados a su implementación (Gomes de Barros et al. 2020).

Una de las ventajas más atractivas de estos procesos es que pueden ser integrados con la finalidad de obtener mayores niveles de eficiencia. Esta opción ha sido explorada en un diverso tipo de efluentes industriales, tales como aguas residuales de procesamiento de café (Gomes de Barros et al. 2020), o vinazas producto de la industria sucro-energética (Rodrigues et al. 2017). No obstante, en literatura científica son escasas las aproximaciones conducentes a tratar ARF empleando estos dos procesos de forma conjunta, a fin de reducir simultáneamente la concentración de sólidos en suspensión y de materia orgánica del efluente. Adicionalmente, el impacto ambiental de estas alternativas, en relación al cumplimiento de los objetivos de la química verde (considerando el efluente resultante como un producto

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

del proceso), no ha sido descrita en detalle, y se desconoce el acercamiento verde que puedan tener estas tecnologías.

Por lo anteriormente descrito, el desarrollo de este estudio buscó la optimización de las variables operacionales asociadas a los procesos de C/F y E/F, de forma individual e integrada, para el tratamiento del ARF generada en la planta de beneficio animal de Girardot. Así mismo, el diseño experimental propuesto propuso describir el acercamiento verde de estas estrategias y los costos asociados al consumo de reactivos. Todo esto posibilitó, i. Obtener un diagnóstico del ARF generada en el frigorífico a través de caracterización físico-química; ii. Determinar cuál de las estrategias es más eficiente en términos de remoción de carga orgánica en comparación a otras tecnologías y iii. Establecer su acercamiento verde y opciones de optimización. Por tanto, el desarrollo de este estudio constituye un aporte al estudio de procesos de tratamiento de ARF en general, y a la posibilidad de implementación de sistemas de mayor eficiencia para el tratamiento de estos efluentes en nuestra región, específicamente en la planta de beneficio animal del municipio de Girardot.

## **6. Objetivos**

### ***6.1 Objetivo general***

Evaluar los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación como alternativas de tratamiento de aguas residuales producidas en la planta de beneficio animal del municipio de Girardot, Cundinamarca

### ***6.2 Objetivos específicos***

1. Elaborar un diagnóstico ambiental de los vertimientos de aguas residuales generados en la planta de beneficio animal del municipio.
2. Analizar la efectividad de los procesos de Coagulación-Floculación y Electro-Fenton, considerando la eficiencia de remoción de la carga orgánica y las variables operacionales durante el tratamiento de los efluentes de la planta de beneficio.
3. Calcular el índice de química verde para cada uno de los procesos evaluados como medida para seleccionar la alternativa de mayor viabilidad desde el punto de vista ambiental.

## **7. Marco de referencia**

### ***7.1 Estado de arte***

Usualmente, el tratamiento de las aguas residuales de matadero se ha enfocado en la implementación de procesos anaerobios que permitan la disminución de componentes orgánicos biodegradables. Comúnmente, los procesos biológicos que se emplean pueden ser lodos activados, pozos de estabilización, reactores anaerobios y procesos combinados. Aunque estos procesos son exitosos para el tratamiento de este tipo de efluente, generalmente requieren de tiempos de retención hidráulica extensos y creación de gran cantidad de lodos (Ozturk & Erdem Yilmaz, 2019). En busca de soluciones a estas dificultades, se han evaluado la implementación de procesos aerobios y de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales de frigorífico.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Estudios correspondientes a la evaluación de procesos de oxidación avanzada tales como Electro-Fenton y oxidación electroquímica, han demostrado ventajas en la disminución considerable de parámetros fisicoquímicos como DBO, DQO y color real del efluente; otra de sus ventajas es el bajo consumo de energía que requieren para obtener una alta eficiencia de remoción (Ozturk & Erdem Yilmaz, 2019). Por otra parte, procesos de tratamiento convencional como lo es la coagulación, han sido empleados para la reducción en el volumen de lodos generados y la remoción de fósforo, nitrógeno y amonio (Mittal, 2006).

Es en base a esto que la construcción del presente estado de arte se basó en la revisión bibliográfica de diferentes artículos científicos y trabajos de investigación en donde se ha evaluado y aplicado los diferentes procesos de tratamiento para aguas residuales de matadero, tanto a nivel internacional como nacional.

### **7.1. 1 Internacional**

Primeramente, se encuentra el artículo de revisión titulado “*Características, tratamiento y gestión de las aguas residuales de matadero: Una revisión de tendencias y avances*”, en el cual se presenta una breve caracterización de las aguas residuales que se generan en un frigorífico, tomando como referencia los límites mundiales estándar de los valores máximos permisibles para parámetros como DBO, DQO y SST. De igual forma, presenta una revisión sistemática sobre diferentes tipos y procesos de tratamiento que se pueden aplicar a estos efluentes, como lo son procesos de tratamiento anaerobio, aerobio y de oxidación avanzada. Uno de los más relevantes para este trabajo es el tratamiento por medio de Coagulación y Floculación usando diferentes compuestos químicos como lo son el sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico y clorhidrato de aluminio, los cuales han demostrado buena eficiencia para la remoción de contaminantes (Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015). El aporte de esta investigación es principalmente aportar información acerca de los procesos y sistemas de tratamiento que se emplean usualmente para el tratamiento de aguas residuales provenientes de actividades de sacrificio y beneficio animal.

Posteriormente, en el artículo de investigación “*Aplicación del proceso Electro-Fenton como alternativa para el tratamiento de efluentes de matadero*”, se presenta el estudio de la actividad electrocatalítica que poseen electrodos hechos de materiales anódicos como  $TiRuO_2/CF$ ,  $Ti-PdPtOx/CF$  y  $BDD/CF$  para el tratamiento de aguas residuales provenientes de industria frigorífica y de sacrificio animal. Para ello, se utilizó un sistema electroquímico conformado por un reactor Bach de 1 L, con agitación constante a 350 rpm. Cada uno de los electrodos (con dimensiones de 15 cm x 5 cm x 1mm) fueron conectados a una fuente de alimentación (0-18 V y 5 A); estos tuvieron un área de contacto con el agua residual de  $60\text{ cm}^2$  y se agregó Sulfato de Hierro ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) para la realización de la reacción Fenton. Este estudio encontró que la eliminación de DQO en la utilización del electrodo  $TiRuO_2/CF$ ,  $Ti-PdPtOx/CF$  y  $BDD/CF$  fue de 83,5 %, 77,9 % y 74,3 % respectivamente. Además, se determinó que la tendencia de degradación de contaminantes depende principalmente de la producción de radicales hidroxilos (OH) en cada uno de los materiales anódicos. Finalmente se concluyó que el mejor electrodo fue  $TiRuO_2/CF$ , debido a que produjo más bajas concentraciones de cloro libre y valores más bajos en la DQO final (Paramo-Vargas et al., 2015). Este artículo aporta a este proyecto principalmente información acerca del funcionamiento del proceso Electro-Fenton y la efectividad de este al usar electrodos de diferentes materiales conductores de energía.

Por otra parte, el artículo “*Tratamiento de las aguas residuales de matadero usando procesos de oxidación avanzada: Estudio de optimización*”, se evalúa la tratabilidad del agua de matadero de aves de

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

corral a través de la implementación del proceso Electro-Fenton bajo la metodología de superficie de respuesta. Para esto, se planteó la evaluación de cinco variables independientes: el pH, el tiempo de reacción, la relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$ , la densidad de corriente y la relación volumen  $H_2O_2/ARM$ . El diseño del experimento para la evaluación de la efectividad del proceso consistió en la utilización de un vaso precipitado con capacidad de  $500\text{ cm}^3$  como reactor. Los electrodos fueron dos placas de hierro rectangulares ( $2\text{ cm} \times 0,5\text{ cm}$ ), las cuales fueron colocadas a una distancia de 3 cm con respecto a la otra. Se utilizó una alícuota de  $250\text{ cm}^3$  de agua residual y se agregó volúmenes de peróxido de hidrógeno (con una pureza de 30%) y Sulfato de Hierro ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) para la reactividad de la reacción Fenton. Posteriormente los electrodos fueron conectados a una fuente de alimentación directa (30 V y 3 A). Todos los experimentos se realizaron bajo presión atmosférica, temperatura constante de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  y una velocidad de agitación de 400 rpm. Al finalizar el tiempo de cada experimento, la solución fue dejada en reposo durante 30 minutos con el fin de lograr la sedimentación de sólidos suspendidos y lodos. Este estudio encontró que la eliminación óptima de contaminantes se dio a un valor de pH 4,38; así mismo, el tiempo de reacción ideal se sitúa entre un rango de 55 a 60 minutos, una relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$  ideal de 3,73 y una relación volumen  $H_2O_2/ARM$  de 1,44 ml (Davarnajad & Nasiri, 2017). El aporte de esta investigación es de carácter metodológico, puesto que para la evaluación del proceso Electro-Fenton a escala laboratorio se tomó el montaje propuesto aquí. Además, se tomó de este las variables independientes sujetas de evaluación: pH y relación molar.

Por último, se encuentra el trabajo *“Recuperación de aguas residuales de planta de procesamiento por coagulación, filtración de arena y ultrafiltración”*, el cual tuvo como objetivo la optimización del proceso coagulación como un pretratamiento de los efluentes secundarios generados en la planta de procesamiento para posteriormente ser tratado a través de un sistema de filtración de arena y en último ultrafiltración, con el fin de que posteriormente el efluente tenga una calidad adecuada para su reutilización en la planta de procesamiento y uso de riego, de acuerdo a lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos- EPA. El diseño metodológico para ensayo de jarras requerido para la evaluación del proceso de coagulación consistió en tomar 6 vasos precipitados con capacidad de 1 L cada uno y agregar agregó 200 mL del agua residual estudio respectivamente. Para el proceso se determinó la evaluación de 4 tipos de coagulantes: Solución  $FeCl_3$  (40 w/v %),  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ , Aquaklar A (10 w/v %  $Al_2O_3$ ) y Aquaklar C (18 w/v %  $Al_2O_3$ ) a un pH de 4.5, 5.5 y 7.5. El ensayo inició con la adición de coagulante mientras la muestra era agitada a 220 rpm durante 3 minutos, luego a 30 rpm por 30 minutos y luego 30 minutos de precipitación. Los resultados arrojaron que el coagulante más eficiente en la disminución del carbono orgánico total y turbidez fue  $FeCl_3$  a valores de pH 4.5-5.5 (Racar et al., 2019). Este estudio aporta la metodología principal en la cual se basó la evaluación del proceso coagulación-floculación. Además, de esta investigación se tomó el montaje requerido para el ensayo de jarras.

### **7.1.2 Nacional**

A nivel nacional, se encontró un documento titulado *“Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero: Para poblaciones menores a 2000 habitantes”*, en el cual se revisó los métodos de tratamiento primario (físicoquímico), secundario (biológico), tratamiento terciario para aguas residuales de matadero. De igual manera se presentan criterios que se deben tener en cuenta para realizar la caracterización de las aguas residuales provenientes del proceso del sacrificio animal, la aplicabilidad de cada uno de los procesos y consideraciones a tener en cuenta para su implementación. Dentro de sus conclusiones se indica que los sistemas de tratamiento recomendados para poblaciones pequeñas desde un punto de vista técnico son aquellos de tipo aerobio y anaerobio combinado, de manera que se

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

implemente en primer lugar un tratamiento preliminar, seguido de un tratamiento primario y finalizar con un tratamiento secundario (Muñoz, 2005). El aporte de este documento es principalmente como soporte bibliográfico acerca de las características generales de las aguas residuales, de manera que se puede identificar los contaminantes principales de estas y a partir de ahí poder formular alternativas y procesos de tratamientos eficientes en este tipo de agua residual.

Por otra parte, se encontró el trabajo de grado “*Evaluación de un tratamiento de floculación-flotación para el agua residual generada en el procesamiento de subproductos avícolas*” cuyo objetivo fue evaluar la remoción de la carga orgánica contaminante presente en aguas residuales provenientes del procesamiento de subproductos avícolas mediante un proceso de floculación/flotación. La evaluación de la efectividad del proceso consistió en la evaluación de tres tipos de aguas provenientes del procesamiento de subproductos avícolas, cada una con diferentes características. Posterior a esto, se desarrollaron varias pruebas de jarras consistentes en la adición de cada uno de los agentes coagulantes a evaluar: Superfloc C-572, superfloc c498 y superfloc A130HMW. Los resultados arrojaron que posterior al tratamiento de las diferentes muestras de agua residual, el pH de estas presentó un aumento no significativo, por lo que la adición de agentes químicos no influye en esto y por lo tanto, el proceso de floculación/flotación podría trabajar de manera eficaz en un rango amplio de valores de pH. En conclusión, se obtiene que el proceso tiene como función principal la remoción de partículas y, gracias al proceso de oxidación que se genera la remoción de la DQO soluble es más fácil (Cano, 2015). Este trabajo de grado aporta específicamente como soporte de información general acerca del proceso coagulación y floculación aplicado en el manejo de efluentes de frigorífico.

Es necesario resaltar que a nivel nacional no se reportan investigaciones con respecto a la evaluación y/o implementación de procesos de oxidación avanzada como tratamientos de aguas residuales de mataderos, pese a que investigaciones internacionales han demostrado que estos procesos, específicamente Electro-Fenton presenta alta efectividad en la eliminación de contaminantes presentes en el agua, baja producción de lodos y el consumo de energía y reactivos es bajo (Paramo-Vargas et al., 2015).

## **7.2 Marco teórico**

### **7.2.1 Manejo de Residuos Líquidos:**

El presente proyecto está principalmente orientado en el manejo y tratamiento adecuado de los residuos líquidos generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio de Girardot, Cundinamarca durante las etapas de producción cárnica por medio de la optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales con los que actualmente cuenta la empresa.

Según la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, la gestión integral de los residuos se puede definir como “es el conjunto de operaciones y disposiciones encaminadas a dar a los residuos producidos el lugar de disposición final más adecuado desde el punto de vista ambiental, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costo de tratamiento, posibilidades de recuperación, comercialización y disposición final”. (UNGRD, 2016)

### **7.2.2 Gestión del recurso hídrico:**

Este proyecto de grado se encuentra enfocado en proponer una alternativa para optimizar un sistema que trata las aguas residuales provenientes de un proceso productivo que influye de manera directa en los vertimientos que se generan a cuerpos hídricos superficiales de gran importancia a nivel nacional

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

como lo es el río Bogotá. Es por esto que, se ve como un aspecto importante a tener en cuenta la gestión del agua, en base a estrategias que busquen minimizar los impactos que se genera a este recurso.

Actualmente, órganos administrativos de control y administración pública del país como lo es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible específicamente, define la Gestión Integral del Recurso Hídrico como *“Un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales”* (Minambiente, 2019)

Dicha gestión debe plantearse a través de programas y políticas públicas orientadas al uso eficiente del agua, en concordancia con los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios y los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.

### ***7.2.3 Ingeniería en manejo hídrico***

La realización de este proyecto busca proponer la implementación de procesos de ingeniería aplicados al mejoramiento de la calidad actual en que se manejan diferentes recursos naturales utilizados en la cotidianidad del ser humano como participante principal de las sociedades actuales. Es por esto que una de las teorías que se desea aplicar en este proyecto es la de la ingeniería aplicada al manejo del recurso hídrico.

La ingeniera del recurso hídrico se define como la implementación de procesos ingenieriles que *“busca la realización de estudios, elaboración de proyectos y dirigir obras en diferentes áreas de los recursos hídricos como la explotación de agua subterráneas, distribución y abastecimiento de agua potable, conducción y tratamiento de efluentes cloacales, drenaje y riego, corrección y regulación fluvial, control de erosión hídrica y construcción de presas y diques”* (Universidad Nacional del Litoral, 2019).

Con esto se busca aportar soluciones integrales a los problemas que enfrenta hoy en día las sociedades en materia del recurso hídrico, por medio de la realización de estudios y asesoramiento para corregir y mitigar la contaminación que presentan los diferentes cuerpos y cursos de agua y las modificaciones que se generan en estos productos de las actividades realizadas por el ser humano

### ***7.2.4 Sistema de tratamiento de aguas residuales***

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son obras e infraestructuras de tipo civil que tienen gran importancia dentro del sistema sanitario de una sociedad. Dichas obras tienen como objetivo recolectar las aguas residuales provenientes de uso de estas para abastecimiento del hombre y las actividades diarias realizadas por este, para luego ser conducidas a través de sistemas de alcantarillado que las conducen a la planta de tratamiento de aguas residuales o punto de disposición final para ser tratadas y luego ser convertidas en un efluente final aceptable a las condiciones del ambiente (características organolépticas, químicas, y de salubridad). (Rojas, 2002)

### ***7.2.5 Calidad del agua***

La calidad del agua es el estado de las características físicas, químicas y biológicas del agua para consumo humano y posterior a este. Esto es una medida de las condiciones que presenta el agua en relación con los requisitos de las especies, cualquier necesidad y propósito humano.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

El inadecuado saneamiento y abastecimiento de agua no potable es una de las fuentes directas de propagación de enfermedades. Países en vía de desarrollo, la propagación de enfermedades por este medio ha llegado a limitar el crecimiento económico y progreso de los sistemas de salud. Es por esto que las entidades correspondientes deben garantizar el aumento de cobertura y prestación eficiente de servicios de acueducto y alcantarillado. (García & Herrera, 2015)

### ***7.2.6 Procesos fisicoquímicos convencionales para el tratamiento de agua residual***

Los procesos utilizados para disminuir la carga contaminante del agua y mejorar su calidad se pueden definir de tres tipos: físicos, químicos y biológicos. Los procesos químicos, fueron los primeros en ser empleados para este fin, tanto a nivel de potabilización como depuración del agua. Estos, utilizados para eliminar contaminantes del agua como nitrógeno, fósforo y reducción de la carga biodegradable, han sido empleados a través de métodos tales como la coagulación y precipitación química, neutralización, oxidación y desinfección. (Galvín, 2012)

### ***7.2.7 Procesos Avanzados de Oxidación-POA***

Son procesos fisicoquímicos que son capaces de producir cambios importantes en la estructura química de los contaminantes, involucrando principalmente la generación de radicales hidroxilos (*OH*). La generación de este radical se da a partir de oxígeno, peróxido de hidrógeno y otros catalizadores soportados, causando que los subproductos generados de la reacción sean agua y dióxido de carbono.

El radical *OH* tiene alta efectividad para la oxidación de materia orgánica en condiciones de presión y temperatura ambiente, hasta llegar a la mineralización de los contaminantes. Estos procesos son utilizados para la reducción de parámetros como DQO, COT y toxicidad de aguas residuales tratadas debido a la alta reactividad que manejan. La generación de radicales hidroxilos puede ser acelerada si se usa agentes oxidantes como ozono, peróxido de hidrógeno, radiación UV y catalizadores como dióxido de titanio. En base a esto los POA se clasifican como procesos no fotoquímicos y proceso fotoquímicos con presencia de luz (Monge & Silva, 2016).

### ***7.2.8 Química verde***

Es un campo de estudio que surge a principios de la década de 1990 bajo el desarrollo de los procesos ecológicos que daban hecho para esta época, como una herramienta conceptual para la protección del ambiente frente a la contaminación que se produce en la industria química. El término de química verde fue definido por primera vez en 1998 por Paul Anastas y John Warner, los cuales propusieron 12 principios (tabla 1) direccionados para permitir el diseño y desarrollo de procesos y productos químicos que permitan la reducción y generación de productos peligrosos y contaminantes (Mestres, 2013).

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 1. Principios de Química Verde.

Principio	Descripción
<b>1.Prevenición</b>	Es mejor prevenir el desperdicio que tratarlos o limpiarlos después de su creación
<b>2. Economía atómica</b>	Los métodos sintéticos deben diseñarse para maximizar la incorporación de todos los materiales utilizados en el proceso del producto final
<b>3.Síntesis química menos peligrosas</b>	Siempre que sea posible, los métodos sintéticos deben diseñarse para usar y generar sustancias que poseen poca o ninguna toxicidad para la salud humana y el medio ambiente.
<b>4.Diseños químicos seguros</b>	Los productos químicos deben diseñarse para realizar su función deseada mientras minimizan su toxicidad.
<b>5.Solventes y sustancias auxiliares seguros</b>	Se debe hacer uso de sustancias auxiliares (disolventes, agentes de separación, etc.) siempre que sea posible reducirlas al mínimo.
<b>6.Incremento de eficiencia energética</b>	Los requisitos energéticos de los procesos químicos deben ser reconocidos por su entorno y los impactos económicos deben ser minimizados. Si es posible, los métodos sintéticos deben llevarse a cabo en temperatura y presión ambiente.
<b>7.Uso de materias primas renovables</b>	La materia prima debe ser renovable en lugar de agotarse siempre que sea técnica y económicamente practicable.
<b>8.Reducción de derivados</b>	El uso de grupos protectores debe minimizarse o evitarse si es posible, ya que tales pasos requieren reactivos adicionales y pueden generar residuos.
<b>9. Catalizadores</b>	Los reactivos catalíticos deben ser lo más selectivos y reutilizables posible.
<b>10.Diseñar para la degradación</b>	Los productos químicos deben diseñarse de modo que al final de su función se descompongan en productos de degradación inocuos y no persistentes en el medio ambiente.
<b>11.Análisis en tiempo real para la prevención de contaminantes</b>	Las metodologías analíticas deben desarrollarse bajo sistemas de control y monitoreo continuo previo a la formación de sustancias peligrosas.
<b>12. Química segura para la prevención de accidentes</b>	Las sustancias y derivados utilizados en un proceso químico deben elegirse para minimizar el potencial de accidentes químicos, incluidas emisiones, explosiones e incendios.

*Fuente: Ribeiro et al.,2010.*

La formulación de estos principios por parte de Anastas y Warner estuvo influenciada bajo tres premisas fundamentales: 1. Prevención de la causa de riesgo; 2. Metodologías químicas y 3. Acción de acuerdo con un diseño. La prevención de la causa de riesgo es la mejor opción al evitar sustancias peligrosas. Las metodologías químicas pretenden plasmar el trabajo conjunto requerido de la química con otras áreas científicas y tecnológicas como la biología e ingeniería. Por último, la aplicación de química verde a diferentes actividades debe ser en base a un propósito definido y planificado, para que el resultado esperado sea eficiente y seguro (Mestres, 2013).

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

### ***7.3 Marco conceptual***

Para el desarrollo del marco conceptual de este proyecto, se realizó una búsqueda de información general que abarcó diferentes conceptos relacionados con el agua residual, los tipos de tratamientos que existen para esta y posteriormente con respecto al proceso productivo que se realiza en una Planta de Beneficio Animal y su relación con la unidad de análisis de este proyecto.

#### ***7.3.1 Agua residual***

Las aguas residuales son el resultado de la combinación de líquidos y residuos sólidos que son transportados en el agua proveniente de residencias, oficinas, edificaciones institucionales y comerciales, junto con los residuos provenientes de actividades industriales y agrícolas. (García & Herrera,2015)

#### ***7.3.2 Clasificación de agua residual***

Las aguas subterráneas, superficiales y de precipitación pueden agregarse eventualmente al agua residual. Según su origen, las aguas residuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

a. **Aguas residuales domésticas:** Está compuesta de constituyentes físicos, químicos y biológicos. Es una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas, en forma suspendida o disuelta. La mayor parte de la materia orgánica consiste en residuos alimenticios, excretas, material vegetal y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos. Esta fracción orgánica corresponde al 70% de la cantidad de materia solida existente y el 30% restante es inorgánico. (García & Herrera,2015)

Estas aguas son utilizadas básicamente para fines domésticos (baños, cocina, lavandería, etc.); estos llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas del sector doméstico, comercial, públicos y similares. (Zapata & Hernández,2017)

b. **Aguas residuales industriales:** Está compuesta por contaminantes provenientes de procesos industriales que son o pueden llegar a ser extremadamente perjudiciales para las personas y para el medio ambiente. Los contaminantes que pueden estar presentes provenientes del área industrial son Plomo, Mercurio, Nitratos y Fosfatos, Azufres, aceites, petroquímicos, plaguicidas e incluso elementos radioactivos. Muchos de estos suelen ser vertidos en ríos, lagos y océanos. Algunos como los metales pesados están asociados a actividades minera y de fundición. (García & Herrera,2015)

c. **Aguas residuales de matadero:** Este tipo de agua residual proviene principalmente de la industria cárnica y de sacrificio animal. Se compone mayormente de proteínas, grasas y fibras derivadas del proceso de sacrificio animal. Así mismo, se puede encontrar en estos altos niveles de materia orgánica, diferentes tipos de microorganismos patógenos y no patógenos, así como detergentes y desinfectantes usados en las diferentes actividades de limpieza de infraestructuras una vez el proceso de sacrificio ha terminado. La mayor carga contaminante que posee este tipo de agua residual se da por la sangre, piel, vísceras y demás; también se deben tener en cuenta como agentes contaminantes los productos farmacéuticos de uso veterinario suministrado al animal. (Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

### ***7.3.3 Composición de las aguas residuales***

La composición de las aguas residuales no siempre es igual para todos los afluentes puesto que los factores que afectan son variables.

Principalmente, las aguas residuales se encuentran compuestas por un 99.9% de agua y el 1% se encuentra constituido por materia sólida. Dicha materia sólida se encuentra constituida por subproductos desechados de actividades humanas, con elementos como materia carbonácea, proteínas y grasas. Elementos como las proteínas hacen parte de un 40 a 50% de la materia orgánica presente en el agua, a través de aminoácidos que brindan la mayoría del sustrato bacteriano. Se estima que un 50-60% de estas proteínas se encuentran disueltas en las aguas residuales y un 20-30% en la fracción sedimentable. (Rojas, 2002)

Por otra parte, la materia carbonácea se encuentra en forma de hidratos de carbono constituidos por almidones, azúcares y celulosa, los cuales son de fácil degradación. Las grasas presentes en los ácidos grasos presentan mayor dificultad para ser solubles y presentan una degradación más lenta en comparación con otros elementos. (Rojas, 2002)

### ***7.3.4 Parámetros fisicoquímicos que se evalúan para el tratamiento del agua residual***

**a. PH:** Es un parámetro definido como el logaritmo del inverso de la concentración de hidrogeniones (H<sup>+</sup>). Este parámetro indica el grado de acidez que presenta una sustancia (Gabino, 2018).

**b. DQO:** La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno que se requiere para efectuar la descomposición química de la materia orgánica en suspensión o disuelta presente en una muestra (Gabino, 2018).

**c. DBO5:** La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) se refiere a la cantidad de oxígeno consumido durante la degradación bioquímica de materia orgánica. Esta, se relaciona con la cantidad de oxígeno disuelto que los microorganismos presentes en la muestra consumen durante la oxidación bioquímica (Cortolima, 2013).

**d. Conductividad:** Parámetro que indica la propiedad que poseen las sustancias para conducir corriente eléctrica. Esta depende de la presencia y concentración de iones, movilidad y la temperatura durante la realización de la medición (SIAC, 2007).

**e. Sólidos Suspendidos Totales:** Son aquellos sólidos con un tamaño mayor a 0.45 µm, los cuales representan la carga contaminante que es objetivo de eliminación a través de procesos como la coagulación-floculación, sedimentación y filtración. Estos se refieren como la cantidad de material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de aguas superficiales y/o residuales (Cortolima, 2013)

**f. Turbidez:** Es una medida de la propiedad óptica que posee el agua, lo cual origina que la luz se absorba y disperse en lugar de transmitirse en línea recta a través de esta. La turbidez indica el grado de opacidad del agua producto de la presencia de materia particulada en suspensión (Cano, 2015).

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

### **7.3.5 Tipos de tratamiento para aguas residuales**

El tratamiento de las aguas residuales se basa en aplicar diferentes procesos químicos, físicos y biológicos al agua, con el fin de eliminar la mayor cantidad de contaminantes antrópicos presentes en esta. El objetivo de tratar las aguas residuales se basa en evitar la contaminación a nivel física, química e incluso radioactiva de los cuerpos de agua receptores de las mismas. Así mismo, se trata de evitar daños en los sistemas de acueducto, alcantarillado y abastecimientos públicos y privados de agua una vez las aguas residuales son descargadas a estos; de igual manera, se debe evitar generar inconvenientes en actividades productivas de tipo agrícola, ganadera y evitar generar impactos al entorno ecológico. (Rojas, 2002)

Es por esto, que, para la remoción de los diferentes contaminantes presentes en las aguas residuales, el tratamiento usualmente se divide en 4 etapas:

**a. Pretratamiento:** El objetivo de este es remover del agua residual aquellos constituyentes que pueden causar dificultades de operación y mantenimiento en los procesos posteriores o que, en algunos casos, no puede tratarse de manera conjunta con los demás componentes de agua residual. (Fandiño.2017)

**b. Tratamiento primario:** Se refiere a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica y organismos patógenos, mediante sedimentación u otro medio. Constituye un método de preparación del agua previa al tratamiento secundario. Por lo general, el tratamiento primario remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos de agua residual cruda y un 35% de la demanda biológica de oxígeno- DBO (Fandiño, 2017)

Durante el tratamiento de aguas residuales se usa la sedimentación para los siguientes propósitos:

- Sedimentación primaria para remover sólidos sedimentables y material flotante de aguas residuales crudas, reduciendo así el contenido de sólidos suspendidos
- Sedimentación secundaria para remover biomasa y sólidos suspendidos de reactores biológicos secundarios, como los procesos de lodos activados y filtros percoladores.
- Sedimentadores terciarios para remover sólidos suspendidos y floculados, o precipitados químicamente en plantas de tratamiento de aguas residuales. (Fandiño, 2017)

**c. Tratamiento secundario:** El tratamiento secundario o tratamiento biológico, se usa principalmente para la remoción de DBO y sólidos suspendidos, además de algunos otros contaminantes que con el tratamiento primario no fueron eliminados (Cano, 2015).

**d. Tratamiento terciario:** Consiste en la utilización de procesos químicos y físicos especiales con el fin de remover contaminantes y compuestos no biodegradables y tóxicos. Este tipo de tratamiento se usa para casos específicos de purificación de aguas industriales, debido a que su costo de implementación es mayor con respecto a los tratamientos previos (Rubio-Clemente et al.,2014)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

### ***7.3.6 Tipos de tratamiento para aguas residuales generadas durante el faenado bovino***

a. **Tratamiento de agua residual mediante coagulación-floculación:** Es un proceso ampliamente utilizado en el sector de potabilización y tratamiento de aguas residuales. Resulta ser un método útil para la separación de partículas muy finas de naturaleza coloidal que presentan gran estabilidad en el agua. Este proceso consiste en la adición de ciertos compuestos químicos a al agua residual con el fin de que materiales coloidales no sedimentables se sedimenten o que se aumente la rapidez de formación de flóculos para que se realice la sedimentación. Esta eliminación de partículas puede darse a través de la adición de coagulantes que logran desestabilización de partículas coloidales. (Cabrera & Ramírez, 2009)

En el proceso de coagulación, elementos como sales de aluminio y hierro son utilizadas como agentes coagulantes durante el proceso de desestabilización química de las partículas. El propósito de este es desestabilizar las partículas coloidales presentes de manera suspendida en el agua, con el fin de que se produzca la acumulación de estas. En la Figura 1 se presenta la dinámica de la neutralización de las cargas eléctricas superficiales de las partículas, permitiendo que estas se aglomeren y se favorezca la producción de flóculos. Todo esto se efectúa gracias a dos procesos: En primera parte, se realiza un proceso químico, en donde el agua reacciona con el coagulante y luego se da la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso se encuentra influenciado por dos variables: el pH final de la mezcla y la concentración de coagulante. (Cano,2015)

Cano (2015) afirma: *“Las partículas que forman la turbiedad y el color de las aguas poseen cargas eléctricas que normalmente son negativas, pero como también existen cargas eléctricas positivas, se puede afirmar que el agua y las soluciones son eléctricamente neutras. Las cargas eléctricas de las partículas generan fuerzas de repulsión entre ellas, por lo cual se mantienen suspendidas y separadas en el agua. Es por esto que dichas partículas no se sedimentan.”* (p.22)

El segundo proceso que se realiza durante la coagulación es un proceso físico, que consiste principalmente en el transporte de especies hidrolizadas para que entren en contacto con las impurezas del agua (Cano, 2015)

Es por esto qué, el proceso de coagulación busca neutralizar la carga eléctrica de los coloides de tal forma que se anule las fuerzas electrostáticas repulsivas a través de la aplicación de determinadas sales de aluminio o hierro, llamadas coagulantes. Estos neutralizan la carga eléctrica negativa presente en los coloides que están dispersos en el agua (Lorenzo, 2006). En la figura 1. se presenta la dinámica de la neutralización de las cargas eléctricas superficiales de las partículas, permitiendo que estas se aglomeren y se favorezca la producción de flóculos

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

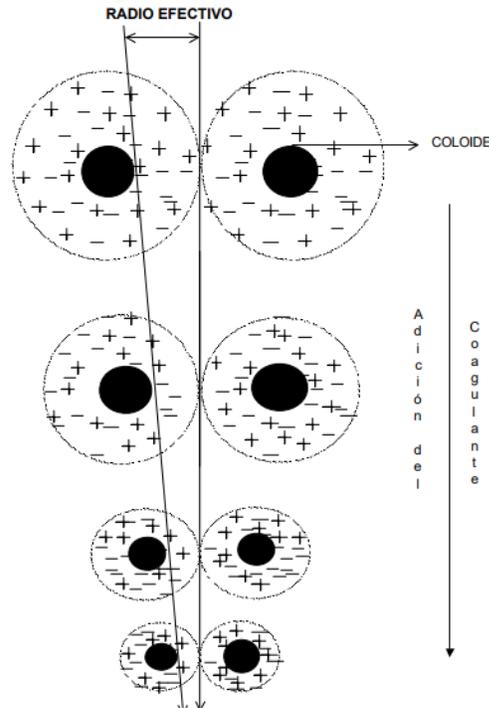


Figura 1. Neutralización de cargas en presencia de coagulante. Fuente: Andía, 2000

Una vez se da la desestabilización de partículas, la colisión entre estas favorece la formación y crecimiento de pequeños floc. Posterior a esto, el agua debe estar más clara, de lo contrario lo más probable es que todas las cargas no han sido neutralizadas y por lo tanto no se ha completado el proceso de coagulación y sería pertinente la adición de más coagulante. (Lorenzo, 2006)

Para realizar el proceso de coagulación, existen dos maneras sencillas basadas en el tipo de agua residual con el que se cuenta:

- a) **Coagulación por adsorción:** Este tipo de coagulación es ideal para el tratamiento de aguas con una alta concentración de partículas en estado coloidal. Una vez el coagulante es adicionado al agua turbia, la carga soluble de este es atraída por los coloides, de manera que la formación de flóculos es inmediata (Andía, 2000). En la siguiente figura se muestra el ejemplo del proceso de coagulación por adsorción utilizando hidróxido de Aluminio  $Al(OH)_3$

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

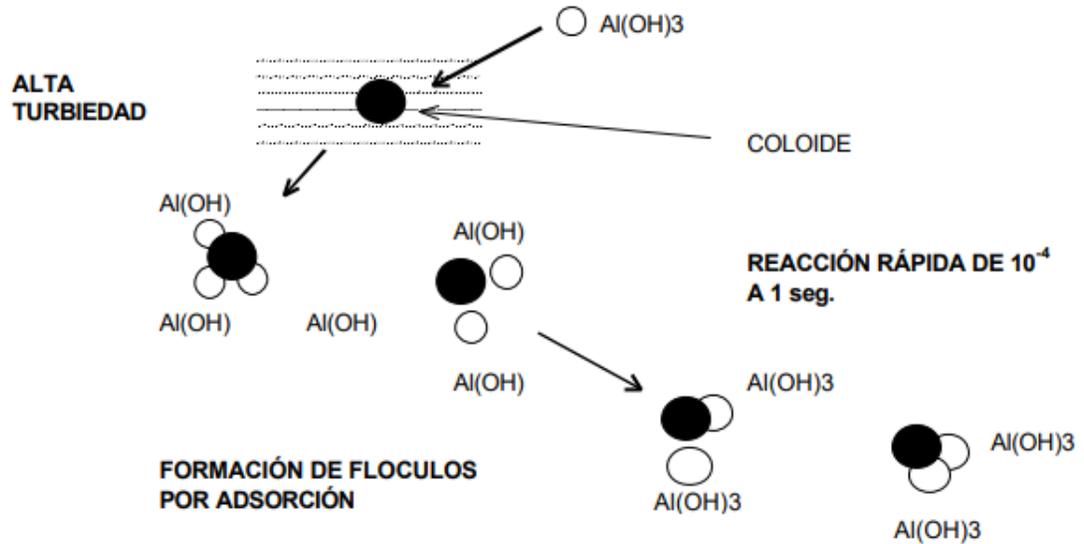


Figura 2. Coagulación por adsorción. Fuente: Andía, 2000

b) **Coagulación por barrido:** Se utiliza para aguas que presentan baja turbidez y la cantidad de partículas coloidales es mínima. Aquí, las partículas son sobresaturadas de coagulante para que se realice la precipitación de estas (Andía, 2000). Para ejemplificar este proceso, se utiliza hidróxido de Aluminio  $Al(OH)_3$  como en el proceso anterior.

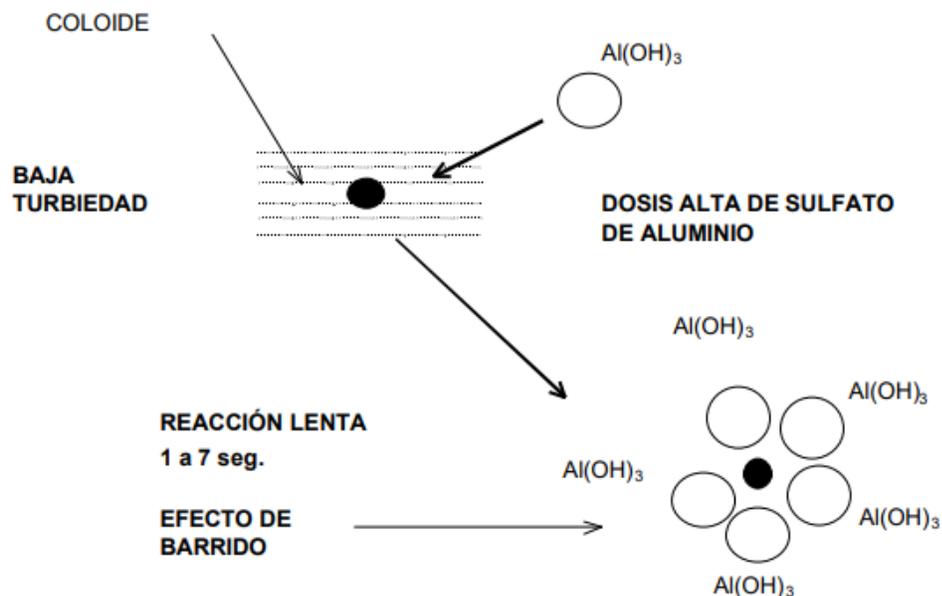


Figura 3. Coagulación por barrido. Fuente: Andía, 2000.

**a.1. Selección y cantidad óptima de coagulante:** Este criterio se determina principalmente mediante el ensayo de prueba de jarras. Se realiza para encontrar la dosis

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

ideal de coagulante que actúe como eliminador de turbiedad que no sedimente de manera fácil, remoción de color real y aparente y la eliminación de sustancias y precipitados químicos que se encuentran en suspensión. (Cano, 2015)

Tabla 2. Influencia de la dosis de coagulante.

Cantidad de coagulante	Eficiencia del proceso de coagulación
Baja	No neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microfloculos es muy escasa, por lo tanto la turbiedad residual es elevada.
Alta	Produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada.

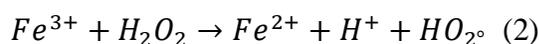
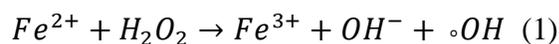
Fuente: Cano, 2015

Entre los agentes coagulantes más utilizados por sus características fisicoquímicas, se encuentran la alúmina ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$ ), y el cloruro férrico. La primera es muy usada pues presenta algunas ventajas en cuanto a costo y disponibilidad (Cabrera & Ramírez, 2009)

Por otra parte, la floculación es un proceso que se ha utilizado como complementario a la coagulación, debido a que consiste en la agitación de la muestra con el fin de favorecer el crecimiento y aglomeración de los coloides para hacer que el tamaño y peso ideal de estos se logre para facilitar la sedimentación. En este proceso, se utilizan polímeros de tipo catiónicos, aniónicos y no iónicos que puedan producir poco floculo y mejorar la actividad del coagulante; algunos de los más usados son minerales como la sílice activada, de tipo orgánico natural, extraídos de sustancias animales o vegetales y los de tipo orgánico de síntesis, clasificados de acuerdo con la ionicidad del polímero. (Cano, 2015)

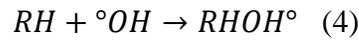
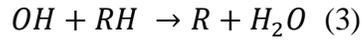
b. **Tratamiento de agua residual mediante Electro-Fenton:** El proceso Fenton trata la carga contaminante con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso (reactivo Fenton), a presión atmosférica, temperatura entre 20 y 40 °C y en condiciones ácidas. (Avenidaño & Reyes, 2013)

Este proceso se basa en la adición de sales de hierro en presencia de Peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) en medio ácido para la formación de radicales  $^{\circ}OH$ . La combinación del peróxido y sales de hierro es lo que se conoce como reactivo Fenton (Ec. 1 y2)

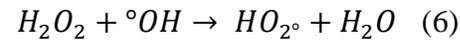


Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

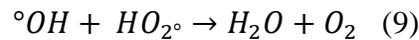
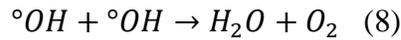
Además de formarse radicales  $^{\circ}OH$ , se producen radicales perhidroxilo ( $HO_2^{\circ}$ ), los cuales inician una reacción de oxidación en cadena con el fin de eliminar la materia oxidable. Pese a esto, los radicales  $^{\circ}OH$  tienen mayor poder de oxidación que los radicales  $HO_2^{\circ}$ . Los mecanismos de reacción que ocurren con los  $^{\circ}OH$  son abstracción de hidrógeno, adición a la estructura del contaminante o transferencia de carga (Ec. 3,4 y 5)



Por su parte, los iones férricos ( $Fe^{3+}$ ) resultantes (Ec. 1) pueden, asimismo, reaccionar con el  $H_2O_2$ , lo cual conduce a la regeneración del  $Fe^{2+}$  (Ec. 2). Además, durante el sistema Fenton puede tener lugar el consumo de radicales  $^{\circ}OH$ . Sin embargo, un exceso de peróxido de hidrógeno y/o de iones de hierro al inicio del proceso, respecto de la cantidad de contaminante a tratar, limita la eficiencia del proceso (Ec. 6 y 7).



También, puede producirse la recombinación de radicales  $^{\circ}OH$  y/o la reacción de éstos con radicales  $HO_2^{\circ}$ , representándose en la reducción de la eficiencia del proceso (Ec. 8 y 9)



El hierro puede ser añadido en su forma ferrosa ( $Fe^{2+}$ ) o férrica ( $Fe^{3+}$ ), siendo ésta última conocida como proceso tipo Fenton. Las sales de hierro son menos utilizadas debido a la poca generación de radicales  $OH$  al inicio del proceso; pese a esto, si el proceso es combinado con radiación ultravioleta, solar o energía eléctrica, esta última conocida como proceso Electro-Fenton, la eficiencia aumenta de manera significativa, debido a que se favorece la regeneración de  $Fe^{2+}$  y aumenta el número de radicales  $OH$  generados (Ec. 10).



(Rubio-Clemente et al.,2014)

En la Figura 4 Se representa el esquema del proceso Electro-Fenton y la interacción de las diferentes reacciones que ocurren dentro de la celda electroquímica.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

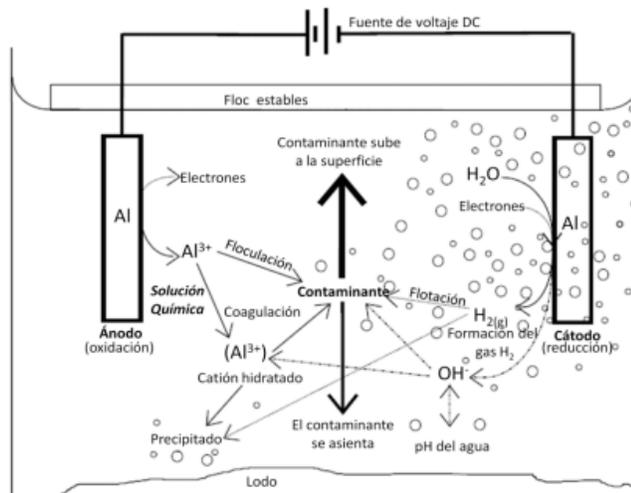


Figura 4.. Interacciones presentes dentro de una celda electroquímica durante el proceso Electro-Fenton. Fuente: Angulo Bedoya et al.,2008

La combinación del proceso convencional fenton junto con electricidad se desarrolló con el fin de evitar la acumulación de lodo y hierro que se presentan en el proceso convencional. Además, al ser mejorado a través de la electroquímica, se genera una alta eficiencia y mayor compatibilidad ambiental.

El proceso Electro-Fenton puede ser clasificado en 4 categorías, las cuales difieren según la adición o formación de reactivo:

1. **Electro-Fenton de cátodo ( $EFH_2O_2$ ):** En este proceso se realiza la adición de  $Fe^{2+}$  mientras que  $H_2O_2$  se produce generada in situ gracias a la reducción electroquímica de  $O_2$  en el cátodo; Este proceso evita el transporte, manejo y almacenamiento de  $H_2O_2$ .
2. **Electro-Fenton de ánodo de sacrificio (EF- $Feox$ ):** El  $Fe^{2+}$  es generado gracias al ánodo de sacrificio y  $H_2O_2$  es agregado; el problema de este proceso es la cantidad de hierro que se asienta en los lodos residuales, además de que el consumo de ánodo es bastante.
3. **Electro-Fenton cíclico  $Fe^{2+}$  (EF-Fere):** Tanto  $Fe^{2+}$  como  $H_2O_2$  son adicionados, aunque el  $Fe^{3+}$  que se genera en la reacción es reducido a  $Fe^{2+}$  gracias al cátodo.
4. **Electro-Fenton de cátodo+ cíclico  $Fe^{2+}$  (EF- $H_2O_2$  -Fere):** el  $H_2O_2$  es producido in situ gracias a la reducción por cátodo de  $O_2$  y la generación de a  $Fe^{2+}$  gracias a la reducción de  $Fe^{3+}$ . Esto evita la adición de mayor cantidad de peróxido de hidrógeno y la reducción de hierro presente en los lodos residuales. (Zhang et al.,2019)

Por otra parte, para que el proceso Electro-Fenton sea eficiente, se deben tener en cuenta diferentes parámetros presentes en el montaje de la celda electrolítica, pues cada uno de estos tendrán influencia en el éxito del proceso:

- a) **Distancia apropiada entre electrodos:** Este parámetro indica la transferencia de energía para la precipitación de la materia orgánica. Al existir una separación de los electrodos

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

uno con respecto al otro menor a 10 mm, el tratamiento requiere de una duración larga y se comienza a dar precipitación de lodos sobre la superficie de los electrodos. Esto hace que la remoción de DQO no sea la esperada debido a que el proceso de agitación que permite la coagulación no se realiza (Ruiz & Garcés, 2007).

**b) Densidad de corriente:** Es una de las variables que más influye en la remoción de contaminantes del agua puesto que la eficiencia de este aumenta dependiendo de la densidad de corriente. Sin embargo, un consumo alto de energía llegará a producir pérdidas que se transformarían en energía calórica, lo cual puede incrementar la temperatura del agua (Aguilar, 2015).

**c) Tiempo:** El tiempo utilizado para el proceso influirá en la remoción de contaminantes. A mayor cantidad de tiempo es mucho más grande la formación de material coagulante, pues procesos como la coagulación, floculación y precipitación requieren de grandes periodos de tiempo para llevar a cabo la sedimentación (Aguilar, 2015).

La mayor ventaja del reactivo Fenton es que sus componentes son fáciles de manipular, ambientalmente benignos y económicos, por lo que el proceso Fenton ha sido considerado más viable que otros métodos de tratamiento (Méndez & Pietrogiovanna, 2010).

### ***7.3.7 Planta de Beneficio Animal***

Es todo aquel establecimiento en donde se sacrifican y procesan diferentes especies de animales que han sido declarados como aptos para el consumo humano, siendo registradas y autorizadas su distribución bajo este fin (Córdoba & Farfán, 2018)

### ***7.3.8 Proceso de sacrificio de ganado***

La cadena productiva cárnica inicia con la cría y engorde del ganado (vacuno, porcino, aves de corral). Posterior a esto, se da el procesamiento industrial, el cual comienza desde el momento en el que el animal ingresa en pie a las plantas de beneficio animal. Dicho proceso consta de cuatro etapas:

**a. Beneficio:** Los animales son recibidos en la planta de beneficio en donde luego de ser pesados, son ubicados en corrales de reposo durante mínimo 12 horas (regulación INVIMA). Transcurrido este tiempo, los animales son sometidos a una inspección ante-mortem, en la que se verifica que no presente ningún tipo de patología que pueda llegar a afectar al ser humano. Posterior a esto, son bañados con el fin de reducir la cantidad de suciedad e impurezas que puedan presentarse. Una vez realizado esto se les aplica un leve choque eléctrico para ocasionar pérdida de conocimiento del animal.

Una vez aturdidos, los animales son degollados de tal forma que el corazón ayude de manera más rápida a expulsar la sangre. Para bovinos y porcinos, se lava muy bien el cuerpo y se realiza el retiramiento de la piel; para el caso de aves de corral se realiza el escaldado de los cuerpos para retirar las plumas. Para todos los animales, se realiza por último el corte del esternón y se retiran las grasas y sebos, vísceras y otros subproductos cárnicos, quedando como resultado de esto la carne en canal.

**b. Transformación:** La carne en canal llega a la zona de desposte en donde se termina de retirar el exceso de grasa, se limpian hematomas y se separa la carne del sistema óseo, para luego ser cortada y clasificada de acuerdo a los distintos cortes. A partir de este momento se tienen dos

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

procesos diferentes: En el primero, la carne pasa directamente a la etapa de envasado, quedando la carne para su distribución y comercialización. En el segundo, se toman algunos cortes de la carne y se procede a una etapa adicional de preparación para elaboración de productos cárnicos procesados como lo son los embutidos y las carnes frías.

**c. Preparación** La carne seleccionada para los distintos tipos de productos cárnicos y embutidos es mezclada con grasas (generalmente del cerdo por su especial olor y sabor) y productos que permiten la estabilización y preservación de las carnes frías, como condimentos, especias y aditivos. Una vez se ha mezclado la carne, el producto resultante puede ser embutido en los intestinos y tripas de los animales o en envolturas artificiales, elaboradas para el consumo humano sin ningún riesgo contra la salud. Los embutidos y algunas carnes frías (paletas y jamones) son ahumados y cocidos a altas temperaturas y durante un tiempo determinado dependiendo de cada producto, tras lo cual la temperatura debe bajarse de forma inmediata con agua fría con el fin de eliminar cualquier impureza generada durante las etapas de transformación y preparación. Finalmente, los embutidos son envasados y almacenados listos para su comercialización y distribución. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2015)

### ***7.3.9 Características de los vertimientos generados en los diferentes procesos del sacrificio animal***

**a. Desembarque, recepción de materia prima conducción a corrales, baño externo:** En esta primera etapa se producen residuos de tipo orgánico, principalmente fluidos del animal como sangre, estiércol/heces, contenidos estomacales, además de aguas de esterilizado. Los parámetros de vertimientos de estas fuentes de generación son DBO-DQO

**b. Esterilización:** Este proceso se realiza con el fin de eliminar contaminantes superficiales que presente el animal. Esto se hace a través de limpieza con productos de desinfección. Aquí, se siguen produciendo residuos orgánicos tales como sangre, aguas de esterilizado, estiércol/heces, contenidos estomacales, pelos, plumas, restos de carne estomacales, productos detergentes y desinfectantes. Los parámetros de vertimientos de estas fuentes de generación son DBO-DQO y sólidos suspendidos.

**c. Desuello:** En esta etapa, al igual que las anteriores se genera alto contenido de sangre, aguas de esterilizado, estiércol/heces, contenidos estomacales. Estos vertimientos contienen gran cantidad de materia orgánica por lo que los principales parámetros que se obtienen a evaluar son DBO-DQO y nitrógenos.

**d. Molido, corte, mezclado, adobado, trocelado embutido, empacado:** En este paso, el animal comienza a ser porcionado y transformado según el proceso requerido para la presentación del producto final. Sigue produciéndose líquidos de sangre, aguas de esterilizado, así como residuos sólidos tales contenidos estomacales, restos de carne, y grasas. Las características fisicoquímicas que se ven afectadas en este son DBO-DQO, grasas, aceites y sólidos suspendidos.

**e. Lavado de canales:** En esta zona se sitúan desechos que se han originado a través del proceso de sacrificio, por lo que se encuentran cantidades de estiércol/heces, contenidos estomacales, sangre, productos detergentes y desinfectantes. Los parámetros de vertimientos de estas fuentes de generación son DBO-DQO, y Fosfatos, nitrógenos y sales.

**f. Lavado de equipos y áreas:** Se realiza la limpieza de las instalaciones, equipos y establos, a través del uso de agua de lavado con una temperatura superior a 40°C

**g. Limpieza y saneamiento:** En esta etapa final se realiza la desinfección y esterilización de utensilios, instalaciones y equipos. Se hace uso principal de detergentes y desinfectantes, por lo

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

que los parámetros que se afectan son pH, grasas y materia orgánica suspendida. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2015)

#### 7.4 Marco normativo

Colombia ha desarrollado diferente normatividad general y particular que abarcan los sectores económicos, sociales, políticos y ambientales.

Teniendo como base principal la Constitución política, se han seguido leyes, resoluciones, decretos y demás, específicos para cada uno de los sectores y los requisitos y/o requerimientos de estos. A continuación, se mencionan algunas de las normativas relacionadas con el recurso natural agua y actividades, requisitos, planes y programas desarrollados para su uso responsable y tratamiento posterior a su utilización.

Tabla 3. Normativa nacional aplicada al proyecto.

<b>Norma</b>	<b>Propósito</b>	<b>Expide</b>
<b>Constitución Política de Colombia</b>	<p>Art. 79:” <i>Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.</i>”</p> <p>Art. 80:” <i>El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas</i>”</p>	Constitución Política de Colombia, 1991
<b>Ley 99 de 1993</b>	Se crea el ministerio de medio ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental -SINA y se dictan otras disposiciones	Congreso de Colombia, 1993

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

---

<b>Decreto 3930 de 2010</b>	Establece las disposiciones relacionadas con los usos, el ordenamiento y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados	Minambiente, 2010
<b>Sentencia Río Bogotá 2014</b>	El fin de esta sentencia es la recuperación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá, a través de la gestión integral, combinando elementos ambientales, sociales, económicos e institucionales, para el mejoramiento continuo y sostenible de la calidad de vida de sus habitantes y de los ecosistemas. Busca abordar la recuperación y conservación del hidrosistema fluvial de la cuenca del río Bogotá de una manera integral. Se declaran los responsables de la contaminación del río y sus afluentes a los municipios e industrias y autoridades que no han tomado medidas para prevenir su contaminación	Consejo de Estado, 2014
<b>Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010-2022)</b>	Es el instrumento utilizado para la gestión integral del recurso, incluyendo las aguas subterráneas. Establece los objetivos y estrategias que tiene el país para el uso y aprovechamiento eficiente del agua, el manejo del recurso por parte de autoridades y usuarios presenta los objetivos para la prevención y minimización de la contaminación hídrica, en concordancia con aspectos sociales, económicos y ambientales y el desarrollo de los respectivos instrumentos normativos y económicos.	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017
<b>Resolución 0631 de 2015</b>	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, Se establecen los parámetros objeto de análisis y reporte por parte de las	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015

---

	actividades industriales, comerciales o servicio.	
<b>Resolución 0330 de 2017</b>	Se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS. Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo.	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017

*Autor, 2019.*

En el país se cuenta con una gran cantidad de normativa relacionada con el uso, manejo y disposiciones específicas de cuerpos de agua hídricos superficiales y otros recursos naturales. Principalmente para este trabajo se enfocó principalmente en la Resolución 0631 de 2015 y Sentencia del Río Bogotá 2014

### 7.5 Marco geográfico

Girardot es un municipio del departamento de Cundinamarca ubicado en la Provincia del Alto Magdalena. Se encuentra ubicado a 289 msnm a una distancia de 124 km desde la capital del país, en las coordenadas 4° 18' 18" Latitud Norte y 74° 48' 06" Longitud Oeste. Su extensión municipal es de 129 km<sup>2</sup> y presenta una temperatura promedio de 33.3 °C. (Alcaldía Municipal de Girardot, 2018)

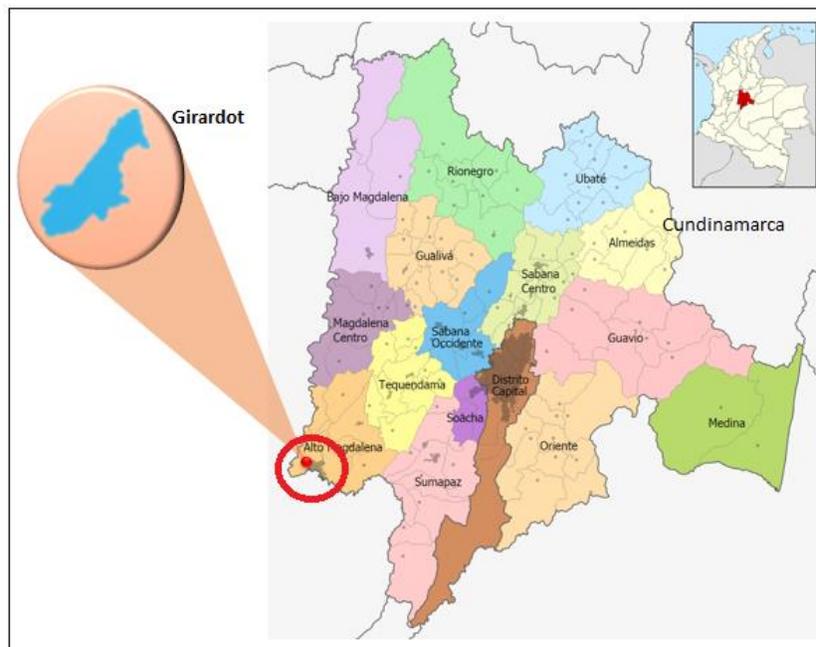


Figura 5. Ubicación geográfica de Girardot. Fuente: Alcaldía Municipal de Girardot, 2018.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

El municipio de Girardot limita al norte con el municipio de Nariño y Tocaima, por el sur con el municipio de Flandes, separados por el Río Magdalena; al oeste con el municipio de Coello y el Río Magdalena y al este con el municipio de Ricaurte y el Río Bogotá. (Alcaldía Municipal de Girardot, 2018)

*Tabla 4. Límites geográficos municipio.*

<b>Dirección Cardinal</b>	<b>Municipio</b>	<b>Departamento</b>
<b>Norte</b>	Nariño	Cundinamarca
	Tocaima	Cundinamarca
<b>Sur</b>	Flandes	Tolima
<b>Oeste</b>	Coello	Tolima
<b>Este</b>	Ricaurte	Cundinamarca

*Fuente: Alcaldía Municipal de Girardot, 2018.*

Girardot tiene una población municipal de 150.178 habitantes según las estadísticas realizadas por el DANE para el año 2005 y proyecciones realizadas con respecto a dicho censo. (Alcaldía Municipal de Girardot, 2018)

### **7.5.1 Hidrografía**

El recurso hídrico del municipio se encuentra comprendido por las cuencas de los ríos Bogotá y Magdalena. La primera, se encuentra la zona oriental de Girardot y se conforma por las quebradas Berlín, Barzalosa y Guabinal, la Figueroa y sus afluentes la Aguada, el Mohán y el Higuerón. En la zona Sur del municipio se encuentra la cuenca del Río Magdalena, el cual recibe las aguas de la quebrada Agua blanca, el Lobón, la Yegüera y las microcuencas de la quebrada Seca y las Palmas. Además, el municipio cuenta con afloramientos de agua, ubicados principalmente en el sector correspondiente a la serranía de Alonso Vera, dentro de la cual se origina la quebrada Agua Blanca, en el sector norte la Julia y la Guarigua ubicadas en la vereda Guabinal Cerro. Las comunidades aledañas, utilizan estas fuentes hídricas para consumo humano y abrevadero (Alcaldía Municipal de Girardot, 2014).

### **7.5.2 Economía**

Girardot cuenta con diversas perspectivas económicas resaltables a nivel regional, caracterizándose principalmente por actividades del sector agropecuario. Desde la perspectiva agrícola, Girardot cuenta con tierras que son aptas para el cultivo de arroz, algodón, maíz, sorgo y especies frutales de mango, limón y naranja, que se han tecnificado con el paso del tiempo gracias a las condiciones geográficas de suelo plano que permiten la utilización de maquinaria agrícola. Para el año 2014 este sector utilizaba solo el 35% de las tierras clasificadas como aptas para cultivo. En la perspectiva ganadera, Girardot no ha tenido vocación en el sector ganadero, aunque dentro de su jurisdicción se pueden encontrar campos y pastizales en los que habitan bovinos, mulares, equinos, porcinos, asnales, que son criados por la necesidad de campesinos de tener animales que ayudan en las tareas del agro y para consumo humano de sus derivados (Alcaldía Municipal de Girardot, 2014).

Actualmente, el turismo es el sector económico principal. Es la única opción para la diversificación en la base económica de la región, puesto que posee un potencial considerable para el incremento de los ingresos tanto públicos como privados y contribuye al desarrollo de otros sectores, principalmente de productos que demandan los turistas. (Alcaldía Municipal de Girardot, 2018)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

La planta de Beneficio Animal del municipio de Girardot se encuentra ubicada al sur del municipio, en las coordenadas  $4^{\circ}17'23.51''$  N y  $74^{\circ}48'28,26''$ O (Google earth, 2019) en la Carrera. 9 #10-1, en el barrio San Miguel. (Alcaldía Municipal de Girardot, 2014)

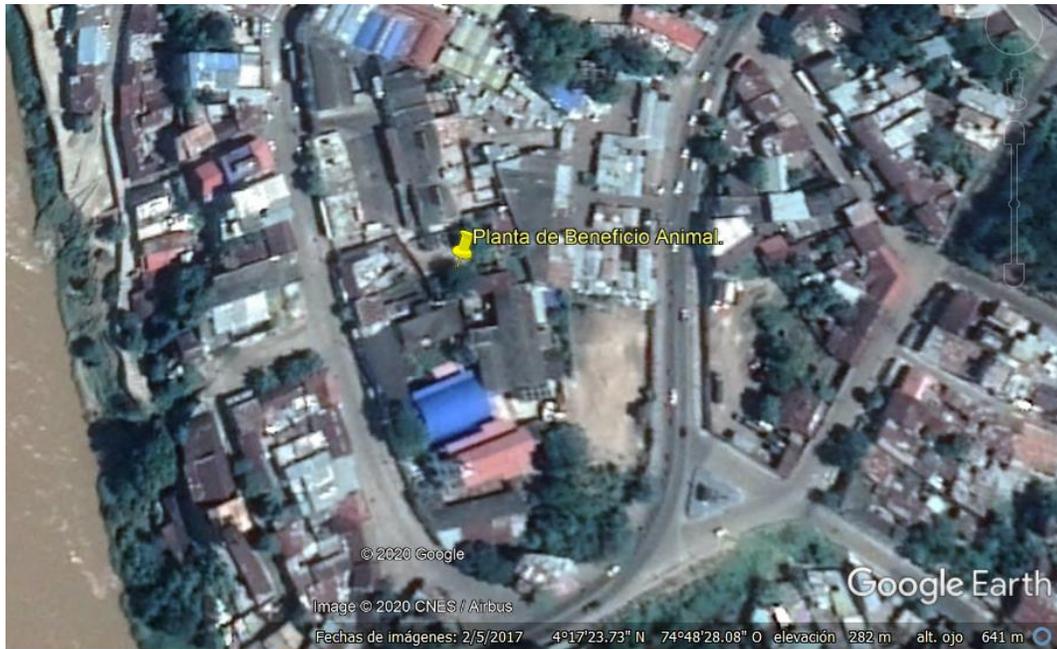


Figura 6. Ubicación de la PBA dentro del barrio San Miguel-Girardot, Cundinamarca. Fuente: Google Earth, 2020. Modificado por: Autor, 2020.

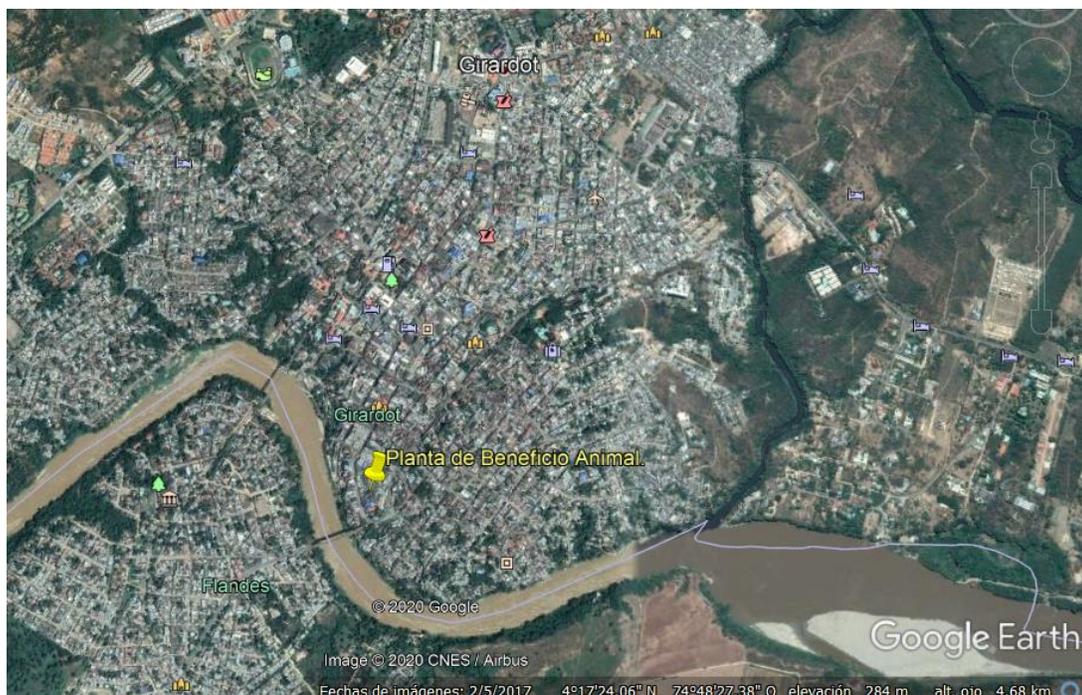


Figura 7. Ubicación PBA dentro de Girardot, Cundinamarca. Fuente: Google Earth, 2020. Modificado por: Autor, 2020.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

### 7.6 Marco institucional

Se estableció las entidades e instituciones tanto públicas como privadas que tienen influencia dentro de la realización de este proyecto.

Tabla 5. Marco institucional.

<b>Empresa Ser Regionales</b>	Es la encargada de la organización, administración, operación, prestación y explotación de la actividad de sacrificio y faenado de la Planta de Beneficio Animal. Dentro de su jurisdicción se encuentra también el manejo de la PTAR del frigorífico.
<b>Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR</b>	Es la entidad ambiental encargada del control y monitoreo del cumplimiento normativo del proceso de tratamiento de las aguas residuales teniendo en cuenta lo establecido en las leyes y principalmente la Sentencia del Río Bogotá del 2014
<b>Universidad El Bosque</b>	Brinda los insumos y conocimientos para el desarrollo formativo del investigador que realizó el proceso.

*Autor, 2019.*

## 8. Metodología

En el presente proyecto se realizó la caracterización de las aguas residuales generadas en la planta de beneficio animal del municipio de Girardot (Cundinamarca). Adicionalmente, fueron evaluadas tres aproximaciones experimentales para optimizar el proceso de tratamiento de dichos efluentes: Coagulación-Floculación (C/F)- alternativa 1; Electro-Fenton (E/F)-alternativa 2, y la combinación de C/F y E/F-alternativa 3. Una vez evaluadas estas estrategias de tratamiento, fue seleccionada la de mejor desempeño en base a su eficiencia en la remoción de parámetros de interés establecidos en la normatividad ambiental vigente. Los costos asociados a cada una de las alternativas y su viabilidad ambiental también fueron considerados. A continuación, se describe la metodología empleada.

### 8.1. Metodología primer objetivo específico

Este objetivo buscó en primer lugar la realización de una línea base del estado actual del agua residual generada en la planta de beneficio animal, a través de la caracterización de esta usando instrumentos tecnológicos y metodologías establecidas según Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA,2015). Con esa caracterización se buscó analizar en laboratorio los parámetros fisicoquímicos de dicha agua, los cuales fueron comparados ante la resolución 0631 de 2015 sobre el cumplimiento de los establecido en esta con respecto al vertimiento puntual de agua.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

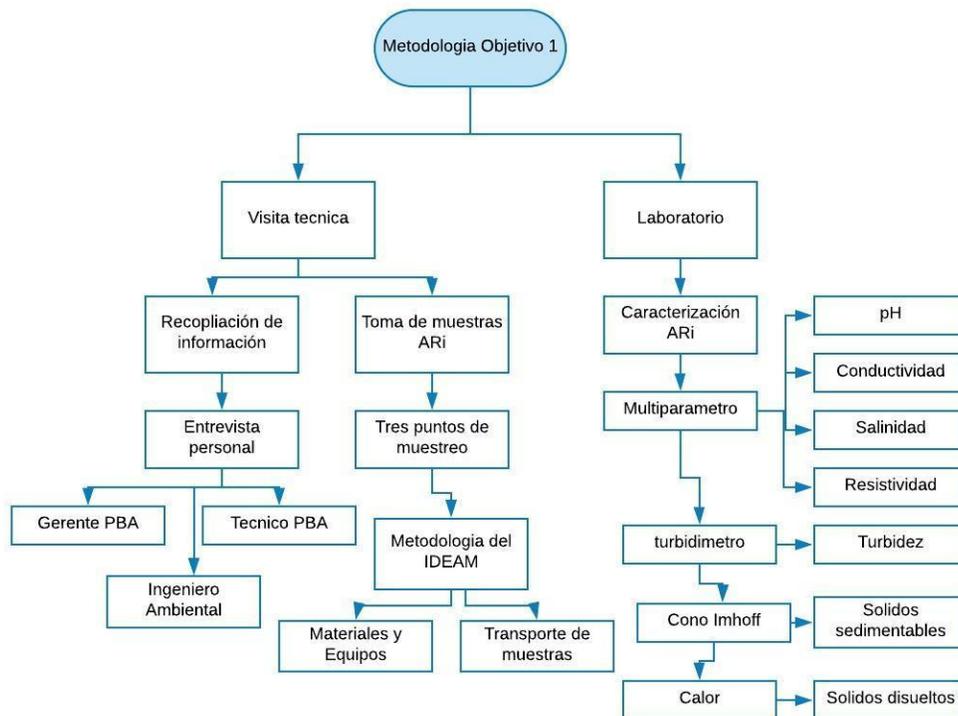


Figura 8. Diagrama de proceso metodología objetivo específico I. Autor, 2019

### 8.1.1 Actividad 1: Visita técnica y recolección de muestra.

Como se muestra en el diagrama de procesos anterior (Figura 8.) la realización de este objetivo se dividió en dos fases. La primera consistió en realizar una línea base acerca de los procesos que se realizan en la Planta de Beneficio Animal (PBA) de Girardot (Cundinamarca); para esto se realizó una visita técnica a las instalaciones de la PBA en el mes de octubre en la cual se reconoció el sistema de tratamiento implementado actualmente en la planta y se pudo recolectar información acerca del proceso productivo y de tratamiento de agua que allí se genera gracias a la elaboración previa de una ficha de preguntas de investigación (Ver anexo 1.)

Posterior a esto, se acordó con la empresa la realización de dos tomas de muestreo de agua residual: La primera se realizó en el mes de noviembre del año 2019 y la segunda en febrero de 2020. En la primera fecha se tomó muestras del efluente en tres diferentes puntos del sistema de tratamiento: El primer punto de muestreo se ubicó en la caja principal de aguas crudas; segundo punto de muestreo se localizó en la zona de cribado y trampa de grasas, y el punto tercero se situó en el pozo de recepción final de agua tratada. Estos puntos fueron seleccionados con el fin de que posteriormente se pudiera analizar la eficiencia del sistema con respecto al tratamiento a través de la comparación del estado del agua antes y después de su tratamiento. Para la segunda fecha, se determinó la toma de muestra de agua residual solo para el punto uno, debido a que se realizó como una medida para la recolección de mayor cantidad de muestra para su posterior uso durante la etapa de evaluación de las alternativas seleccionadas en el laboratorio. Para la toma de las muestras realizadas se utilizó envases de forma rectangular con capacidad de 2,5 L cada uno, los cuales fueron colocados y transportados hasta Bogotá en una nevera de icopor con

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

capacidad de mantener una temperatura cercana a 4°C gracias a la utilización de 6 bolsas de gel frío que fueron cambiadas cada 12 horas hasta la recepción final de las muestras en la nevera del laboratorio de la universidad.

### 8.1.2 Caracterización agua residual.

La segunda fase de este objetivo consistió en la caracterización de las muestras de agua residual obtenidas de la Planta de Beneficio Animal de Girardot, Cundinamarca. Esta caracterización se realizó en el laboratorio de investigación de la Universidad El Bosque, en donde se analizaron diferentes parámetros fisicoquímicos del agua de cada una de las muestras de agua residual recolectadas. Esto se hizo con el fin de conocer la eficiencia del tratamiento implementado actualmente por la planta de beneficio.

Los parámetros analizados a través de método electrométrico, es decir por medio del uso de multiparámetro marca Sartorius fueron: pH, conductividad eléctrica, salinidad, resistividad, sólidos disueltos totales. Este proceso consistió en introducir el electrodo del instrumento en una alícuota de 10 ml de cada uno de los puntos de muestreo. Automáticamente el multiparámetro determinó el valor de la característica que se estuvo evaluando. Este procedimiento se realizó por triplicado para posteriormente obtener un promedio. De igual manera, para hallar el valor de la turbidez se hizo uso del equipo turbidímetro marca Hach. Cabe resaltar que este procedimiento se realizó tanto para la caracterización del agua residual como para la posterior evaluación de la eficiencia de las alternativas seleccionadas (objetivo II)

La caracterización de sólidos sedimentables se realizó conforme al método volumétrico propuesto por APHA, 2015-Standard Method for the Examination of Water and Wastewater Con respecto a sólidos suspendidos totales, estos fueron determinados por el método gravimétrico propuesto también por APHA, 2015.

Por otra parte, para la determinación de la Demanda Química de Oxígeno-DQO, se utilizó el método EPA 410.4. y para la Demanda Biológica de Oxígeno-DBO el método de medición de agotamiento-Oxitop. Una vez se obtuvieron los resultados de cada uno de estos parámetros se halló la relación de biodegradabilidad DBO5/DQO de la siguiente manera

$$Fb = \frac{\text{Demanda Biologica de Oxígeno-DBO}}{\text{Demanda Quimica de Oxígeno-DQO}} \quad (11)$$

(Ardila et al.,2015)

Luego de esto, el resultado de este factor que se obtuvo para cada uno de los puntos de colecta fue comparado frente al criterio de biodegradabilidad (Tabla 6) para así conocer el grado de biodegradabilidad que presentan cada una de las muestras.

Tabla 6. Factor de biodegradabilidad en base a la relación DBO/DQO

DBO5/DQO	Carácter
>0.8	Muy biodegradable
0.7-0.8	Biodegradable
0.3-0.7	Poco biodegradable
<0.3	No biodegradable

Fuente: (Ardila et al.,2015)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Compuestos como Nitratos y Sulfatos fueron determinados a través de espectrofotometría ultravioleta selectivo a 220 nm y 275 nm. Para la determinación de Cloruros en la muestra se utilizó proceso de titulación con Nitrato de Plata e indicador de dicromato de Potasio y para el parámetro de alcalinidad se logró determinar tres tipos diferentes de esta: Alcalinidad total, parcial e intermedia.

A continuación, en la Tabla 7 se presenta un resumen entre la relación de cada parámetro y la forma en que fue analizado:

Tabla 7. Metodología empleada para la evaluación de parámetros fisicoquímicos.

<b>Parámetro</b>	<b>Método utilizado</b>
<i>PH (Unidades de pH)</i>	Electrométrico (Multiparámetro)
<i>Temperatura (°C)</i>	Electrométrico (Multiparámetro)
<b><i>Demanda Química de Oxígeno – DQO(mg/L O<sub>2</sub>)</i></b>	Método EPA 410.4
<b><i>Demanda Biológica de Oxígeno – DBO(mg/L O<sub>2</sub>)</i></b>	Medición de agotamiento
<b><i>Sólidos Totales – ST (mg/L)</i></b>	Gravimétrico a 103-105°C
<b><i>Sólidos Disueltos Totales – SDT(mg/L)</i></b>	Electrométrico (Multiparámetro)
<b><i>Sólidos Sedimentables – SSED (mL/L)</i></b>	Método volumétrico
<b><i>Conductividad (µS/cm)</i></b>	Electrométrico (Multiparámetro)
<b><i>Salinidad (ppt/L)</i></b>	Electrométrico (Multiparámetro)
<b><i>Resistividad (KΩ.cm)</i></b>	Electrométrico (Multiparámetro)
<b><i>Turbidez (NTU)</i></b>	Nefelométrico
<b><i>Cloruro – Cl<sub>-</sub> (mg/L)</i></b>	Análisis titulometrico
<b><i>Nitrato – NO<sub>3-</sub> (mg/L)</i></b>	Espectrométrico ultravioleta selectivo
<b><i>Sulfato – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L)</i></b>	Turbidimétrico
<b><i>Amonio – NH<sub>4</sub> (mg/L)</i></b>	Espectrofotometría a 410 nm
<b><i>Alcalinidad (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</i></b>	Análisis titulometrico
<b><i>Color Real (PCU)</i></b>	Ensayo colorimetría

*Autor, 2019.*

## **8.2 Metodología segundo objetivo específico:**

Una vez se realizó la caracterización del agua y se encontró las deficiencias en el cumplimiento de los valores límites máximo permisibles de contaminantes respectivos, se comenzó el análisis de cada una de las alternativas planteadas para el tratamiento de las aguas residuales: C/F, E/F y mixto.

Estas alternativas fueron seleccionadas previamente debido a su eficiencia en las fases de sedimentación y remoción de partículas en suspensión y materia orgánica, debido a que las aguas residuales provenientes de mataderos y centros de sacrificio animal contienen altos contenidos de materia orgánica. (Pabón, 2009)

Para llevar a cabo el cumplimiento de este objetivo se determinaron 2 fases (Figura 9): La primera consistió en la evaluación de cada una de las alternativas planteadas para el tratamiento del efluente a través de pruebas experimentales con el fin de encontrar la eficiencia de cada una de estas para la disminución de la carga orgánica del efluente. La segunda fase de este objetivo se situó en la selección de la mejor alternativa a través del análisis de la eficiencia de cada proceso, la menor utilización de reactivos y agentes químicos y la adaptabilidad de esta al sistema de tratamiento actual con el que cuenta

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

la planta de beneficio animal del municipio. Todos los experimentos fueron desarrollados en laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad El Bosque.

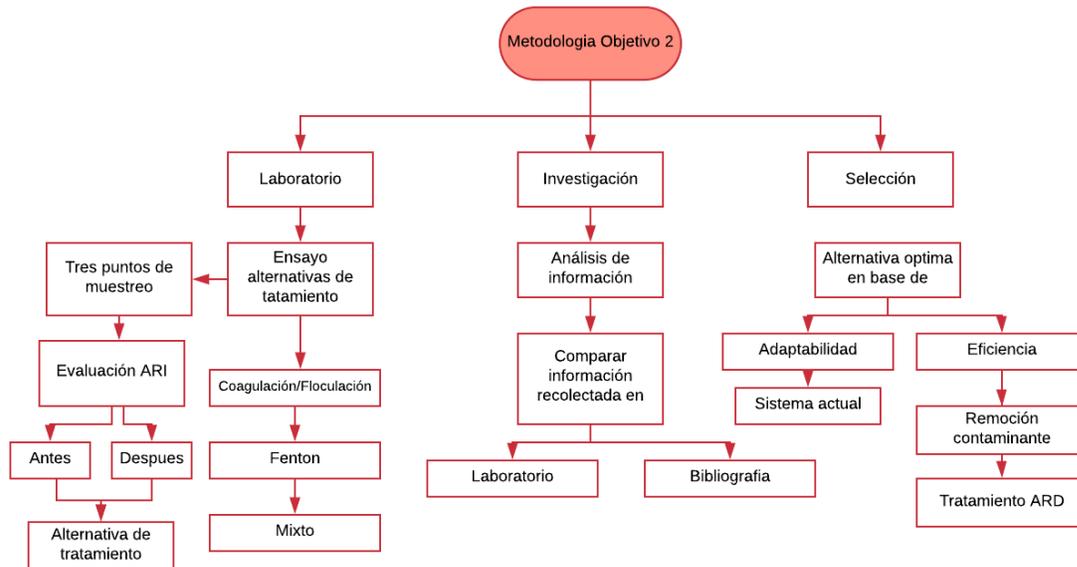


Figura 9. Diagrama de proceso metodología objetivo específico II. Autor, 2019.

### 8.2.1 Evaluación del proceso Coagulación-Floculación

El proceso de Coagulación-Floculación (C/F) fue realizado en un equipo de jarras marca Phipps & Bird con capacidad para 6 recipientes. En cada beaker fue adicionado un volumen de 200 mL de ARF, cuyo pH fue ajustado usando 1M de *HCl*. En primera medida, se realizaron pruebas preliminares a través del ensayo de jarras para la selección del coagulante ideal a concentraciones específicas. El diseño experimental fue establecido para la realización de pruebas por triplicado, con la finalidad de determinar los valores óptimos de pH y concentración de coagulante, determinando al final de cada ensayo la turbidez y la DQO obtenida. Como coagulante fue empleado una solución de 5g/L. Todos los test fueron realizados a temperatura ambiente (18°C). La fase de coagulación comprendió un periodo de agitación rápida (220 rpm) durante 3 min, seguida por una fase de floculación empleando una agitación de 30 rpm durante 20 minutos. Estas condiciones operacionales fueron establecidas conforme a datos reportados en literatura (Racar et al.,2019). Para separar los flocs del efluente clarificado, una etapa de sedimentación fue desarrollada durante 24 h., tiempo después del cual una porción de sobrenadante fue colectada para determinar pH, turbidez, cantidad de lodos sedimentados y DQO. Mediante la realización de pruebas preliminares y resultados reportados en literatura, fue establecido que la adición de floculante no era necesaria.

Inicialmente, fue determinado el pH óptimo de la reacción, evaluando 5 diferentes tratamientos, ajustando el pH inicial (2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6.8). Al obtener el pH ideal, se evaluó la efectividad del coagulante a 6 diferentes concentraciones, cuyo rango fue establecido conforme a referentes teóricos y a las pruebas preliminares realizadas (Tabla 8).

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 8. Volumen de coagulante requerido para cada concentración.

Concentración Coagulante (mg/L)	100	300	500	700	900	1100
Volumen Coagulante (ml)	1	3	5	7	9	11

Autor, 2020

### 8.2.2. Evaluación proceso Electro-Fenton.

Para el proceso de Electro-Fenton se utilizó el montaje de una celda electroquímica propuesto por Davarnejad & Nasiri, 2017 (Figura 10).

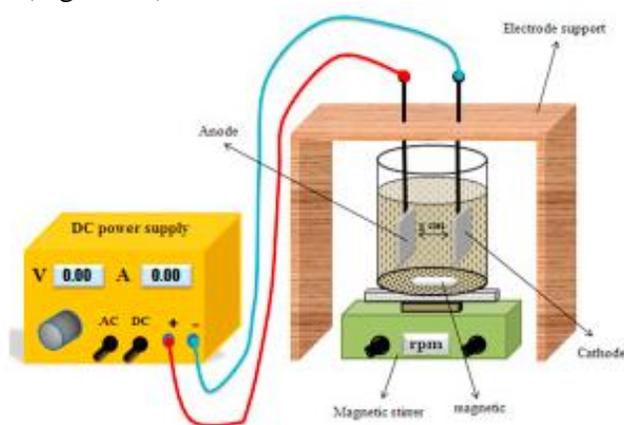


Figura 10. Montaje de una celda electroquímica. Fuente: Davarnejad & Nasiri, 2017

Este montaje consistió en la utilización de un vaso precipitado con capacidad de 1L como recipiente reactor. Dentro de este fueron colocados dos electrodos de acero inoxidable de forma rectangular y con medidas de 2 cm de alto y largo y 0,5 cm de grosor; estos fueron colocados en suspensión aproximadamente 2 cm con respecto al fondo del recipiente reactor por medio de dos alambres de cobre de 20 cm de largo cada uno, los cuales se sujetaron cada uno a una pinza eléctrica para así poder afianzar y mantener en suspensión cada electrodo. Cada uno de los electrodos tuvo una separación respecto al otro de 3 cm. Dentro del reactor se vertieron 300 ml de la muestra de agua residual de frigorífico, se agregó la cantidad deseada de  $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$  y se conectó los electrodos a una fuente de alimentación de corriente continua a 03,7 V y 0,07 A. Para las pruebas que requirieron la modificación del pH fue usado 1M de HCl, según los valores requeridos.

Posteriormente, el montaje fue dispuesto sobre una plancha de agitación a una velocidad de agitación de 400 rpm durante 1 h. y se agregó la cantidad requerida de  $H_2O_2$  al 30%. Este, al ser un proceso que necesitó de agitación constante, requirió el uso de dos deflectores de madera ubicados en los extremos del reactor con el fin de que se lograra el rompimiento del vórtice que se genera al usar agitadores magnéticos dentro de una muestra.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Las variables independientes que se evaluaron en este ensayo fueron pH, relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$  y tiempo de reacción (Tabla 9). Al terminar cada una de las pruebas realizadas se agregó a la muestra 0,5 g de  $Na_2SO_3$  con el fin de detener el proceso oxidativo. Una vez el tiempo de reacción culminó, se dejó el efluente en reposo durante 24 horas para favorecer el proceso de sedimentación, tiempo después del cual una porción de sobrenadante fue colectada para determinar pH, turbidez, cantidad de lodos sedimentados y DQO.

Tabla 9. Variables independientes.

Variable independiente	Niveles codificados de variables.		
	-1	0	1
Relación molar $H_2O_2/Fe^{+2}$	0,5	1,5	3,0
pH	2	4	6
Tiempo de reacción	20	40	60

Autor, 2020.

### 8.2.3 Evaluación del proceso mixto (C/F+E/F)

Para el desarrollo de esta estrategia fueron aplicadas las primeras condiciones operacionales descritas anteriormente, empleando valores de pH, concentración de coagulante y relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$  óptimos determinados.

Adicionalmente, en este ensayo fue realizada una prueba adicional para determinar la concentración de sólidos volátiles generados en el proceso. Para ello, los sólidos sedimentados fueron extraídos de la muestra y se colocaron a secar en una capsula de porcelana en el horno a 103°C durante 24 horas. Posterior a esto, fueron colocados en la mufla a una temperatura de 550°C durante 1 hora. Este procedimiento de secado se realizó con el fin de conocer la cantidad de sólidos volátiles presentes a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Sólidos volátiles} = \frac{\text{Peso}(103^\circ\text{C}) - \text{peso}(550^\circ\text{C})}{\text{Volumen sólidos}} \quad (12)$$

$$\text{Sólidos totales} = \frac{\text{peso}(103^\circ\text{C}) - \text{peso inicial sólidos}}{\text{Volumen sólidos}} \quad (13)$$

Una vez se obtuvieron estos dos resultados, se halló la relación VS/TS:

$$VS/TV = \frac{\text{Sólidos volátiles}}{\text{Sólidos totales}} \quad (14)$$

(APHA, 2015)

### 8.2.4 Análisis estadístico.

A partir de los datos obtenidos en cada una de las estrategias empleadas, asociados a la concentración de materia orgánica (medida como DQO), fue realizado un análisis estadístico con la finalidad de

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

establecer si entre los tratamientos aplicados existía una diferencia estadísticamente significativamente. Para ello, inicialmente fue verificada la normalidad de la distribución de los datos mediante la prueba de Lilliefors. Posteriormente, los datos se compararon utilizando el análisis de varianza unidireccional (ANOVA) seguido de la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%. Todos los análisis fueron realizados usando el software R (Versión 3.5.1).

### 8.3 Metodología tercer objetivo específico:

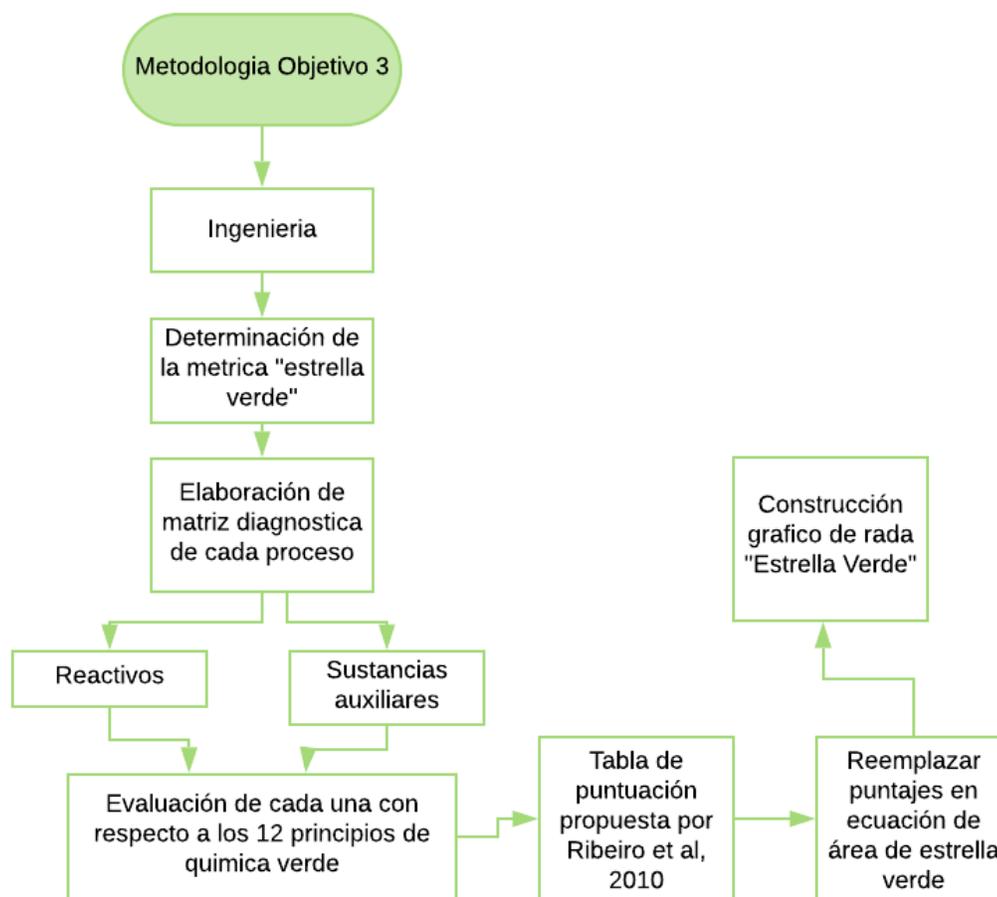


Figura 11. Diagrama de proceso metodología objetivo específico III. Autor, 2019

Este objetivo, constó de una sola fase (Figura 11), la cual consistió en calcular y determinar el índice de química verde para cada uno de los procesos evaluados. Para esto, se adaptó la metodología propuesta por Morales et al., 2011; Ribeiro et al., 2010.

Inicialmente, se realizó un diagrama de flujo en el que se mencionó cada una de las etapas, reactivos y sustancias presentes en cada uno de los procesos evaluados: C/F, E/F y Mixto; evaluando en cada etapa la relación frente al cumplimiento de los principios de química verde (Tabla 12) a través de un código de color (Tabla 10) en el que se determina que tanto acercamiento verde tiene cada una de las etapas dentro del proceso.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 10. Porcentaje de cumplimiento principios de química verde.

Nivel de acercamiento	Porcentaje de cumplimiento del principio	Color
<b>Gran acercamiento verde</b>	67-100%	
<b>Ligero acercamiento verde</b>	34-67%	
<b>Bajo acercamiento verde</b>	0-33%	

Fuente: Morales et al., 2011.

Posteriormente, se construyó una matriz de evaluación de las sustancias y reactivos utilizados dentro de los procesos, en la cual se valoraron 6 criterios propuestos por (Ribeiro et al., 2010) como lo son los riesgos de estas frente a la salud humana, el ambiente, así como sus características de inflamabilidad, reactividad, degradabilidad y renovabilidad (Tabla 11). Cabe resaltar que cada uno de los criterios se dividió en subcriterios con el fin de realizar una evaluación más específica. Esta evaluación se realizó a través de la revisión de fichas de seguridad de cada una de las sustancias involucradas en los diferentes procesos evaluados.

Tabla 11. Criterios para la evaluación de sustancias envueltas en los procesos químicos.

Criterio	Subcriterio
<b>Riesgo a la salud humana</b>	C-corrosivo T-Toxico T+-Muy toxico Xi-Irritante Xn-Perjudicial No-No indicado
<b>Riesgo en el medio ambiente</b>	N- Peligroso para el ambiente No-No indicado
<b>Inflamabilidad</b>	F- Altamente inflamable F+-Extremadamente inflamable No-No indicado
<b>Reactividad</b>	E-Explosivo O-Agente oxidante No-No indicado
<b>Degradabilidad</b>	Ndn-No degradable y no puede ser tratado para que las sustancias sean degradables a productos inocuos Nds-No degradable, pero puede ser tratado para hacer que las sustancias sean degradables a productos inocuos D- Degradable y rompible a productos inocuos
<b>Renovabilidad</b>	Nr-No renovable R-Renovable

Fuente: Ribeiro et al., 2010.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Dentro de esta misma matriz de evaluación se valoró los criterios y puntajes para la construcción del índice de química verde, el cual tiene como propósito la construcción de un diagrama en forma de estrella (Figura 12) que cuenta con un numero equivalente a cada uno de los 12 principios de química verde evaluados.

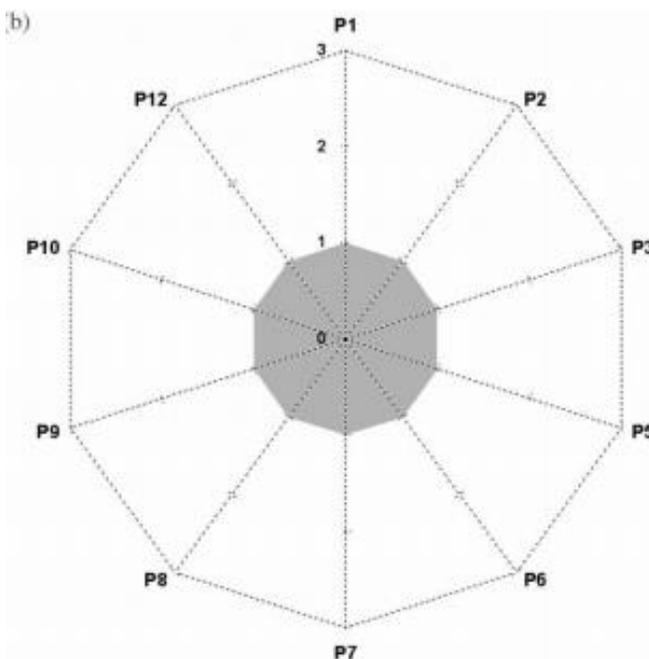


Figura 12. Estructura gráfico de radar para la construcción de la estrella verde. Fuente: Ribeiro et al., 2010.

Cada una de las esquinas tuvo una longitud equivalente al valor de cumplimiento de cada principio. Ribeiro et al., 2010 asignaron un valor a cada uno de los principios de química verde (Tabla 12) de manera que se pudiera dar un puntaje objetivo en bases a diferentes criterios que ellos determinaron, siendo 3 el máximo valor para el cumplimiento del principio y 1 el mínimo valor.

Tabla 12. Criterios de evaluación principios de la química verde

Principio de Química Verde	Criterio	Puntaje
<b>P1-Prevención</b>	Los desechos son inocuos	3
	Los desechos implican un riesgo moderado para la salud humana y el medio ambiente	2
	Los desechos implican un alto riesgo para la salud humana y el medio ambiente	1
<b>P2-Economía atómica</b>	Reacciones sin exceso de reactivos (<10%) y sin formación de subproductos	3

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

		Reacciones sin exceso de reactivos (<10%) y con formación de subproductos	2
		Reacciones con exceso de reactivos (>10%) y sin formación de subproductos	2
<b>P3-Síntesis química menos peligrosas</b>		Reacciones con exceso de reactivos (>10%) y con formación de subproductos	1
		Todas las sustancias involucradas son inocuas	3
		Las sustancias involucradas tienen un riesgo moderado para la salud humana y el medio ambiente	2
<b>P5-Solventes y sustancias auxiliares seguros</b>		Al menos una sustancia involucrada tiene un alto riesgo para la salud humana y el medio ambiente	1
		Los solventes y sustancias auxiliares no se usan, pero si se usan son inocuas	3
		Se utilizan solventes y/o sustancias auxiliares, pero tienen un riesgo moderado para la salud humana y el medio ambiente.	2
<b>P6-Incremento de eficiencia energética</b>		Al menos un solvente o sustancia auxiliar tiene un alto riesgo para la salud humana y el medio ambiente	1
		Temperatura y presión ambiente	3
		Presión y temperatura ambiente entre 0° y 100° C cuando se necesita enfriamiento o calefacción	2
<b>P7-Uso de materias primas renovables</b>		Presión diferente de la presión y/o temperatura ambiente >100 °C o menor a 0°C	1
		Todas las sustancias involucradas son renovables	3
		Al menos una sustancia involucrada es renovable (no se considera agua)	2
<b>P8-Reducción de derivados</b>		Ninguna de las sustancias involucradas es renovable	1
		No se utilizan derivaciones	3
		Solo se utiliza una derivación u operación similar	2

<b>P9- Catalizadores</b>	Se utiliza más de una derivación u operación similar	1
	Los catalizadores no se usan, pero si se usan son inocuos	3
	Se utilizan catalizadores, pero presenta un riesgo moderado para la salud humana y el medio ambiente	2
<b>P10-Diseñar para la degradación</b>	Se utilizan catalizadores y tienen un alto riesgo para la salud humana y el medio ambiente	1
	Todas las sustancias son degradables y se descomponen en productos inocuos	3
<b>P12- Química segura para la prevención de accidentes</b>	Todas las sustancias no degradables pueden ser tratadas para hacerlas degradables a productos inocuos	2
	Al menos una sustancia no es degradable ni puede ser tratada para hacerla degradable a productos inocuos	1
	Las sustancias utilizadas tienen un bajo riesgo de causar accidentes químicos	3
	Las sustancias utilizadas tienen un riesgo moderado de causar accidentes químicos	2
	Las sustancias utilizadas tienen un alto riesgo de causar accidentes químicos	1

*Fuente: Ribeiro et al., 2010.*

Una vez realizada la puntuación para cada objetivo se procedió a calcular el área de cada una de las secciones del grafico de radar (Ec.15). Para esto, se dividió  $360^\circ$  ( $\alpha$  toma el valor de  $360^\circ$  debido a que es el valor de la circunferencia) en 10 partes iguales, dando como resultado 36.

$$\text{Área de la sección} = \frac{((P_i * P_{i+1} - 1)(\text{Sen } \alpha))}{2} \quad (15)$$

Posterior a esto, se realizó la sumatoria de cada una de las 10 áreas (Ec. 16) para poder obtener el área total del grafico de radar de la siguiente manera:

$$\text{Área de la estrella verde} = \frac{[\sum_1^{10} (P_i * P_{i+1} - 1)](\text{Sen } \alpha)}{2} \quad (16)$$

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Para el cálculo de del área total de la estrella verde, se utilizó la Ecuación 17, en la cual al obtener un valor de área completo (puntaje de 3 en todos los casos) el cual significa que existe un nivel total de cumplimiento

$$\text{Área total de la estrella verde} = \left( \frac{(10(3 * 3 - 1)) * (\text{Sen } \alpha)}{2} \right) = \left( \frac{80 * (\text{Sen } \alpha)}{2} \right) \quad (17)$$

Finalmente, el porcentaje de cumplimiento se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de cumplimiento} = \frac{\text{área de la estrella verde}}{\text{Área total de la estrella verde}} * 100 \quad (18)$$

(Ribeiro et al.,2010)

#### **8.4 Enfoque de Investigación**

Teniendo en cuenta los diferentes enfoques propuestos por Hernández Sampieri (2014), se determinó que el enfoque del presente proyecto es Cuantitativo, ya que este abarca un conjunto de procesos secuenciales y probatorios, conformado por una serie de pasos o etapas que preceden la anterior y, aunque pueden ser modificables o redefinidas, no pueden ser eludibles.

Dicho enfoque también parte de una idea particular y, a través de revisión literaria se comienza a plantear preguntas de investigación, objetivos y la construcción de un marco teórico como herramientas útiles durante las etapas de desarrollo de la investigación, recolección, análisis y elaboración de reportes de resultados. Al tener un enfoque cuantitativo, se define que este proyecto será una investigación de tipo experimental, puesto que, para encontrar el proceso óptimo para ser implementado, se busca por medio de experimentos, tomando el cada tipo de método y aplicando a la muestra del aforo de agua tomado y finalmente midiendo la respuesta de cada uno. Esto se realiza para analizar las condiciones y parámetros fisicoquímicos del agua antes y después de implementar un método.

#### **8.5 Alcance**

El alcance de este proyecto se ha determinado teniendo en cuenta un conjunto de requisitos y características. Se encontró que el alcance es de tipo descriptivo, pues se busca definir y visualizar que se medirá y sobre qué elementos se recolectan los datos de un tema o problema de investigación que se pretende abarcar. Este tipo de alcance busca la medición de uno o más atributos del fenómeno de interés.

#### **8.6 Métodos**

Para este proyecto se determinó que se cuenta con un método de tipo analítico-deductivo, ya que el método deductivo es una forma de razonamiento y explicación de la realidad a partir de teorías generales hacia casos particulares y el método analítico se basa en la observación de un hecho particular para comprender su naturaleza y los efectos. (Sampieri, 2014). Esto se puede ver en el proyecto, debido a que se basa principalmente en la observación y caracterización de unos elementos particulares y el estudio de su comportamiento frente a la alteración o cambios en su estructura por medio de actividades, para luego ser comparado y estudiado a través de bibliografía.

#### **8.7 Técnicas**

Las técnicas que se utilizaron para la realización de esta investigación están enfocadas principalmente en búsqueda de información, análisis y depuración de datos y se hace uso de toma de muestras para

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

análisis en laboratorio. Estas técnicas no solo brindan un punto de partida como línea base puesto que de estas se extraen la mayor cantidad de datos que servirán como resultados y análisis de estos.

### **8.8 Instrumentos**

Uno de los primeros instrumentos que se utiliza la búsqueda de información a través de bases de datos, entidades públicas y demás sitios en donde la información sea verídica. Posterior a esto se hace una caracterización ambiental del sitio de estudio a través de entrevistas y toma de muestras del agua residual generada en la planta de beneficio animal. Una vez en laboratorio, se hace uso de instrumentos como multiparámetro, turbidímetro, entre otros para la caracterización del estado actual de los parámetros fisicoquímicos del agua y posterior a esto se realizará ensayos de laboratorio para determinar la eficiencia de cada uno de los métodos seleccionados para ser analizada su viabilidad de eficiencia en el objetivo de este trabajo. Finalmente, se hará uso de herramientas tecnológicas como software para el diseño final del sistema de tratamiento.

### **8.9 Plan de Trabajo**

El plan de trabajo se manejó a través de una matriz metodológica (Anexo 2.), en la cual se logró determinar para cada uno de los objetivos específicos diferentes actividades, variables, indicadores, técnicas e instrumentos que permitieron llevar a cabo el cumplimiento del objetivo.

## **9. Resultados y Discusión**

**9.1. Objetivo específico I: Elaborar un diagnóstico ambiental de los vertimientos de aguas residuales generados en la planta de beneficio animal del municipio.**

### **9.1.1 Identificación del área de estudio**

Se realizó una visita técnica en el mes de octubre de 2019 a las instalaciones de la planta de beneficio animal del municipio Girardot (Cundinamarca) con el fin de realizar un reconocimiento de las instalaciones asociadas a la planta de tratamiento de aguas residual (PTAR) (Figura 13 g.). Por medio de una visita guiada por el ingeniero ambiental de la empresa, y a través de la aplicación de ficha de preguntas elaborada previamente (anexo 1) se conoció que los efluentes provenientes del sacrificio son inicialmente dispuestos en un pozo de recepción de aguas crudas. La primera fase de la PTAR consiste en un sistema de tratamiento primario, el cual consta inicialmente de un cribado seguido de una trampa de grasas por la que circula el agua residual (Figura 13 a.). Seguidamente, el efluente es conducido a un tanque de sedimentación (Figura 13 b.) por medio de una motobomba sumergida. Este proceso de sedimentación tiene una duración de aproximadamente tres horas y en el mismo adicionan un agente coagulante comercial (biofloc). Los lodos generados en esta etapa son dispuestos en un lecho de secado (Figura 13 c.). Una vez el agua es retirada del tanque de sedimentación, es conducida a un tanque de desinfección (Figura 13 d.), donde las aguas residuales son expuestas a una dosis de  $H_2O_2$ . Posterior a esto, el agua pasa por gravedad a través de dos filtros de arena (Figura 13 e.) para finalmente ser dispuesto en la red de alcantarillado municipal a través de un canal conductor (Figura 13 f.), conforme a las disposiciones establecidas en la licencia ambiental de la empresa, las características del efluente son analizadas trimestralmente, para verificar que se atiendan las disposiciones legales requeridas. Esta PTAR tiene la capacidad de tratar aproximadamente 9 L/s y tiene un porcentaje de remoción contaminante de 76%. Estas características pueden variar según la cantidad de reses sacrificadas. En promedio, la planta de beneficio animal sacrifica 30 reses al día.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Se estableció que la mayoría de material contaminante del agua residual corresponde a estiércol/heces, contenido estomacal, pelo, agua de desinfección y sangre como contaminante principal, subproducto del proceso productivo cárnico desde que el animal entra en pie hasta su entrega final.



Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.



*Figura 13..Infraestructuras que conforman la PTAR presente en la PBA de Girardot, Cundinamarca: a) Cribado y trama de grasas, b) Tanque de sedimentación, c) Lecho de secado, d) Tanque de desinfección, e) Filtro de arena, f) canal conductor. g) vista general Planta de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR). Autor, 2020*

### **9.1.2 Recolección de muestra**

Fueron realizadas dos visitas técnicas con el fin de obtener muestras del agua residual generada en el frigorífico. La primera visita, realizada en el mes de noviembre de 2019 se recaudó un volumen total de 2,5 L en tres puntos del sistema de tratamiento. Como se presenta en la Figura 14, el Punto 1: caja de aguas crudas, es aquel en donde se recibe el agua residual proveniente del proceso de sacrificio y se dispone a ingresar al proceso de tratamiento; Punto 2: Entrada a la trampa de grasas, lugar donde el agua ya ha pasado por un proceso previo de cribado en el que se retienen sólidos de gran tamaño y, Punto 3: Pozo final de recepción, en el cual el agua ya ha pasado por todo el proceso de tratamiento y se dispone a ser vertida en el sistema de alcantarillado municipal.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

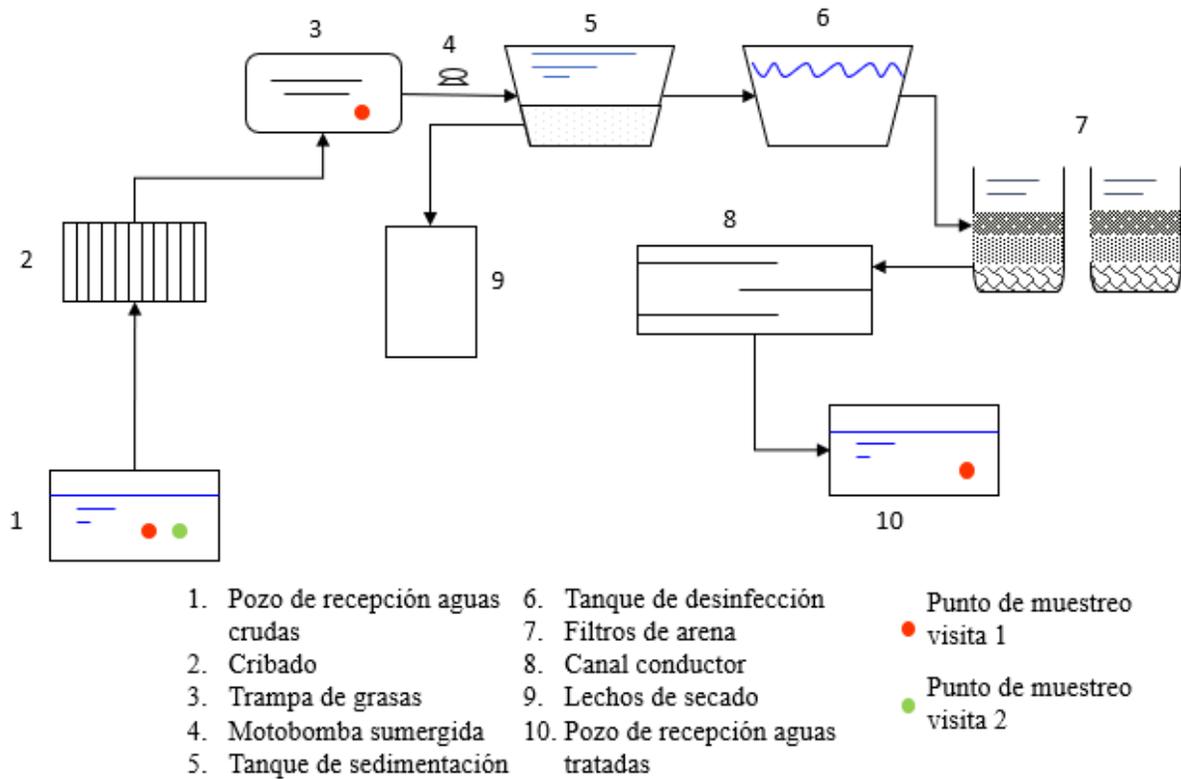


Figura 14. Configuración de la PTAR de la PBA. Autor, 2019.

Para la segunda visita, realizada en el mes de febrero del año 2020, como se muestra en la Figura 14, se realizó colecta de muestra de 10 L únicamente en el punto 1. Esto se realizó como una medida de abastecimiento de efluente para la posterior evaluación de las alternativas C/F, E/F y Mixto.

A continuación, se describe la caracterización fisicoquímica de las muestras colectadas.

### 9.1.3 Caracterización fisicoquímica del agua residual

Para cada una de las muestras colectadas se realizó la caracterización de diferentes parámetros fisicoquímicos. Este análisis permitió realizar una comparación de las características del efluente en estudio frente a los valores máximos permisibles establecidos en la resolución 0631 de 2015 (Miambiente, 2015), y establecer las condiciones iniciales para el desarrollo de las alternativas propuestas.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 13. Caracterización fisicoquímica

Parámetro	Punto de muestreo			Valor máximo permisible (Resolución 631 de 2015)
	Punto 1 <sup>1,2</sup>	Punto 2 <sup>3</sup>	Punto 3 <sup>3</sup>	
<i>pH (Unidades de pH)</i>	6,3±0,34	6,46 ±0,03	6,80 ± 0,05	6,0-9,0
<i>Temperatura (°C)</i>	25	25	25	40,0
<i>DQO (mg/L O<sub>2</sub>)</i>	1216 ±355	930 ±55,6	924 ± 53,02	800
<i>DBO (mg/L O<sub>2</sub>)</i>	790	722	282	450
<i>ST (mg/L)</i>	508±83,71	1133 ±177,3	404 ±39,3	225
<i>SDT (mg/L)</i>	276±31	280±4,9	434±4,9	N/A
<i>SSED (mL/L)</i>	14	38	1,5	5
<i>Conductividad (µS/cm)</i>	565±46	556,67 ±10,06	860 ± 11,4	N/A
<i>Salinidad (ppt/L)</i>	0,316±0,02	0,309 ± 0,007	0,461 ± 0,003	N/A
<i>Resistividad (KΩ. cm)</i>	1,81±0,16	1,807 ± 0,058	1,163 ± 0,015	N/A
<i>Turbidez (NTU)</i>	492±204	610,66 ± 162	303,67 ± 3,21	N/A
<i>Cl<sup>-</sup> (mg/L)</i>	11,12±1,48	8,05±1,48	6,86±1,08	600
<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</i>	0,00052	-	-	Análisis y reporte
<i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L)</i>	40±0,001	-	-	500
<i>Alcalinidad (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</i>	113,1±10,3	-	-	Análisis y reporte
<i>Color Real (PCU)</i>	>500	131 ± 5,6	460 ± 33,9	análisis y reporte

\*DQO: Demanda Química de Oxígeno, DBO: Demanda Biológica de Oxígeno, ST: Sólidos Totales, SDT: Sólidos Disueltos Totales, SSED: Sólidos Sedimentables, Cl: Cloruro, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Nitrato, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: Sulfato, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: Amonio

1. Los valores de los parámetros pH, DBO, DQO, ST, SDT, conductividad, salinidad, resistividad, turbidez y color real del punto 1 corresponden al valor medio de tres repeticiones y desviación estándar de los dos periodos de muestreo
2. Los valores de los parámetros cloruro, nitratos, sulfatos y alcalinidad corresponden únicamente al segundo periodo de muestreo.
3. Los valores de los parámetros en los puntos 2 y 3 corresponden al valor promedio de tres repeticiones y desviación estándar de estas

Autor, 2020

Los resultados de la caracterización fisicoquímica dieron como resultado que el punto 1, el cual se utilizó como referente para el desarrollo del presente trabajo, tiene un pH de 6,63 a una temperatura de 25°C, DQO de 1216 mg/L, una DBO de 790 mg/L y un valor de sólidos totales de 508 mg/L. Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015 realizan una caracterización general de las aguas residuales de matadero, en la cual mencionan que el rango de valores de DQO para aguas residuales de frigorífico se encuentra entre 70-1200 mg/L, tomando como valor medio 546 mg/L; DBO entre 150-4635 mg/L y un promedio de 1209 mg/L. Por otra parte, Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015 mencionan que los sólidos suspendidos totales se presentan en una cantidad de 270-6400 mg/L y 1164 mg/L como promedio; parámetros como el pH y la turbidez se establecen en rangos de 4,98-8,0 y 200-300 FAU respectivamente. El pH se encuentra en promedio en el valor de 6,95 y la turbidez en 275 FAU. Por otra parte, el estándar estadounidense propuesto por la agencia de protección ambiental- EPA, 2004 menciona que los límites para los parámetros DBO, DQO y sólidos suspendidos totales debe ser de 25, 125 y 50 mg/L respectivamente (EPA,2004). Al comparar los resultados obtenidos en este proyecto frente a lo

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

mencionado por Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015, el valor de DQO se encuentra por encima del promedio esperado, mientras que la DBO y sólidos suspendidos totales se encuentran dentro del rango planteado. Sin embargo, al realizar la comparación frente a lo mencionado por la EPA, estos tres parámetros se encuentran muy por encima de lo permitido.

Al realizar la comparación de la caracterización del agua residual tomada en los tres puntos de muestreo seleccionados se encontró que el proceso es susceptible de optimización, dado que no alcanza la remoción ideal de carga contaminante, específicamente para los parámetros de DQO, DBO, ST y SSED, según los lineamientos de la normatividad.

La DQO presentó niveles altos en los tres puntos de muestreo (1525 mg/L, 930 mg/L y 924 mg/L respectivamente); principalmente, el punto de muestreo 3 obtuvo un valor superior al establecido por la norma. Por otra parte, la DBO presenta valores altos tanto para el punto de muestreo 1 como el punto de muestreo 2 (790 mg/L y 722 mg/L respectivamente) mientras que en el punto de muestreo 3 mostró un valor de 282 mg/L, ubicándose por debajo de la norma. Esto indica que hay alta presencia de contaminantes orgánicos provenientes en su mayoría de fluidos de los animales. Por ejemplo, la sangre puede llegar a aportar de 4000-5000 mg/L de DBO al agua (Chaux et al.,2009). Esto puede indicar que el proceso actual presenta falencia en la remoción de contaminantes orgánicos.

En base a los resultados obtenidos para DQO y DBO<sub>5</sub>, se estableció el factor de biodegradabilidad (Fb) (Tabla 14)

*Tabla 14. Factor de biodegradabilidad de cada punto de muestreo.*

	<b>DBO<sub>5</sub></b>	<b>DQO</b>	<b>Fb</b>
<b>Punto 1</b>	790	1216	0,65
<b>Punto 2</b>	722	930	0,77
<b>Punto 3</b>	282	924	0,30

DBO<sub>5</sub>: Demanda Biológica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

*Autor, 2020*

Según los criterios establecidos por Ardila et al., 2015 (Tabla 6-Sección 7.1.2), un índice Fb inferior a 0,7 es característico de efluentes poco biodegradables. Consecuentemente, analizando los resultados del índice Fb obtenidos, se encontró que el agua residual recolectada en los puntos de muestreo 1 y 2 presentan poca biodegradabilidad de materia orgánica. Esto indica que el efluente en estos dos puntos presenta dificultad para ser tratado a través de métodos biológicos (Chaux et al.,2009), siendo un indicativo de que este contiene altos contenidos de compuestos orgánicos no biodegradables y que la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar dicha materia orgánica por medios químicos y convertirla en dióxido de carbono es alta (Chaux et al.,2009).

Por otra parte, se encontró que la cantidad de SST en los tres puntos de muestreo superan el valor máximo permisible según la normativa. Este parámetro evalúa la cantidad de partículas que se mantienen en suspensión en las corrientes de aguas residuales (SIAC, 2007). Esto puede deberse en primera medida a la cantidad de materiales que arrastra el agua tales como pelos, heces, sangre y demás que no son previamente retenidos debido a la carencia de un sistema de cribado adecuado que retenga sólidos de menor tamaño.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Se determinó que el pH para los tres puntos se encuentra en un rango de 6,32 a 6,80. Al comparar esto con la escala de pH se puede decir que se encuentra en los tres puntos un pH neutro que tiende a ser ligeramente ácido. Bustillo- Lecompte & Mehrvar, 2015 mencionan que el pH de las aguas de matadero se encuentra entre pH de 4,90 a 8,0, por lo que se consideran aguas que van desde condiciones neutras a ácidas. De igual forma, Mateus & Poveda, 2016 manifiestan que el agua residual de un frigorífico, al contener en su mayoría residuos orgánicos, tiende a tener un pH ácido.

El valor de nitrógeno presente en el agua es de 0,00052 mg/L. Chaux et al.,2009 explican que la presencia de nitrógeno en este tipo de agua residual se debe a compuestos como la urea y heces animales con altos contenidos de proteína no asimilada, produciendo que se presente altos valores de DQO, pero no de DBO en el agua, producto de la difícil biodegradabilidad de elementos como el rumen.

La conductividad, es la capacidad que tiene el agua para poder conducir electricidad, calor o sonido a través de ella. Esta depende de la presencia de iones y la valencia y concentración de estos. Las aguas residuales con contenidos orgánicos con características difíciles de disociar presentan valores de conductividad más bajos que las aguas residuales que contienen ácidos, bases y sales. De igual manera, la presencia de sólidos totales disueltos afecta este parámetro puesto que al agua contener mayor cantidad de sólidos, la actividad iónica en términos de su capacidad para transmitir corriente disminuye (Lenntech, 2018).

El parámetro de turbidez es la propiedad óptica del agua para que la luz pueda dispersarse a través de esta. Se asocia a la transparencia o carencia de esta debido a la presencia de partículas y material en suspensión. A mayor contenido de material en suspensión, mayor será el valor de la turbidez, debido a que dicho material evitará el paso de luz solar al agua (Deloya, 2006).

Aunque los parámetros de conductividad, resistividad y turbidez no se reportan según la resolución, se hizo el análisis de estos ya que son propiedades fisicoquímicas que se deben tener en cuenta para el éxito o fracaso de la selección de la alternativa más eficaz para implementarse. Parámetros como el color real y alcalinidad, aunque no tengan un límite máximo permisible determinado por la resolución, se exige su análisis y reporte.

**9.2. Objetivo específico II: Analizar la efectividad de los procesos Coagulación-Floculación y Electro-Fenton, considerando la eficiencia de remoción de la carga contaminante y los costos asociados durante el tratamiento de los efluentes de la planta de beneficio.**

### **9.2.1 Coagulación-Floculación (C/F)**

En los siguientes apartados se describe el proceso y los resultados obtenidos dentro de la evaluación de la alternativa Coagulación-Floculación (C/F) para el tratamiento del agua residual generado en la planta de beneficio animal de Girardot, Cundinamarca.

Para el proceso de coagulación se seleccionaron previamente dos opciones de coagulantes utilizados comúnmente:  $Al_2(SO_4)_3$  y  $FeSO_4$ . Esto se realizó con el fin de evaluar la efectividad de cada uno de estos frente al agua residual colectada. Para esto, se realizó una prueba preliminar, la cual consistió en preparar una solución de 5000 mg/L de coagulante. Posteriormente, fueron realizados los cálculos correspondientes para obtener una concentración final de 500 mg/L en matraces conteniendo 200 mL del efluente. Estos fueron colocados en el equipo de jarras junto con una muestra de agua residual bruta de 200 mL que se utilizó como control, en una mezcla rápida de 3 minutos a 220 rpm, luego 20 minutos en mezcla lenta y 30 minutos en sedimentación. Una vez transcurrido el tiempo, se tomó una alícuota de 15

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

mL de la muestra con  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeSO_4$  y la muestra control para medir la turbidez de cada una de estas.

Según estos ensayos, se encontró que el coagulante que más disminuyó la turbidez de la muestra de agua residual en comparación con la muestra control fue  $FeSO_4$ . Esto se puede explicar debido a que compuestos de aluminio son funcionales en la coagulación a pH superiores a 8.5, mientras que los compuestos férricos presentan una buena coagulación a pH comprendidos entre 6.0 y 8.0, rango en el que el aluminio tiene una ineficiente coagulación (Lorenzo, 2006)

Además, se seleccionó dicho coagulante como una estrategia que pudiera ser aplicable en el proceso Electro-Fenton y así poder reducir el uso de reactivos.

### 9.2.1.1 Efecto del pH

Una vez se determinó que el coagulante ideal para utilizar fue  $FeSO_4$ , fueron evaluados diferentes valores de pH con una concentración de coagulante determinada.

Al tener la muestra de agua residual bruta un valor de pH de 6.93 se estableció que los valores de pH a trabajar serían 2,0;3,0;4,0;5,0 y 6,8 en volúmenes de agua de 200 mL; Para esto, se agregó una pequeña cantidad de  $HCl$  con el fin de reducir el valor de pH hasta el valor requerido. Posterior a esto, a cada uno de los recipientes se agregó 7 ml de solución de 20.000 mg de  $FeSO_4$  / L agua destilada. Se estableció también un volumen de 200 mL de agua residual bruta, la cual no se modificó su valor de pH puesto que se utilizó como muestra control frente a los demás volúmenes.

Se realizó un ensayo de jarras de mezcla rápida a 220 rpm durante 3 minutos, mezcla lenta a 30 rpm durante 20 minutos y posterior a esto las muestras se dejaron en sedimentación durante 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo se evaluaron diferentes parámetros fisicoquímicos del agua como la conductividad y resistividad, entre otros (Anexo 3.) sin embargo, la determinación del pH ideal se basó principalmente en los parámetros turbidez y DQO del agua. Al finalizar el análisis de estos parámetros se utilizó NaOH 10 M con el fin de neutralizar el pH del efluente.

Tabla 15. Resultados de turbidez y DQO para los valores de pH evaluados.

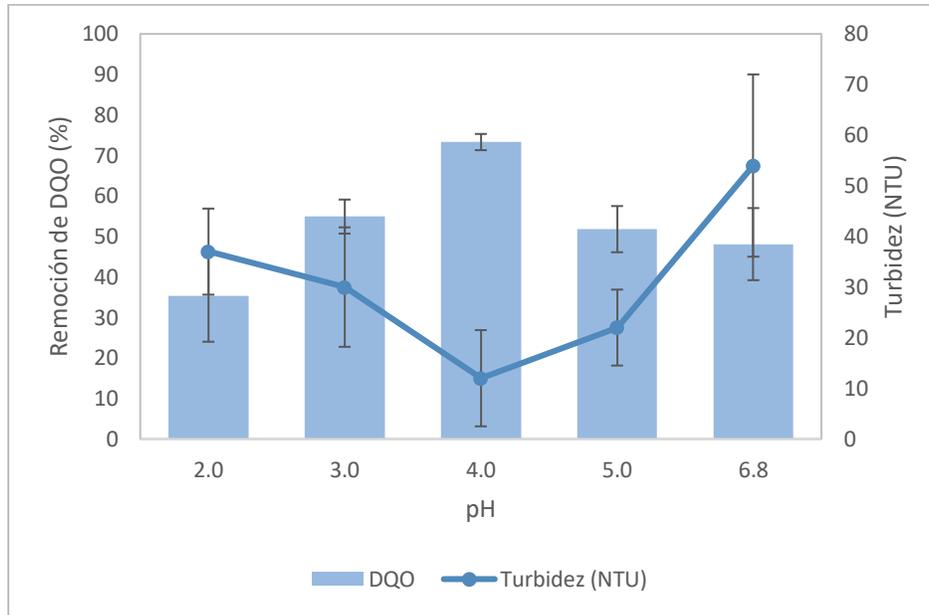
Muestra (pH)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)
<b>Control (6.93)</b>	35	703,7
<b>c.v (%)</b>	19,9	8
<b>2,0</b>	45	454,7
<b>c.v (%)</b>	19	17
<b>3,0</b>	30	316,7
<b>c.v (%)</b>	18,7	9
<b>4,0</b>	12	187,7
<b>c.v (%)</b>	56,1	8
<b>5,0</b>	22	252,3
<b>c.v (%)</b>	33,6	16
<b>6.8</b>	54	198,7
<b>c.v (%)</b>	25	2

\*c.v corresponde al coeficiente de variación para cada uno de los valores

Autor, 2020.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

En base a los resultados obtenidos de turbidez como se muestran en la Tabla 15, se pudo determinar que el valor ideal de pH es 4,0 ya que al comparar este con el valor de turbidez obtenido para la muestra control, es decir el agua residual bruta, se obtuvo una reducción de casi 66 % al utilizar una dosis de 7 ml de coagulante.



Gráfica 1. Determinación del pH ideal a partir de la disminución de turbidez y porcentaje de remoción de DQO. Autor, 2020

El valor de pH 2,0 presentó mayor turbidez incluso con respecto a la muestra control (Gráfica 1), por lo que se podría considerar que el coagulante no logró sedimentar de manera correcta y provocó que el efluente se tornara más turbia. Pese a esto, se estima que a partir de un pH de 2,5 se comienza a dar una disminución de la turbidez, producto de la desestabilización de las partículas coloidales hasta llegar a un punto final en pH de 4,0.

Por otra parte, se encontró que, aunque el valor de pH que más disminuyó la DQO de la muestra fue 4,0 (Gráfica 1), hubo valores de pH en el que se obtuvieron buenas condiciones de remoción de DQO, como es el caso de pH 5,0. Autores como Aguilar et al.,2005 utilizaron Sulfato férrico para el tratamiento de aguas residuales de matadero y obtuvieron como resultado que el rango óptimo de pH para este coagulante es entre 6-7, puesto que se logró una remoción de DQO de 87% y 88% respectivamente. el estudio realizado por Fabris et al.,2012 encontró que, al utilizar sulfato férrico como coagulante, se eliminó más del 70% de DQO a pH 4. Esto se debe a que los coagulantes presentan mayor efectividad cuando el pH del agua se encuentra cercano a su punto isoeléctrico, el cual es pH 4,5 para coagulantes férricos. Sin embargo, los resultados obtenidos a través de pruebas de laboratorio demuestran que en el valor de pH 4 se encuentra una disminución considerable de la DQO (73,3%) frente al caso control, lo cual se asemeja a los resultados obtenidos por Fabris et al., 2012. También se puede observar que a un pH de 6,8 se obtuvo una aceptable reducción de este parámetro (48.1 % de disminución), por lo que se puede decir que el rango óptimo iniciaría desde un valor mínimo de 4,0 hasta un valor máximo de 6,8.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

### 9.2.1.2 Efecto de la concentración de coagulante.

Una vez que se determinó que el pH ideal para el proceso fue de 4,0 se procedió a determinar la dosis óptima de coagulante. Para esto se evaluaron 6 diferentes volúmenes de concentración: 100, 300, 500, 700, 900 y 1100 mg/L  $FeSO_4$ . A través de la realización de pruebas preliminares se encontró que al usar volúmenes de coagulante inferiores a 100 mg/L no se obtuvo una disminución de la turbidez considerable (Remoción <2%).

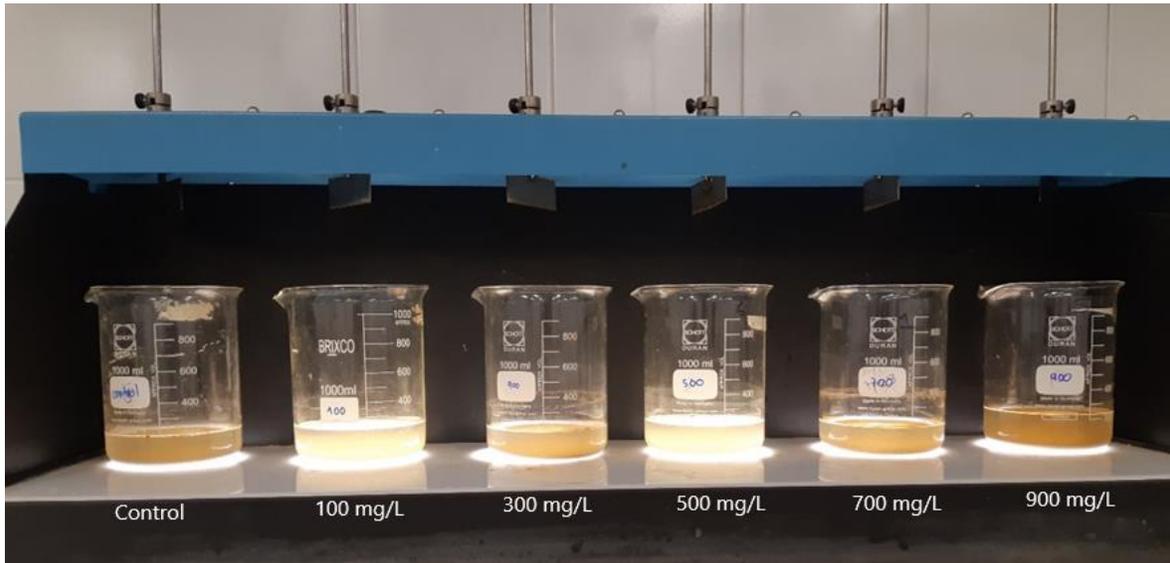


Figura 15. Ensayo de jarras para la determinación de la dosis ideal de coagulante. Autor, 2020

Al igual que para la determinación de pH, esta prueba se realizó en el equipo de jarras presente en el laboratorio (Figura 15). Cada una de las concentraciones correspondientes se evaluaron en volúmenes de 200 ml de efluente, los cuales se colocaron en agitación rápida durante 3 minutos, luego agitación lenta durante 20 minutos y posteriormente se dejó en reposo para permitir que el proceso de sedimentación fuese llevado a cabo.

El tiempo que se determinó para permitir que el proceso de sedimentación se llevase a cabo de manera correcta fue de 24 horas; una vez transcurrido este tiempo se realizó la medición de los parámetros fisicoquímicos de conductividad, salinidad, resistividad, SDT, SSED, turbidez y DQO (Anexo 4). Sin embargo, la determinación de la dosis ideal de coagulante se basó principalmente en los parámetros de turbidez y DQO. (Tabla 16). No obstante, una vez finalizó el análisis de estos parámetros se utilizó NaOH 10 M con el fin de neutralizar el pH del efluente.

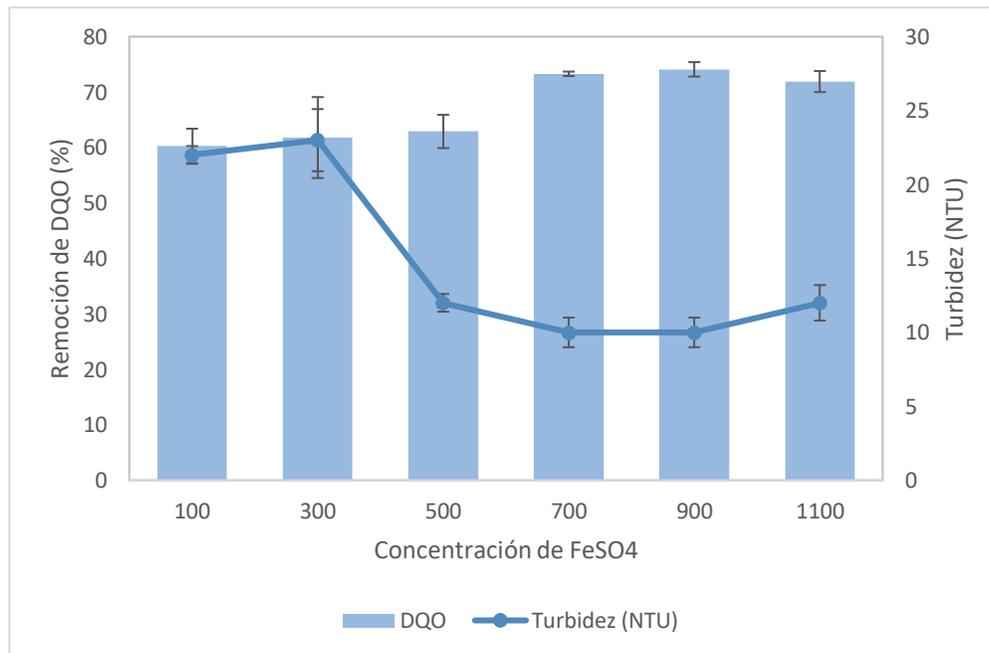
Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 16. Resultados de turbidez y DQO para las concentraciones de coagulante evaluados.

Muestra (concentración)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)
Control (sin concentración)	35	703,7
c.v (%)	19,9	8
<b>100</b>	22	245,7
c.v (%)	2,7	17
<b>300</b>	22	235,3
c.v (%)	9,3	18
<b>500</b>	12	190,0
c.v (%)	4,9	4
<b>700</b>	10	187,7
c.v (%)	13,5	1
<b>900</b>	10	182,0
c.v (%)	10	5
<b>1100</b>	12	197,7
c.v (%)	9,9	7

\*c.v corresponde al coeficiente de variación para cada uno de los valores

Autor, 2020.



Gráfica 2. Comportamiento de la turbidez y porcentaje de remoción de DQO bajo diferentes concentraciones de coagulante. Autor, 2020

Fue evidenciado que la mayor eficacia del coagulante para disminuir la turbidez y DQO del agua residual se presentó a una concentración de 900 mg/L (Gráfica 2), ya que logró una disminución en cada uno de los parámetros mayor al 50% de su valor inicial. Para el caso de la turbidez, se logró una

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

disminución del 71,4% mientras que para la DQO se obtuvo una disminución de 74,1%. Audic et al.,1983 señalaron que al agregar dosis de 150 mg/L y 300 mg/ de Sales de hierro solo se consigue una reducción de la DQO de 5%, mientras que al agregar una dosis de 100 mg/L se elimina más del 75% de la DQO. Por otra parte, Satyanarayan et al.,2005 evaluaron la efectividad del sulfato férrico como coagulante en un agua residual de matadero en diferentes dosis entre 100 y 600 mg/L, encontrando como resultado que, a valores de concentración de 100, 300 y 500 mg/L hubo una disminución en la DQO de 35,8 %, 38,6% y 41% respectivamente. Pese a esto, dichos estudios presentan variaciones con respecto a las características fisicoquímica y metodología utilizadas en la presente investigación, puesto que el agua residual utilizada por Audic et al., 1983 se refiere a un agua residual de matadero con un bajo contenido de sangre, mientras que en la investigación realizada por Satyanarayan et al., 2005, el agua residual de matadero antes del proceso coagulación fue sometida a un proceso previo de sedimentación de 30 minutos.

Aunque la dosis de coagulante que más tuvo eficiencia fue 900 mg/L, se observó que la dosis de 700 mg/L también presento un porcentaje de remoción de contaminantes considerable. A continuación, se presentan el estado de las 6 muestras con diferente concentración de coagulante una vez transcurrido el tiempo de sedimentación de 24 horas:

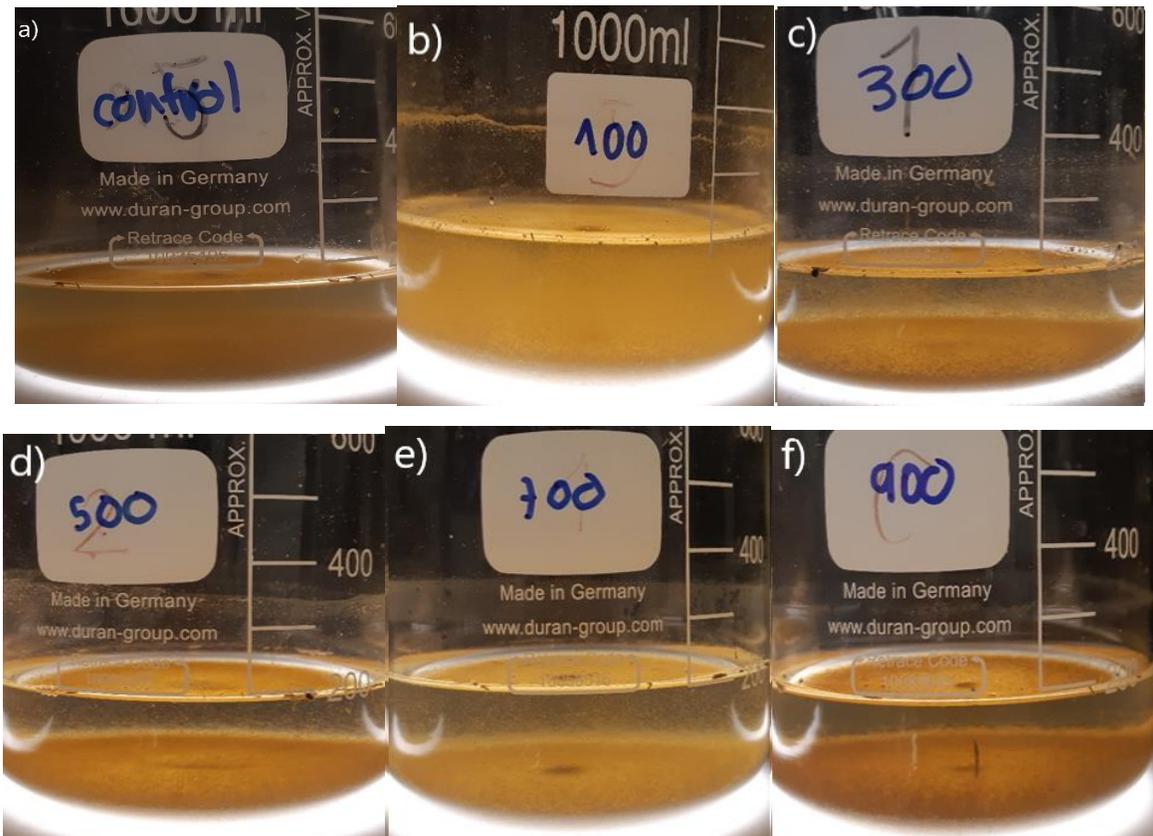
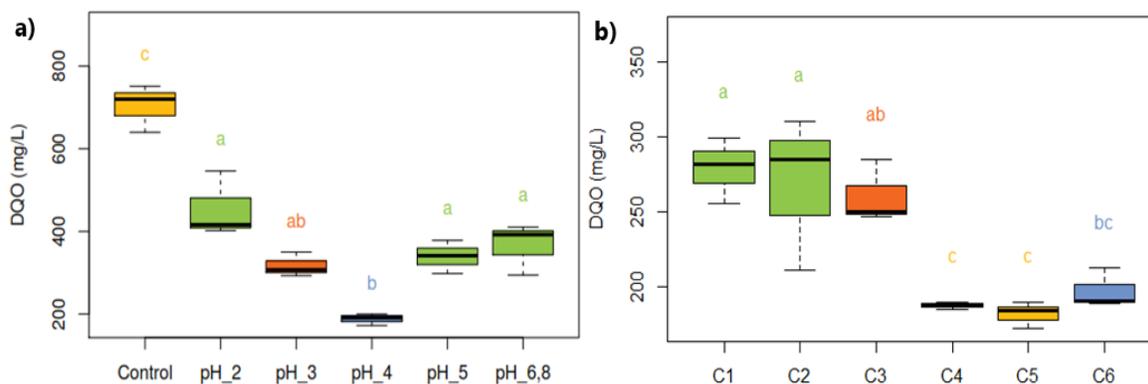


Figura 16. Ensayo de jarras para la evaluación del coagulante  $FeSO_4$  a diferentes concentraciones: a) Muestra control, b) Concentración 100 mg/L, c) Concentración 300 mg/L, d) Concentración 500 mg/L, e) Concentración 700 mg/L, f) Concentración 900 mg/L. Autor, 2020

## Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Como se puede observar las muestras de 500, 700 y 900 mg/L de  $\text{FeSO}_4$  (Figuras 16 d, 16 e y 16 f) presentan una mayor claridad con respecto a la muestra control, debido a que la mayoría de los sólidos en suspensión han sido sedimentados; sin embargo, en las Figuras 16d y 16e se alcanza a observar que sólidos de mayor tamaño que probablemente pueden ser pelos, contenido estomacal y elementos de estiércol que lograron pasar el sistema de cribado, no se logran sedimentar debido a su dimensión. Por otra parte, en las Figuras 16 b y 16 c se alcanza a observar que hubo una aglomeración de partículas, pero, hubo poca o nula sedimentación de estas. La razón de esto puede ser en que, las aguas residuales de matadero al contener altos contenidos de materia orgánica y sólidos en suspensión requieran de altas dosis de coagulante y/o el uso de coadyuvantes polielectrolíticos. Estos últimos permiten la sedimentación completa, ya que ayudan a que el coagulante posea la capacidad suficiente para poder neutralizar las cargas superficiales completas de los sólidos coloidales de densidad fina presentes en este tipo de agua (Satyanarayan et al., 2005). Esto explicaría el por qué en el estudio realizado por Audic et al., 1983 obtuvieron muy buenos resultados de sedimentación a la concentración de 100 mg/L y en la presente investigación a dicha concentración no se obtuvo un porcentaje de remoción de contaminantes considerable.

Con el fin de confirmar si las condiciones ideales para el tratamiento son aquellas que presentaron un mejor rendimiento de manera experimental, se realizó el Test de Tukey (Gráfica 3), el cual permitió diferenciar si los resultados obtenidos son significativamente diferentes a nivel estadístico.



\*Letras diferentes sobre cada una de las cajas representan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ( $p < 0,05$ )

Gráfica 3. Test de Tukey: a) Efecto de pH, b) Efecto de la concentración. Autor, 2020.

Se pudo observar que, para la determinación de pH (Gráfica 3a), los 5 valores evaluados presentaron una diferencia significativa ( $p < 0,01$ ) en la disminución de la carga orgánica con respecto a la muestra control. Por otra parte, los pH de 2,0; 5,0 y 6,8 no tuvieron una variación estadísticamente significativa entre ellos, puesto que una vez transcurrido el tiempo de reacción obtuvieron concentraciones de materia orgánica similares, de manera que no hubo una variación en el tratamiento. A pH 3,0 no se encontró una variación estadísticamente significativa con respecto a los otros 4 valores evaluados. Finalmente, a pH 4,0 se presentó una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) frente a los valores de 2,0; 5,0 y 6,8 mientras que con pH 3,0 no. Sin embargo, este último se descartó como valor ideal de tratamiento debido a que requiere un mayor volumen de  $\text{HCl}$  para reducir el pH del efluente con respecto al volumen empleado para pH 4,0, por lo que finalmente se determinó y corroboró que el ideal es 4,0.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Por otro lado, al evaluar las concentraciones de coagulante (C1=100 mg/L, C2= 300 mg/L, C3=500 mg/L, C4=700 mg/L, C5=900 mg/L, C6=1100 mg/L) se encontró que la concentración de 500 no tuvo diferencia significativa con respecto a las concentraciones de 100 mg/L, 300 mg/L y 1100mg/L (Gráfica 3b). Por otra parte, la concentración de 1100 mg/L presentó una variación estadísticamente significativa frente a 100 mg/L y 300 mg/L ( $p < 0,05$ ), mientras que la concentración de 300 mg/L tuvo diferencia significativa con los valores de 700 mg/L y 900 mg/L. Finalmente, se obtuvo que las concentraciones de 700 mg/L, 900 mg/L y 1100 mg/L no tienen diferencia estadísticamente significativa entre ellas debido a que la disminución de DQO no varía, a pesar de aumentar la concentración de coagulante; teniendo en cuenta esto, se determinó que la concentración ideal de coagulante es 700 mg/L ya que es la que requiere menor cantidad de reactivo en comparación a los otros dos valores.

### 9.2.2 *Electro-Fenton (E/F)*

El proceso Electro-Fenton depende de varias variables tales como: Relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$ , tiempo de reacción y pH. En consecuencia, en el presente estudio fue realizado un diseño experimental para evaluar el efecto de cada una de estas variables en la remoción de la carga orgánica del efluente.



Figura 17. Montaje celda electroquímica. Autor, 2020.

En los siguientes apartados se describe el proceso y los resultados obtenidos dentro de la alternativa E/F para el tratamiento del agua residual generada en la planta de beneficio animal de Girardot, Cundinamarca.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

### 9.2.2.1 Relación molar $H_2O_2/Fe^{+2}$

Una vez montada la celda electroquímica se realizó la evaluación de la relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$ , conforme a las relaciones sugeridas por Davarnejad & Nasiri, 2017. Para esto, se determinaron 3 valores de relación molar en los cuales el volumen a usar de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y  $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$  cambió para cada uno. De igual manera, para cada relación molar se calculó el número de moles de  $H_2O_2$  y  $Fe^{+2}$  presentes en la reacción. (Tabla 17)

Tabla 17. Relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$

Relación molar $H_2O_2/Fe^{+2}$	$H_2O_2$ (moles)	Volumen (ml) $H_2O_2$ al 30%	$Fe^{+2}$ (moles)	Cantidad (g) $Fe^{+2}$
0,5	0,012	0,36	0,024	5
1,5	0,036	1,08	0,024	5
3,0	0,036	1,8	0,012	2,5

Autor, 2020.

Para la evaluación de cada una de las relaciones molares previamente expuestas, se ajustó el pH de la muestra a un valor de 4,0 teniendo como antecedente el resultado obtenido en la alternativa C/F. Posterior a esto, se agregó la cantidad de  $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$  requerida y se inició el proceso de agitación de la muestra con el fin de que el coagulante tuviera una mejor dispersión. Continuo a esto, se conectaron los electrodos a la fuente de alimentación y se agregó el peróxido de hidrógeno. Desde el momento en que se agregó este último, se comenzó a medir cada 10 minutos el pH durante una hora. Al finalizar este tiempo, se agregó 0,5 g de  $Na_2SO_3$  con el fin de detener el proceso oxidativo y se dejó en reposo durante 24 horas para que el proceso de sedimentación de sólidos fuese llevado a cabo. Al finalizar el análisis de estos parámetros se utilizó NaOH 10 M con el fin de neutralizar el pH del efluente.

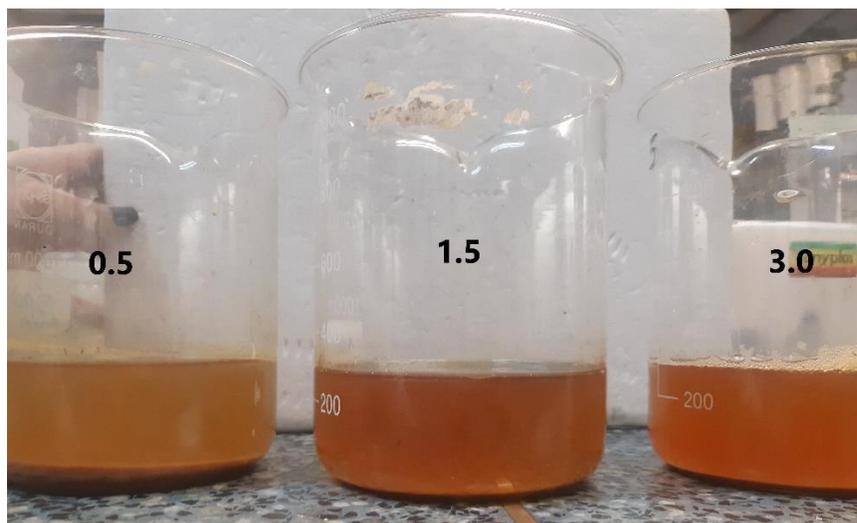


Figura 18. Prueba relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$  (0,5; 1,5 y 3,0) transcurrido 24 horas desde su realización. Autor, 2020

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

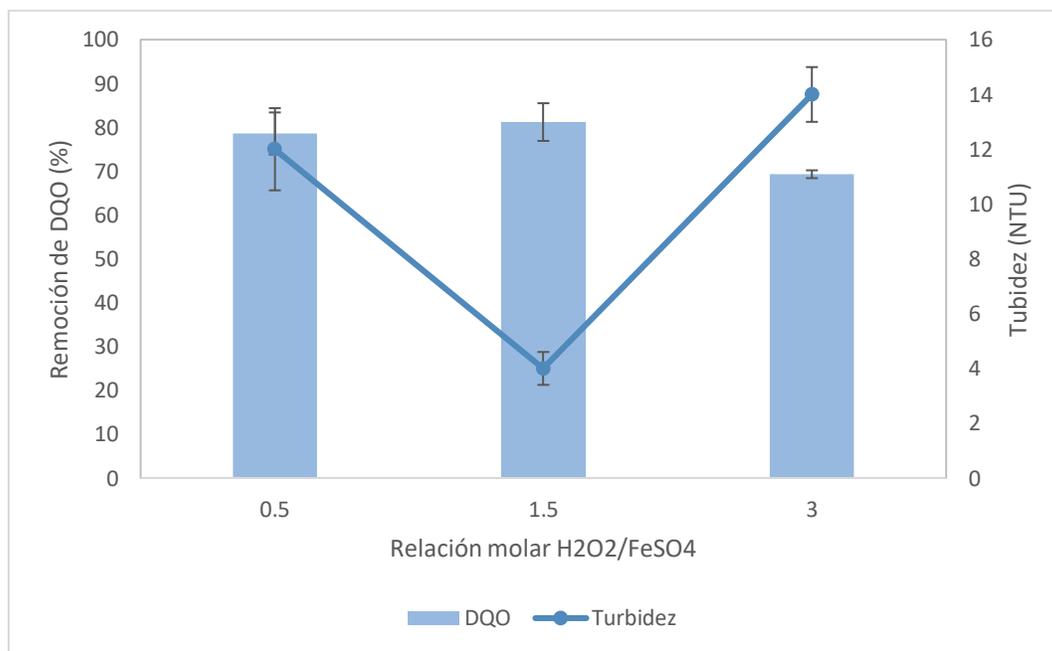
Una vez transcurrido este tiempo se realizó la medición de los parámetros fisicoquímicos de conductividad, salinidad, resistividad, SDT, SSED, turbidez y DQO (Anexo 5). Sin embargo, la evaluación de la efectividad de este proceso se basó en la disminución de turbidez y DQO. (Tabla 18)

Tabla 18. Parámetros fisicoquímicos en relación con la eficiencia de la relación molar.

Relación molar $H_2O_2/Fe^{+2}$	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)
<b>Control</b>	35	703,7
<b>c.v (%)</b>	19,9	8
<b>0,5</b>	12	150,3
<b>c.v (%)</b>	13,1	22
<b>1,5</b>	4	132
<b>c.v (%)</b>	15,7	23
<b>3,0</b>	14	216
<b>c.v (%)</b>	7,1	3

\*c.v corresponde al coeficiente de variación para cada uno de los valores

Autor, 2020



Gráfica 4. Porcentaje de remoción de DQO y disminución de turbidez en base a la relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$ . Autor, 2020

La relación molar que mayor disminución de DQO y turbidez presento fue en 1,5 (Tabla 18, Gráfica 4) puesto que al ser comparada frente a las características de la muestra control hubo una disminución de este parámetro en un 81.2% y 97.1% respectivamente. Davarnejad & Nasiri, 2017, trabajando con aguas de frigorífico encontraron como resultado que la mejor relación molar para disminuir DQO se encuentra entre 0,50-3,73 bajo una condición de pH de 4,38. Esto se debe a que la eliminación de DQO comienza

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

a realizarse ligeramente desde valores bajos, y aumenta a medida que la relación molar mejora, debido a que la presencia de hidroxilo en la reacción produce la aceleración de la eliminación de materia orgánica a través del tiempo. Por otra parte, Becerra & Cadena, 2016 determinaron que la mejor relación molar para emplear en el tratamiento de aguas residuales de matadero se presenta en un valor de 0,6, obteniendo una remoción de materia orgánica de 92,13%. Estos valores se encuentran próximos a los obtenidos en el presente estudio.

Teniendo en cuenta esto, se encuentra que, aunque hubo una disminución considerable de DQO y turbidez a una relación molar de 0,5, a medida que se aumentó la dosis de  $H_2O_2$  hubo una mayor sedimentación de materia orgánica debido a que cuando el  $Fe^{+2}$  (reactivo limitante) entra en reacción con el  $H_2O_2$ , genera iones hidroxilo que permiten la oxidación y sedimentación de materia orgánica y hierro (Páramo, 2015). Además, una relación molar menor <0,9 favorece la oxidación química, mientras que una relación  $\geq 1$  se ve beneficiada la coagulación (Páramo, 2015). Lo anterior soporta el resultado de que la relación molar 1,5 fuera la mejor en la disminución de los dos parámetros fisicoquímicos evaluados.

### 9.2.2.2 Efecto del tiempo de reacción

Para la determinación de esta variable, se utilizó la metodología y el montaje de la celda electroquímica previamente empleada para el criterio de relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$ . Se evaluaron 3 diferentes valores de tiempo: 20, 40 y 60 minutos, empleando una relación molar de 0,5 y un pH de 4,0

La efectividad del proceso se determinó a través de la medición de DQO y turbidez de la muestra. (Tabla 19)

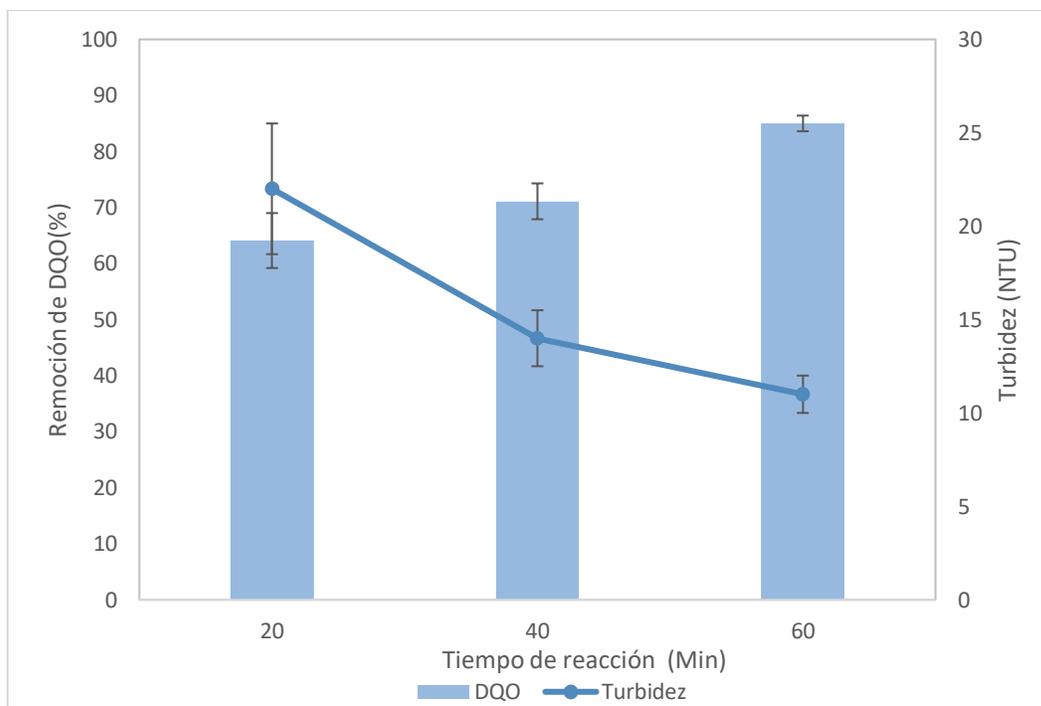
Tabla 19. Parámetros fisicoquímicos con relación al tiempo.

Tiempo (minutos)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)
<b>Control</b>	35	703,7
<b>c.v (%)</b>	19,9	8
<b>20</b>	22	252,3
<b>c.v (%)</b>	16,2	14
<b>40</b>	14	120,3
<b>c.v (%)</b>	10,7	6
<b>60</b>	11	105
<b>c.v (%)</b>	9,1	9

\*CV corresponde al coeficiente de variación para cada uno de los valores

Autor, 2020

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.



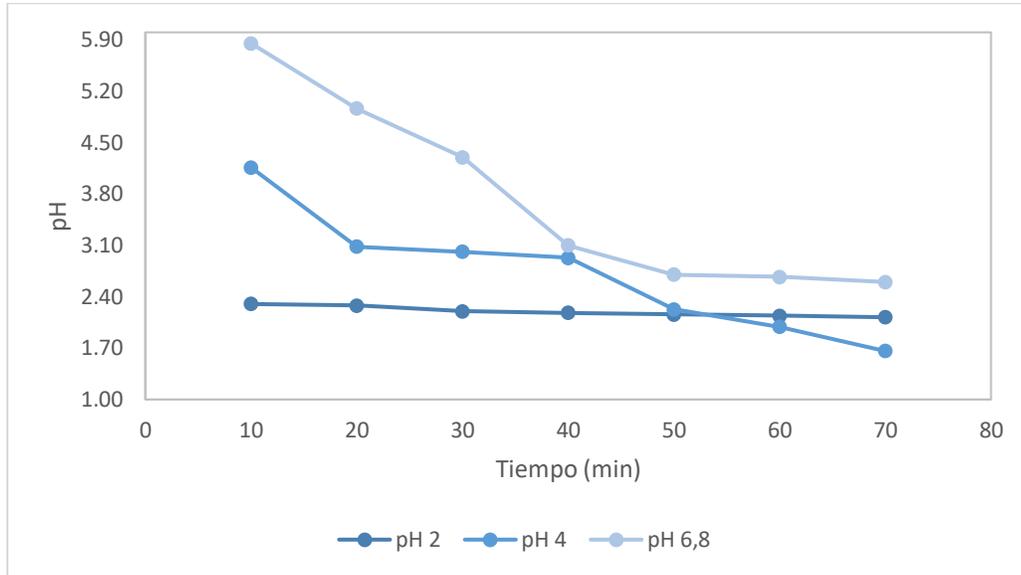
Gráfica 5. Porcentaje de remoción de DQO y disminución de turbidez en base al transcurso del tiempo. Autor, 2020.

La remoción de la carga contaminante incrementó en función del tiempo de reacción (Gráfica 5), por lo que el tiempo ideal de disminución de DQO y turbidez se dio al minuto 60 de reacción (se obtuvo un porcentaje de remoción para DQO de 85% y para turbidez 68,5%). Este resultado fue comparado con lo expuesto por otros autores. En el estudio realizado por Davarnejad & Nasiri, 2017 determinaron que las óptimas condiciones para una máxima disminución de DQO fueron obtenidas a un pH de 4,38 y un tiempo de reacción de 55,6 minutos; por otra parte, Becerra & Cadena, 2016 establecieron en su estudio que el tiempo ideal para disminución de DQO fue 45 minutos, ya que de ahí en adelante la reacción no avanzó. Davarnejad & Nasiri, 2017 afirman que la remoción de parámetros como la DQO del agua incrementa a medida que el tiempo de reacción avanza hasta el punto en que esta es completa. Para su caso, la eliminación de contaminantes disminuyó luego de pasar 55,6 minutos de reacción, debido a que la cantidad de peróxido de hidrógeno presente se descompuso en agua y oxígeno y, la combinación de radicales *OH* redujo la concentración de radicales hidroxilos.

### 9.2.2.3 Efecto del pH

Para la determinación del pH óptimo para el proceso E/F, se evaluaron 3 diferentes valores de pH: 2,0; 4,0 y 6,8. Esta prueba se realizó bajo las mismas condiciones operacionales descritas anteriormente, tomando los valores de pH en intervalos de 10 minutos durante 1 hora (Gráfica 6).

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.



Gráfica 6. Comportamiento del pH a través del tiempo de reacción. Autor, 2020

Este es uno de los parámetros más importantes para la eficacia del proceso E/F, ya que de este depende la producción de los radicales OH que a su vez permiten la oxidación del material orgánico (Davarnejad & Nasiri, 2017). Los pH de 4,0 y 6,8 tuvieron un descenso desde el valor inicial hasta el momento en el que se detuvo el proceso (Gráfica 6) ya que el primero pasó de un pH ligeramente ácido hasta llegar a un pH muy ácido (4,16 a 1,66), mientras que el segundo valor pasó de un pH neutro a un pH moderadamente ácido (5,85 a 2,6). Para el caso de pH 2,0 este no tuvo un gran descenso, encontrándose durante todo el proceso dentro de un pH moderadamente ácido (2,28 a 2,12) favoreciendo la actividad del proceso.

Posterior a esto, se realizó la medición de los parámetros DQO y turbidez del efluente obtenido. (Tabla 20)

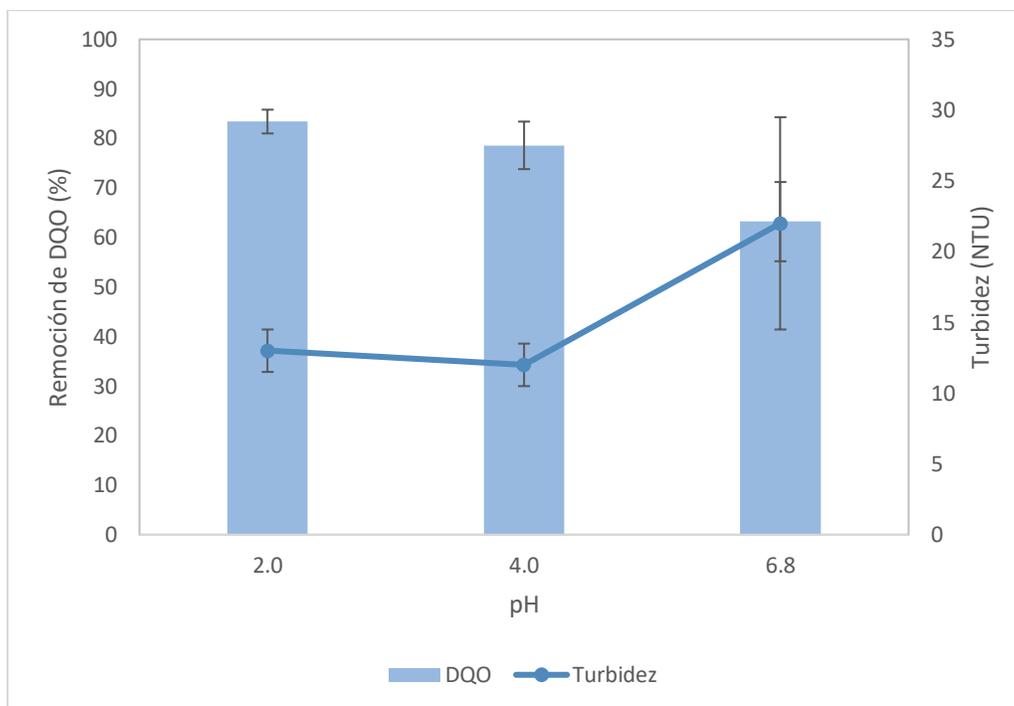
Tabla 20. Parámetros fisicoquímicos en relación con el pH.

pH (Unidades de pH)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)
<b>Control</b>	35	703,7
<b>c.v (%)</b>	19,9	8
<b>2</b>	13	116
<b>c.v (%)</b>	11,5	14
<b>4</b>	12	150
<b>c.v (%)</b>	13,1	22
<b>6,8</b>	22	285
<b>c.v (%)</b>	33,6	20

\*c. v corresponde al coeficiente de variación para cada uno de los valores.

Autor, 2020

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.



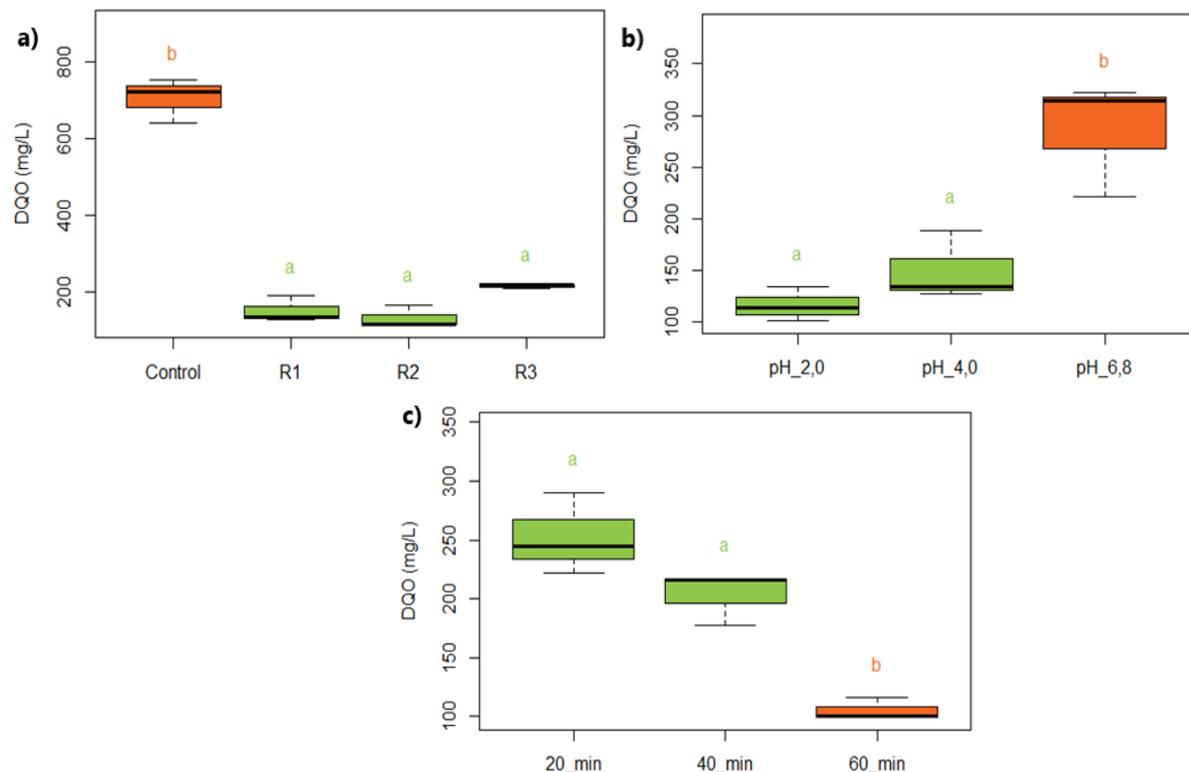
Gráfica 7. Disminución de la DQO y turbidez en base al pH. Autor, 2020.

Los valores de DQO obtenidos (Tabla 20, Gráfica 7) indican que el mejor tratamiento se dió en el valor de pH 2 (la remoción se dió en un 83.4%), mientras que para la turbidez se presentó en el pH de 4 (65.7%). Valores similares fueron reportados por Páramo, 2015, donde se obtuvo una remoción de DQO de 95% a pH 3,0. Por otra parte, Davarnejad & Nasiri, 2017 hallaron que la condición óptima para la remoción de DQO en aguas de matadero se da a un pH de 4, 38; Becerra & Cadena, 2016 determinaron que el pH ideal para trabajar el proceso E/F se da entre 2,0-3,1. En general, los estudios anteriormente mencionados exponen que el pH ideal es ácido (2,0-4,5) debido a que el  $H_2O_2$  y  $Fe^{+2}$  tienden a acidificar el agua residual. Además, a valores de pH inferiores a 3,0 se da la reacción auto catalítica del hierro, favoreciendo que la reacción Electro-Fenton transcurra de mejor manera. Estos iones férricos que se generan pueden llegar a producir hidroxocomplejos férricos ( $Fe(OH)^{+2}$  y  $Fe(OH)_2^+$ ), los cuales permiten que se realice el proceso de coagulación. Condiciones de pH  $<2,0$  disminuyen la efectividad del proceso debido a que se forman hidroxocomplejos ( $(Fe(H_2O)_6)^{+2}$ ) producto de los iones de hierro, los cuales presentan una reacción mucho más lenta con el peróxido de hidrógeno (Páramo, 2015).

Por otra parte, a pH 6,8 no hubo una remoción de contaminantes tan considerable como los otros dos valores (63.2% para DQO y 37% para turbidez). Esto es debido a que al aumentar el pH a valores neutros y alcalinos (pH  $>5$ ) se presenta la escasez de  $H^+$ , puesto que se inhibe la descomposición de  $H_2O_2$  y se disminuye la producción de radicales OH. Además, el  $H_2O_2$  no posee ningún radical hidroxilo en condiciones alcalinas por lo que el potencial de oxidación disminuye en estas condiciones (Davarnejad & Nasiri, 2017).

Con el fin de confirmar si las condiciones ideales para el tratamiento son aquellas que presentaron un mejor rendimiento de manera experimental, se realizó el Test de Tukey (Gráfica 8), el cual permitió diferenciar si los resultados obtenidos son significativamente diferentes.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.



\*Letras diferentes sobre cada una de las cajas representan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ( $p < 0,05$ )

Gráfica 8. Test de Tukey: a) Relación molar  $H_2O_2/Fe^{+2}$ , b) Efecto del pH, c) Efecto del tiempo. Autor, 2020.

Los valores de relación molar (R1=0,5; R2=1,5; R3=3,0) no presentaron una variación estadísticamente significativa entre ellas (Gráfica 8a), pero si hubo diferencia de cada una frente al control. Teniendo en cuenta esto, se determinó que la mejor relación es 1,5 pues fue la que logró una mayor disminución de materia orgánica. No obstante, para los análisis de las variables de tiempo y pH se seleccionó la relación 0,5 dado que en esta se presenta un menor gasto de reactivos.

Por otra parte, al evaluar el criterio de pH (Gráfica 8b) se encontró que no hay una diferencia significativa entre los valores de 2,0 y 4,0, mientras que el pH 6,8 si tuvo una variación significativa frente a los otros dos valores ( $p < 0,05$ ), puesto que una vez transcurrió el tiempo de reacción aún tenía niveles altos de DQO en comparación con los resultados obtenidos por los otros dos pH. Ya que pH 2,0 y 4,0 no tienen diferencia, se determinó que el valor ideal es 4,0 ya que necesita una dosis de  $HCl$  menor que la requerida por pH 2,0 para acidificar el efluente.

Finalmente, fue evidenciado que para la determinación del tiempo (Gráfica 8c), los 3 valores evaluados presentaron una diferencia significativa en la disminución de DQO con respecto a la muestra control ( $p < 0,05$ ). El minuto 20 y 40 no presentaron variación significativa entre sí; sin embargo, el minuto 40 tuvo una diferencia estadísticamente significativa frente al minuto 60 ( $p < 0,05$ ), ya que este último permitió que la reacción de oxidación fuese llevada a cabo en gran medida, favoreciendo una mayor sedimentación de materia orgánica y en consecuencia una mayor disminución de contaminantes.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Para concluir esta sección, se realizó una recopilación de los valores utilizados en cada una de los criterios evaluados y el porcentaje de remoción de carga contaminante que se obtuvo para cada uno.

Tabla 21. Condiciones de operación usadas en el proceso E/F.

Parámetro	Relación molar $H_2O_2/Fe^{+2}$	pH	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Eficiencia de remoción (%)	
					DQO	Turbidez
Relación molar $H_2O_2/Fe^{+2}$	0,5	4,0	60	21	78,6	65,7
	<b>1,5</b>				<b>81,2</b>	<b>88,5</b>
	3,0				69,3	60,0
pH	0,5	<b>2,0</b>	60	21	<b>83,4</b>	62,8
		4,0			78,6	<b>65,7</b>
		6,8			63,2	37,1
Tiempo	0,5	4,0	20	21	64,1	37,1
			40		71,1	60,0
			<b>60</b>		<b>85,0</b>	<b>68,5</b>

Las condiciones en negrita se refieren al valor que presentó mejor eficiencia en cada variable

Autor, 2020.

### 9.2.3 Proceso Mixto

Esta prueba se basó en la ejecución secuencial del proceso C/F y E/F y el análisis de la disminución de material contaminante presente en el agua residual al combinar los dos procesos. Para esto se utilizó la metodología y montaje empleados previamente en C/F y E/F.

Las condiciones operacionales utilizada en este proceso se presentan a continuación:

Tabla 22. Condiciones de operación usadas en el proceso Mixto.

Proceso	Tiempo de reacción (min)	pH	Dosis de coagulante (mg /L)	Relación molar $H_2O_2/Fe^{+2}$
C/F	23	4,0	700	-
E/F	60	4,0	-	0,5

Autor, 2020.

Al finalizar el proceso, se dejó el efluente en reposo durante 24 horas para favorecer el proceso de sedimentación de material orgánico. Una vez transcurrido este tiempo, se evaluó las condiciones de turbidez y DQO del efluente.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 23. Parámetros fisicoquímicos del proceso mixto.

Muestra	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)
Control	35	703.7
c.v (%)	19.9	8
Mixto	13	43.7
c.v (%)	7.7	3

\*C.V corresponde al coeficiente de variación para cada uno de los valores

Autor, 2020

El proceso mixto presentó buenas condiciones de remoción de turbidez y DQO (63.2% y 93.8% respectivamente). Este resultado es notablemente mayor al ser comparado con lo expuesto por Gomes de Barros et al., 2020, quienes obtuvieron una remoción de 76,5% para DQO al implementar los procesos C/F más oxidación fenton de manera consecutiva, tratando aguas residuales de procesamiento de café las cuales presentan altos niveles de materia orgánica. Monge & Silva, 2016 mencionan que, al combinar procesos convencionales de tratamiento de agua con POA, ya sea de manera simultánea o secuencial mejora la reducción parcial de DQO y con respecto a la aplicación de estos procesos de manera separada. Por otra parte, al combinar estos procesos permite que el material contaminante presente sea biodegradado con mayor facilidad y en el transcurso del proceso se produzca menos componentes tóxicos (Gomes de Barros et al., 2020). Es debido a esto que el proceso mixto obtuvo mejores resultados en comparación con C/F y E/F por separado. Además, al retirar los sólidos sedimentados en el proceso C/F antes de iniciar E/F ayudó a precipitar sólidos que no lograron ser sedimentados al aplicar un solo proceso.

Con respecto a los sólidos sedimentados en primera medida en el proceso C/F mixto, el volumen que fue retirado una vez este proceso terminó fue 0.33 L. Estos fueron sometidos a calentamiento primeramente a 103°C y luego 550°C. Antes y después de ser calentados fueron pesados para posteriormente conocer los sólidos volátiles presentes en estos. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

Tabla 24. Prueba sólidos volátiles.

Parámetro <sup>1</sup>	Peso (g) <sup>2</sup>
Peso cápsula	86,1461
103°C	86,4304
550°C	86,2084

1. Peso final del residuo+ peso cápsula de porcelana

2. Los valores corresponden al valor promedio de dos repeticiones y desviación estándar de estas

Autor, 2020.

Al realizar los cálculos pertinentes (Ec. 12 y 13-Sección 8.2.3), se encontró que los sólidos volátiles presentes en los lodos sedimentados fueron 0.73 g/L y los sólidos totales 0.93 g/L. Al obtener estos resultados se pudo hallar la relación VS/TS (Ec. 14), en la cual se obtuvo un valor de 0,78. De acuerdo con Gomes de Barros et al., 2017, para considerar el uso de lodos provenientes de depuradoras y tratamiento de aguas para fines de uso agrícola, la relación VS/TS debe ser inferior a 0,70.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Al comparar el resultado que se obtuvo frente a lo indicado por este autor, se puede decir que los lodos no son aptos para ser susceptibles de aprovechamiento agrícola debido a que cuando esta relación se encuentra en un rango de 0.75 a 0.80, se trata de lodos no digeridos o fango, los cuales se caracterizan por ser lodos que no han culminado su proceso de descomposición debido a que no han presentado un tratamiento de tipo biológico, lo cual hace que sean en gran medida putrescibles e inestables (Díaz, 2018).

A nivel nacional, se encuentra el Decreto 1287 del 2014, en el cual “se establecen criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales”. Sin embargo, dentro de este decreto no se establece un criterio con respecto a la relación SV/ST para considerarse los sólidos susceptibles de reutilización en otros procesos. Pese a esto, se requiere la reducción mínima del contenido de sólidos volátiles presentes en los lodos a un 38%, a través de procesos tales como digestión anaerobia o aerobia (Ministerio de Vivienda, 2014).

Considerando los resultados obtenidos, resulta oportuno considerar la posibilidad de realizar pruebas adicionales para determinar la mejor alternativa para la disposición de los lodos generados.

Finalmente, para cerrar la sección de la evaluación de las alternativas de tratamiento, se presenta una recopilación de los principales resultados para cada proceso y los costos asociados a la realización de estos a escala laboratorio.

Tabla 25. Recopilaciones principales resultados de las tres alternativas de tratamiento.

Parámetro	Agua residual cruda	Procesos			Remoción global % <sup>2</sup>	Valor máximo permisible (Resolución 631 de 2015)
		C/F	E/F	Mixto		
<i>pH (Unidades de pH)</i>	6.63±0.34	7,0± 0,2	7,0± 0,2	7,0± 0,2	-	6.0-9.0
<i>DQO (mg. L<sup>-1</sup> O<sub>2</sub>)</i>	1216 ±355	182±9,2	105±9,5	43.5±1,5	88%	800
<i>Turbidez (NTU)</i>	492±204	10±1,0	4±0,6	13±1,5	98%	-
<b>Costo de operación<sup>1</sup> (\$COP m<sup>-3</sup>/USD m<sup>-3</sup>)</b>	-	7000/1,77	82600/20,84	89600/22,61	-	-

Los valores de los procesos corresponden al valor promedio de tres repeticiones y desviación estándar de estas

1. Los costos de operación están relacionados con el consumo de los principales reactivos. El precio de estos fue administrado por Químicos Campota (Bogotá D.C): FeSO<sub>4</sub>\* 7 H<sub>2</sub>O- COP \$2000 per-kg; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (50% w/v)- COP\$4500. Para la conversión de COP a USD se utilizó la Tasa Representativa del Mercado del 20 de abril de 2020: 3.973,06 COP por USD ([www.banrep.gov.co/es/estadisticas/trm](http://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/trm))
2. Corresponde al valor promedio de los procesos C/F y E/F en comparación con el valor del efluente bruto

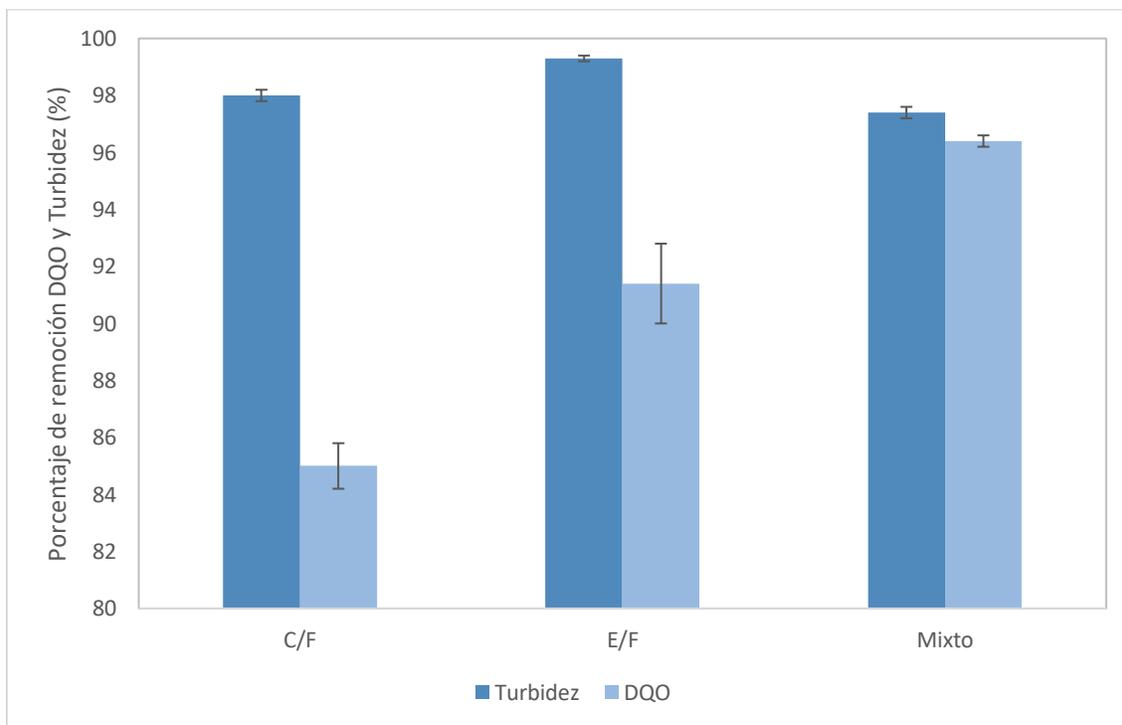
*Autor, 2020*

Al realizar la recopilación de los resultados que se obtuvieron en cada uno de los procesos (Tabla 25), se pudo observar que el rango de pH ideal para ser empleado en cualquiera de los procesos se encuentre entre 3,8-4,5. Por otra parte, los costos de operación indican que los procesos E/F y mixto tienen un costo más alto en comparación con C/F debido a la cantidad de reactivo que se necesita para estos procesos. Gomes de Barros et al., 2020 al emplear estos dos procesos para el tratamiento de aguas residuales de

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

café, obtuvo a nivel económico que al evaluar a escala laboratorio el proceso Fenton (F) y mixto, estos resultaban más costosos en comparación con el proceso Coagulación/Floculación (F y mixto tuvieron un valor de 74,1 y 70,8 reales brasileños (R\$), los cuales equivalen a 55411 y 52943 \$COP; mientras que el proceso C/F tuvo un valor de 3,4 R\$ equivalentes a 2542 \$COP). Estos resultados son similares a los determinados en este proyecto, debido principalmente a que el peróxido de hidrogeno tiene un valor comercial más alto que las sales de hierro.

Finalmente, se halló el porcentaje de remoción de turbidez y DQO que presentaron cada uno de los procesos. (Gráfica 9)



Gráfica 9. Porcentaje de remoción contaminante para cada proceso evaluado. Autor, 2020.

Para el proceso C/F se determinó que las mejores condiciones de disminución de carga orgánica se da a pH 4,0 y un volumen de coagulante presente entre el rango de 700 a 900 mg/L, los cuales demostraron una reducción de la DQO de 85% y la turbidez 98%; Por otra parte, el proceso E/F presentó mejores resultados en la remoción de estos dos parámetros del agua puesto que se obtuvo una disminución de la DQO de 91.4% y la turbidez 99.3% a un pH de 4, una relación molar de 1,5 y un tiempo de 60 minutos. Para el proceso mixto, se obtuvo una considerable disminución de la DQO (93,8%) y la turbidez (97,4). Este último, tuvo una disminución en la eficiencia de remoción en comparación a los otros dos procesos.

Monge & Silva, 206 mencionan que tanto la cantidad de  $H_2O_2$  y sales de hierro empleada afectan la degradación del material contaminante, puesto que la velocidad de degradación aumentará con el volumen de sal empleado, pero a partir de una determinada concentración de hierro, la eficiencia de la reacción disminuirá, llegando a aumentar factores como la turbidez. Es por esto que el proceso mixto no tuvo una remoción tan alta de la turbidez en comparación con los otros dos, puesto que requirió en

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

primera medida la adición de una dosis de coagulante para la fase del proceso C/F y posteriormente requirió otra dosis de coagulante para la fase del proceso E/F.

***9.3 Objetivo específico III: Calcular el índice de química verde para cada uno de los procesos evaluados como medida para seleccionar la alternativa de mayor viabilidad desde el punto de vista ambiental.***

En los siguientes apartados se describe el proceso y los resultados obtenidos dentro de la evaluación de la implementación de química verde en cada uno de los procesos de tratamiento evaluados dentro de este proyecto.

Para la evaluación de la aplicabilidad de los 12 principios de química verde a cada uno de los pasos que se realizaron en los procesos C/F, E/F y mixto se utilizó la metodología propuesta por Morales et al., 2011; mientras que, para la construcción del índice y gráfico Estrella Verde, se utilizó la metodología, criterios y valoración de los principios de química verde planteada por Ribeiro et al., 2010.

La metodología que se realizó para cada uno de los tres procesos de tratamiento evaluados fue dividida en tres partes: Realización de diagrama de flujo del proceso, matriz de evaluación de criterios y construcción del gráfico estrella verde en base al porcentaje de cumplimiento de los principios. Dentro del desarrollo de toda la metodología no se tuvieron en cuenta los principios 4 que se refiere al diseño de productos químicos menos tóxicos y el principio 11 que se refiere al desarrollo de tecnologías analíticas para la monitorización en tiempo real, debido a que dentro de los experimentos realizados no se tomó en cuenta la preparación de nuevos productos.

### ***9.3.1 Coagulación-Floculación***

La primera parte que se realizó consistió en la elaboración de un diagrama de flujo (Figura 19) en el cual el desarrollo del proceso C/F se dividió en 5 pasos de los cuales 4 de estos fueron evaluados bajo algunos de los principios de química verde.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

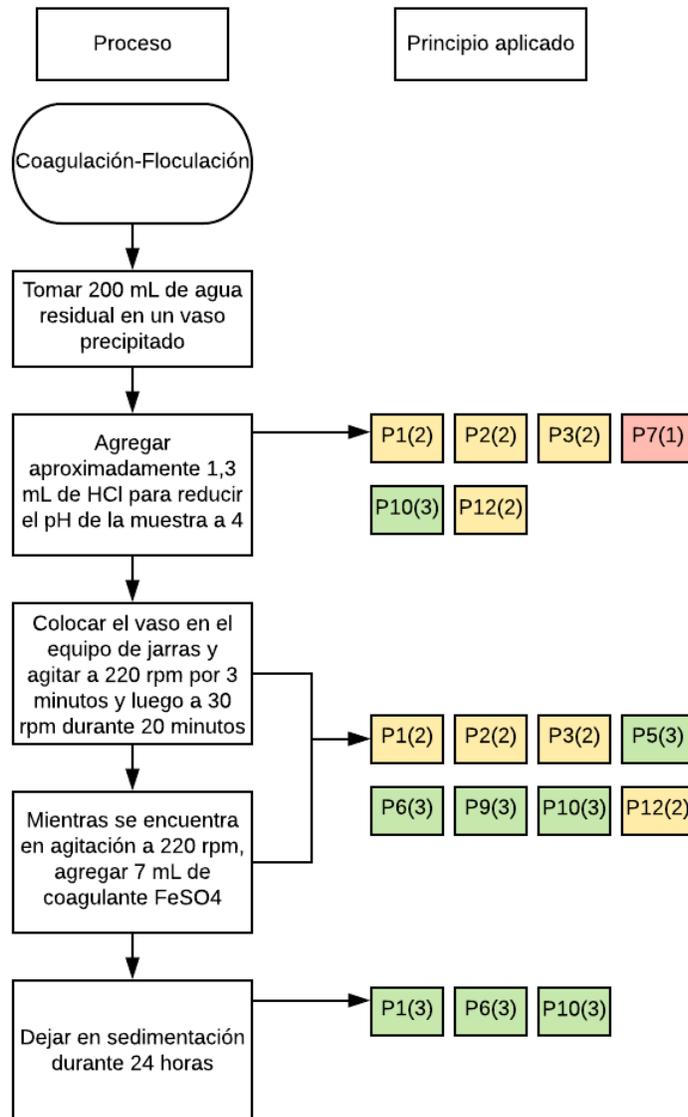


Figura 19. Diagrama de flujo del proceso Coagulación-Floculación. Autor, 2020.

Este proceso en general presentó 8 principios con un gran acercamiento verde, 8 principios con ligero acercamiento verde y 1 principio con bajo acercamiento verde.

Para el análisis de estos criterios se procedió a la segunda parte de la metodología, la cual consistió en la construcción de una matriz de diagnóstico (Tabla 26) en la cual se indicó el reactivo utilizado en cada una de las etapas del proceso y los efectos de este sobre la salud humana, y el medio ambiente. De igual manera se evaluaron las propiedades de inflamabilidad, reactividad, degradabilidad y renovabilidad de estos gracias al uso de fichas de seguridad de cada uno de los reactivos, de manera que con la recopilación de esta información se pudiera dar una calificación objetiva a cada uno de los principios evaluados.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 26. Matriz de evaluación proceso Coagulación-Floculación basada en los criterios establecidos por Ribeiro et al, 2010.

PROCESO		Coagulación-Floculación							
Etapa	Características		Riesgo a la salud humana y el medio ambiente		Riesgo potencial de accidente químico		Características de degradabilidad y renovabilidad		Principio de química verde evaluado
	Reactivo y/o sustancia utilizada								
	Nombre y fórmula química	Estado	Salud humana	Medio ambiente	Inflamabilidad	Reactividad	Degradabilidad	Renovabilidad	
1. Tomar 200 mL de agua residual en un vaso precipitado y agregar aproximadamente 1,3 mL de HCl para reducir el pH de la muestra a 4	Ácido Clorhídrico HCl	Líquido	C-corrosivo	N-Peligroso para el medio ambiente	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2(2), P3(2),P7(1), P10(3),P12(2)
2. Colocar en el equipo de jarras y agitar a 220 rpm por 3 minutos y luego a 30 rpm durante 20 minutos. Durante la agitación a 220 rpm, agregar 7 mL de coagulante FeSO4	Sulfato de Hierro $FeSO_4 * 7 H_2O$	Sólido	Xi-Irritante	No-No indicado	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2), P2(2), P3(2), P5(3) P6(3), P9(3) P10(3),P12(2)
3. Dejar en sedimentación durante 24 horas	Lodos sedimentados	Sólido	Xn- Peligroso	N-Peligroso para el medio ambiente	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(3), P6(3) P10(3)

Autor, 2020

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Para la primera etapa determinada del proceso, se requirió del uso de ácido clorhídrico (HCl) como reactivo para reducir el pH del agua residual al valor requerido. Este es una disolución acuosa proveniente del cloruro de hidrógeno. *HCl* es corrosivo para salud humana debido a los vapores que se producen en altas concentraciones de este y, es peligroso cuando se encuentra en altos volúmenes en el medio ambiente debido a que disminuiría el pH de fuentes hídricas, provocando la acidificación de estas y en consecuencia se vería afectado el desarrollo de la fauna acuática (Universidad Nacional de Heredia, 2011; Consejo Colombiano de Seguridad, 2005). Es debido a esto que los principios 1, 2, 3 y 12 tuvieron una calificación de 2 y un ligero acercamiento verde, pues esta sustancia presenta un ligero riesgo para la salud humana y el medio ambiente; de igual manera, al ser una sustancia no renovable se calificó el principio 7 como 1, teniendo un bajo acercamiento verde. Por otra parte, al utilizarse solo la cantidad requerida de *HCl* para disminuir el pH de la muestra a 4,0 se le dio al principio 10 un valor de 3, puesto que no se utiliza más allá del volumen requerido, de manera que pueda ser degradable a productos inocuos.

En la segunda etapa de este proceso se utilizó Sulfato de Hierro ( $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ ) como coagulante. Este es un compuesto químico de forma sólida-granular utilizado para purificación de agua por procesos de floculación. Es un compuesto que causa irritación en la piel y, no presenta un peligro para el medio ambiente (Merck, 2018; Universidad Nacional de Heredia, 2013). Teniendo en cuenta esto, los principios 1, 2, 3 y 12 recibieron un valor de 2 y un ligero acercamiento verde. Dentro de este proceso se utilizó exclusivamente la dosis requerida de coagulante, de manera que todo el volumen fuera utilizado dentro de la sedimentación del material en suspensión, además no fue necesario el uso de catalizadores ni sustancias auxiliares, por lo tanto, los principios 5, 9 y 10 tuvieron una calificación de 3 y un alto acercamiento verde. Para la realización del proceso de coagulación no se requirió una presión y temperatura diferente a la del ambiente, de manera que el principio 6 se calificó como 3 y se obtuvo un alto acercamiento verde.

La tercera y última etapa de este proceso se generó los lodos producto de la coagulación del material orgánico sedimentable. Estos lodos se caracterizan por ser peligrosos a la salud humana y el medio ambiente debido a su alto contenido de materia orgánica sustancias contaminantes, de manera que si llegasen a fuentes hídricas superficiales se llegaría a presentar eutrofización de estas; Los principios 6 y 10 tuvieron una calificación de 3 debido a que se utilizó la temperatura y presión ambiente y, el principio 1 se calificó como 3 puesto que, aunque estos presentan un riesgo a la salud al estar compuestos en su mayoría por materia orgánica pueden ser degradados a productos inocuos a través de proceso biológicos. Los tres principios evaluados en esta etapa tuvieron un alto acercamiento verde.

Una vez obtenida la calificación de los principios evaluados en cada una de las etapas del proceso, se procedió a realizar un promedio de cada uno de estos, de manera que se tuviera una calificación general de cada principio.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 27. Calificación general de los principios de química verde.

Principio de Química verde	Calificación
P1	2.7
P2	2
P3	2
P5	3
P6	3
P7	1
P8	3
P9	3
P10	3
P12	2

Autor, 2020.

Luego de obtener la calificación para cada uno de los principios, se procedió a efectuar el cálculo del área de la estrella verde e índice de área de la estrella verde, de manera que a partir de estos se pudiese determinar el porcentaje y acercamiento verde que presenta el proceso en base al cumplimiento de los principios de química verde

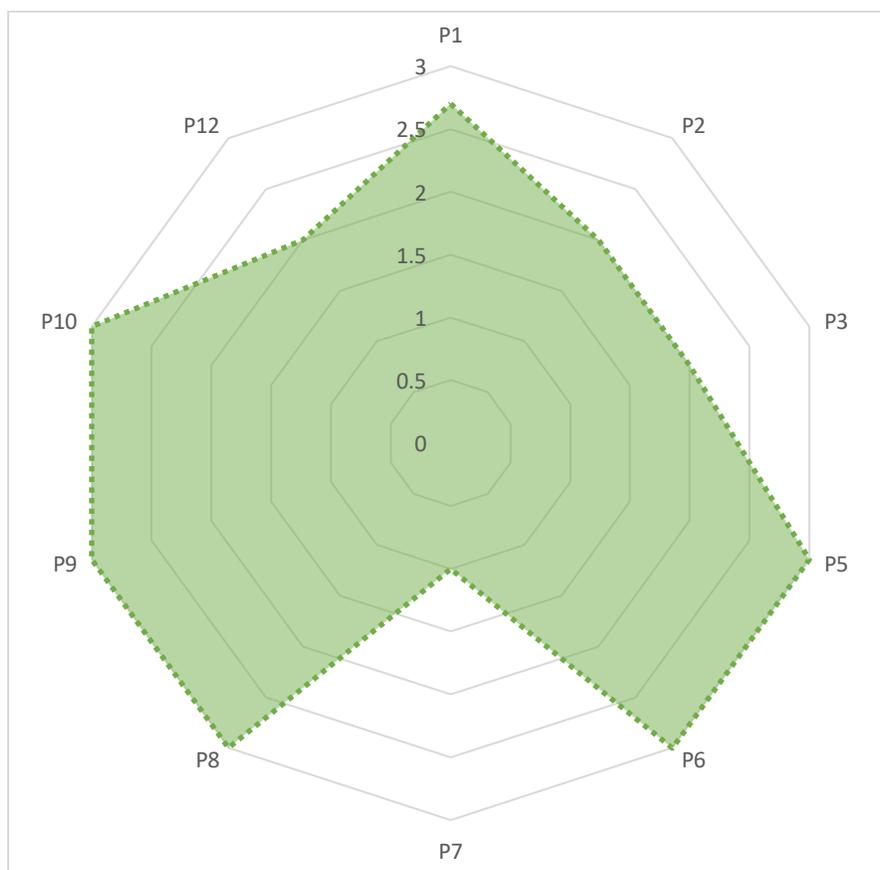
Tabla 28. Datos para la construcción del gráfico Estrella Verde.

Número de área	Principios abarcados dentro del área	Calificación de los principios	Valor del área	Área de la Estrella Verde	Área total	Índice de área de la Estrella Verde (%)	Cumplimiento de los principios de química verde
1	P1-P2	2.7-2	1.29	14.6	24	61	Ligero acercamiento verde
2	P2-P3	2-2	0.88				
3	P3-P5	2-3	1.47				
4	P5-P6	3-3	2.35				
5	P6-P7	3-1	0.59				
6	P7-P8	1-3	0.59				
7	P8-P9	3-3	2.35				
8	P9-P10	3-3	2.35				
9	P10-P12	3-2	1.47				
10	P12-P1	2-2.7	1.30				

Autor, 2020.

Una vez se obtuvo el área que abarcan cada uno de los principios, se procedió a realizar el gráfico de la Estrella Verde:

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.



Gráfica 10. Estrella Verde del proceso Coagulación-Floculación. Autor, 2020

El proceso C/F presentó un porcentaje de cumplimiento de los principios de química verde de 61% (Tabla 28), determinando que tiene un ligero acercamiento verde a estos principios. Se encontró que los principios 5(Solventes y sustancias auxiliares más seguras), 6(Incremento de la eficiencia energética), 8(Reducir derivaciones), 9(Catalizadores) y 10(Diseño para la degradación) tienen un completo cumplimiento verde, por lo que obtuvieron una calificación de 3 cada uno.

Por otra parte, los principios 1(Prevención), 2(Economía atómica), 3(Síntesis químicas menos peligrosas) y 12(Química segura para la prevención de accidentes) obtuvieron un ligero acercamiento verde, debido a que reactivos como el ácido clorhídrico y el Sulfato de hierro presentan un moderado riesgo para la salud humana y el medio ambiente, además, los lodos generados se consideran como subproductos generados en el proceso. El principio 7 (Uso de materia prima renovable) se puntuó con 1 debido a que el agua, aunque es un recurso natural renovable no se puede contar dentro del proceso como tal; además, los reactivos empleados carecen de ser renovables.

### 9.3.2 Electro-Fenton

Al igual que en el proceso C/F, la realización de esta metodología se dividió en tres partes. En primera medida, se realizó el diagrama de flujo del proceso E/F; este se dividió en 8

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

etapas, de las cuales 7 se les fue evaluado el grado de acercamiento verde basado en los principios de química verde.

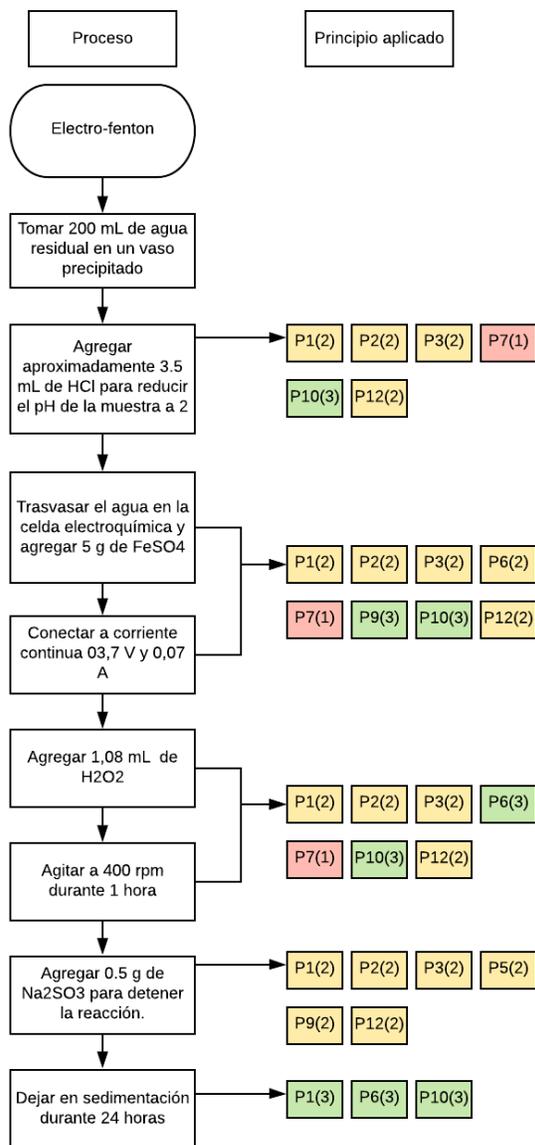


Figura 20. Diagrama de flujo del proceso Electro-Fenton. Autor, 2020

Para este proceso, en general se obtuvo que la mayoría de los principios tuvieron un ligero acercamiento verde, basado principalmente en las características que presentaron los reactivos empleados (Tabla 29)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 29. Matriz de evaluación del proceso Electro-Fenton basada en los criterios establecidos por Ribeiro et al, 2010.

PROCESO		Electro-Fenton							
Etapa	Características		Riesgo a la salud humana y el medio ambiente		Riesgo potencial de accidente químico		Características de degradabilidad y renovabilidad		Principio de química verde evaluado
	Reactivo y/o sustancia utilizada		Salud humana	Medio ambiente	Inflamabilidad	Reactividad	Degradabilidad	Renovabilidad	
	Nombre y fórmula química	Estado							
1. Tomar 200 mL de agua residual en un vaso precipitado y agregar aproximadamente 3.5 mL de HCl para reducir el pH de la muestra a 2	Ácido Clorhídrico HCl	Líquido	C-corrosivo	N-Peligroso para el medio ambiente	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2(2) P3(2),P7(1) P10(3),P12(2)
2. Trasvasar el agua en la celda electroquímica y agregar 5 g de FeSO <sub>4</sub> y conectar a corriente continua 03,7 V y 0,07 A	Sulfato de Hierro FeSO <sub>4</sub> * 7 H <sub>2</sub> O	Sólido	Xi-Irritante	No-No indicado	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2(2) P3(2),P5(3) P6(2),P7(1) P9(3),P10(3) P12(2)
3. Agregar 1,08 mL de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y agitar a 400 rpm durante 1 hora	Peróxido de hidrógeno H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Líquido	C-corrosivo	No-No indicado	No-No indicado	O-Agente oxidante	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2 (2) P3(2),P6(3) P7(1),P10(3) P12(2)
4. Agregar 0.5 g de Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> para detener la reacción.	Sulfito de sodio Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Sólido	Xi-Irritante	N-Peligroso para el medio ambiente	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2(2) P3(2),P5(2) P9(2),P12(2)
5. Dejar en sedimentación durante 24 horas	Lodos sedimentados	Sólido	Xn- Peligroso	N-Peligroso para el medio ambiente	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(3),P6(3) P10(3)

Autor, 2020.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Para la primera etapa determinada del proceso, se requirió del uso de ácido clorhídrico ( $HCl$ ) como reactivo para reducir el pH del agua residual al valor requerido. Este es una disolución acuosa proveniente del cloruro de hidrógeno.  $HCl$  es corrosivo para salud humana debido a los vapores que se producen en altas concentraciones de este y, es peligroso cuando se encuentra en altos volúmenes en el medio ambiente debido a que disminuiría el pH de fuentes hídricas, provocando la acidificación de estas y en consecuencia se vería afectado el desarrollo de la fauna acuática (Universidad Nacional de Heredia, 2011). Es debido a esto que los principios 1, 2, 3 y 12 tuvieron una calificación de 2 y un ligero acercamiento verde; de igual manera, al ser una sustancia no renovable se calificó el principio 7 como 1, teniendo un bajo acercamiento verde. Por otra parte, al utilizarse solo la cantidad requerida de  $HCl$  para disminuir el pH de la muestra a 4, se le dio al principio 10 un valor de 3, puesto que no se utiliza más allá del volumen requerido y así pueda ser degradable a productos inocuos.

En la segunda etapa de este proceso se utilizó Sulfato de Hierro ( $FeSO_4 * 7 H_2O$ ) como coagulante. Este es un compuesto químico de forma sólida- granular utilizado para purificación de agua por procesos de floculación. Es un compuesto que causa irritación en la piel y, no presenta un peligro para el medio ambiente (Merck, 2018). Teniendo en cuenta esto, los principios 1, 2, 3, 6 y 12 recibieron un valor de 2 y un ligero acercamiento verde puesto que este compuesto presenta un moderado riesgo para la salud humana. Dentro de este proceso se utilizó exclusivamente la dosis requerida de coagulante, de manera que todo el volumen fuera utilizado dentro de la sedimentación del material en suspensión, además no fue necesario el uso de catalizadores ni sustancias auxiliares, por lo tanto, los principios 5, 9 y 10 tuvieron una calificación de 3 y un alto acercamiento verde. Para la realización del proceso de oxidativo no se requirió una presión y temperatura diferente a la del ambiente, pero se requirió del uso de energía para acelerar el proceso oxidativo, de manera que el principio 6 se calificó como 2 y se obtuvo un ligero acercamiento verde.

Para la tercera parte se requirió del uso de Peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) como sustancia oxidante. Es un compuesto químico presente en forma líquida utilizado de manera común como agente germicida (Consejo Colombiano de Seguridad, 2005). Para este compuesto, los principios 1, 2, 3 y 12 fueron calificados como 2 debido a que los residuos de este presentan un riesgo moderado para el ser humano y el medio ambiente ya que es un compuesto corrosivo que puede llegar a causar ligera irritación al entrar en contacto con la piel (Consejo Colombiano de Seguridad, 2005; Merck, 2017); además, es un compuesto inestable que se descompone en oxígeno y agua, liberando en el proceso calor. Los principios 6 y 10 se calificaron como 3 debido a que no se presentó un exceso de reactivo para la realización del proceso, de manera que no hubo formación de subproductos y se llevó a cabo la degradación completa; de igual manera, no se requirió del cambio de temperatura y presión diferente al ambiente. El principio 7 se calificó como 1 debido a que el peróxido de hidrógeno es un compuesto degradable pero no renovable.

La cuarta parte del proceso consistió en la adición de Sulfito de Sodio ( $Na_2SO_3$ ) como agente catalizador para detener la reacción oxidativa una vez se culminó el tiempo del experimento. Este es un compuesto utilizado en la industria para la eliminación del oxígeno disuelto en el agua que debe utilizarse en calderas de vapor (Merck, 2012; Universidad Nacional de Heredia, 2016). A los principios 1, 2, 5, 9 y 12 se les asignó una calificación de

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

2 puesto que los residuos de Sulfito de Sodio generan un riesgo moderado a la salud y el medio ambiente puesto que al ser ingerido en grandes cantidades puede generar irritación en vías respiratorias, mientras que en el medio ambiente puede generar el aumento de la demanda química de oxígeno (Universidad Nacional de Heredia, 2016) ;además, el Sulfito de Sodio como un catalizador para detener la reacción de oxidación, el cual presenta un moderado riesgo para la salud y el medio ambiente.

La quinta y última etapa de este proceso se generó los lodos producto de la coagulación del material orgánico sedimentable. Estos lodos se caracterizan por ser peligrosos a la salud humana y el medio ambiente debido a su alto contenido de materia orgánica sustancias contaminantes, de manera que si llegasen a fuentes hídricas superficiales se llegaría a presentar eutrofización de estas; Los principios 6 y 10 tuvieron una calificación de 3 debido a que se utilizó la temperatura y presión ambiente y, el principio 1 se calificó como 3 puesto que, aunque estos presentan un riesgo a la salud al estar compuestos en su mayoría por materia orgánica pueden ser degradados a productos inocuos a través de proceso biológicos. Los tres principios evaluados en esta etapa tuvieron un alto acercamiento verde.

Una vez obtenida la calificación de los principios evaluados en cada una de las etapas del proceso, se procedió a realizar un promedio de cada uno de estos, de manera que se tuviera una calificación general de cada principio.

*Tabla 30. Calificación general de los principios de química verde.*

<b>Principio de Química verde</b>	<b>Calificación</b>
P1	2.8
P2	2
P3	2
P5	2.8
P6	2.8
P7	1
P8	3
P9	2.7
P10	3
P12	2

*Autor, 2020.*

Luego de obtener la calificación para cada uno de los principios, se procedió a efectuar el cálculo del área de la estrella verde e índice de área de la estrella verde, de manera que a partir de estos se pudiese determinar el porcentaje y acercamiento verde que presenta el proceso en base al cumplimiento de los principios de química verde.

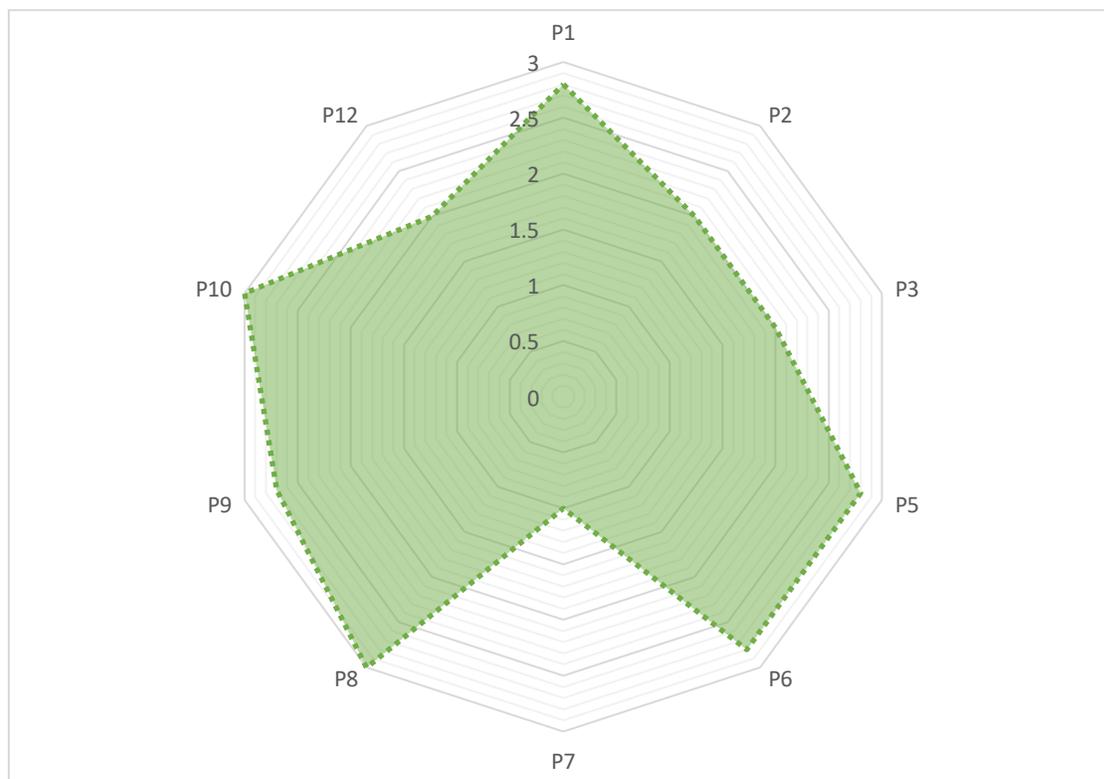
Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 31. Datos para la construcción del gráfico Estrella Verde.

Número de área	Principios abarcados dentro del área	Calificación de los principios	Valor del área	Área de la Estrella Verde	Área total	Índice de área de la Estrella Verde (%)	Cumplimiento de los principios de química verde
1	P1-P2	2.8-2	1.35	14	24	58	Ligero acercamiento verde
2	P2-P3	2-2	0.88				
3	P3-P5	2-2.8	1.35				
4	P5-P6	2.8-2.8	2.01				
5	P6-P7	2.8-1	0.52				
6	P7-P8	1-3	0.59				
7	P8-P9	3-2.7	2.09				
8	P9-P10	2.7-3	2.09				
9	P10-P12	3-2	1.47				
10	P12-P1	2-2.8	1.35				

Autor, 2020.

Una vez se obtuvo el área que abarcan cada uno de los principios, se procedió a realizar el gráfico de la Estrella Verde:



Gráfica 11. Estrella Verde del proceso Electro-Fenton. Autor, 2020

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

El proceso E/F presentó un porcentaje de cumplimiento de los principios de química verde de 58% (Tabla 31) y un ligero acercamiento verde. Esto se debe a que los principios 1(Prevención), 2(Economía atómica), 3(Síntesis químicas menos peligrosas), 5(Solventes y sustancias auxiliares), 6(Incremento de la eficiencia energética) y 12(Química segura para la prevención de accidentes) fueron calificados como 2, debido principalmente a que los reactivos usados dentro de este proceso presentan un moderado riesgo para la salud y el medio ambiente; además, en el principio 6 se consideró el uso de energía para incrementar el proceso oxidativo, pese a que el valor de temperatura y presión fue la del ambiente. En cuanto a los principios 8(Reducir derivaciones) y 10(Diseño para la degradación) se les asignó una calificación de 3 debido a que en el proceso no se presentó un exceso de reactivos, lo cual no generó la formación de subproductos, de manera que el experimento fue diseñado para que todos los reactivos pudiesen ser degradados en su totalidad a productos inocuos.

El principio 9 tuvo una puntuación de 2,7 debido a que se requiere el uso de sulfito de Sodio como catalizador para detener el proceso oxidativo. El principio 7 se calificó como 1 debido a que ninguna de los reactivos empleados es renovable.

### **9.3.3 Mixto**

Este proceso abarca la combinación de las alternativas C/F y E/F previamente realizadas. Al igual que en los 2 anteriores procesos, esta metodología se dividió en tres partes.

La primera parte, consistió en realizar el diagrama de flujo del proceso mixto; este a su vez fue dividido en dos fases: la primera abarca 6 etapas del proceso C/F y la segunda fase presenta 6 etapas del proceso E/F. A cada etapa se le fue evaluado el grado de acercamiento verde basado en el cumplimiento de los principios de química verde.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

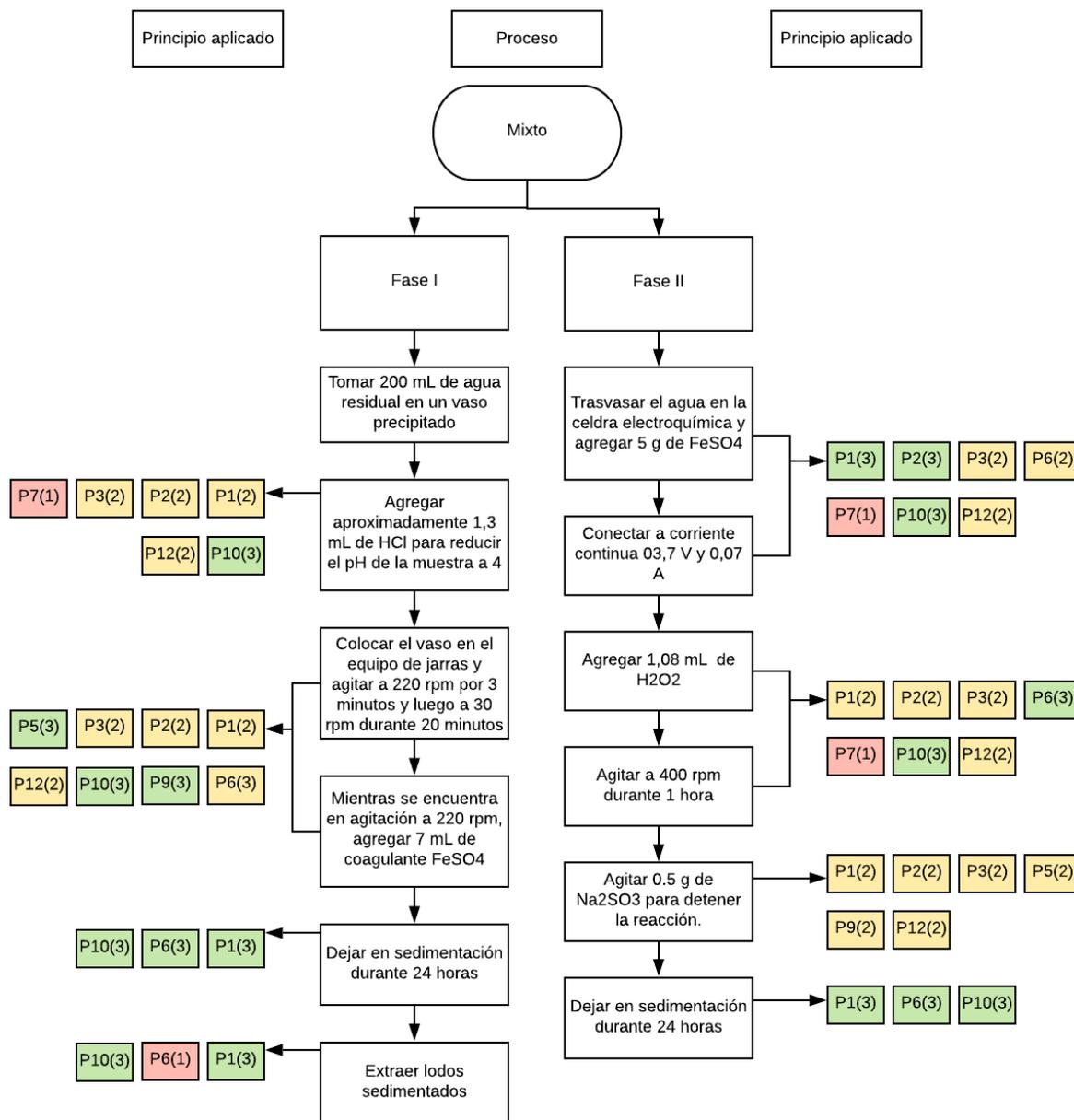


Figura 21. Diagrama de flujo del proceso Mixto. Autor, 2020

Este proceso obtuvo en la mayoría de las etapas principios con un ligero acercamiento verde, debido a las características que presentan los reactivos empleados. (Tabla 32)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 32. Matriz de evaluación del proceso Mixto basada en los criterios establecidos por Ribeiro et al, 2010.

PROCESO			Mixto						
Etapa	Características		Riesgo a la salud humana y el medio ambiente		Riesgo potencial de accidente químico		Características de degradabilidad y renovabilidad		
	Reactivo y/o sustancia utilizada		Salud humana	Medio ambiente	Inflamabilidad	Reactividad	Degradabilidad	Renovabilidad	
	Nombre y fórmula química	Estado							Principio de química verde evaluado
1. Tomar 200 mL de agua residual en un vaso precipitado y agregar aproximadamente 1.3 mL de HCl para reducir el pH de la muestra a 4	Ácido Clorhídrico HCl	Líquido	C-corrosivo	No-No indicado	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2(2) P3(2),P7(1) P10(3),P12(2)
2. Colocar en el equipo de jarras y agitar a 220 rpm por 3 minutos y luego a 30 rpm durante 20 minutos. Durante la agitación a 220 rpm, agregar 7 mL de coagulante FeSO <sub>4</sub>	Sulfato de Hierro $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$	Sólido	Xi-Irritante	No-No indicado	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2(2) P3(2),P5(3) P6(3),P9(3) P10(3),P12(2)
3. Dejar en sedimentación durante 24 horas	Lodos sedimentados	Sólido	Xn-Peligroso	N-Peligroso para el medio ambiente	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(3),P6(3) P10(3)
4. Retirar material sedimentado y		Sólido							P1(3),P6(1) P10(3)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

calentar a 105 °C durante 24 horas y luego a 550°C durante 1 hora	Lodos sedimentados		Xn-Peligroso	N-Peligroso para el medio ambiente	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	
5. Trasvasar el agua en la celda electroquímica y agregar 5 g de FeSO <sub>4</sub> y conectar a corriente continua 03,7 V y 0,07 A	Sulfato de Hierro <i>FeSO<sub>4</sub> * 7 H<sub>2</sub>O</i>	Sólido	Xi-Irritante	No-No indicado	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2(2) P3(2),P6(2) P7(1),P9(3) P10(3),P12(2)
6. Agregar 1,08 mL de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y agitar a 400 rpm durante 1 hora	Peróxido de hidrógeno <i>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></i>	Líquido	C-corrosivo	No-No indicado	No-No indicado	O-Agente oxidante	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2(2) P3(2),P6(3) P7(1),P10(3) P12(2)
7.. Agregar 0.5 g de Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> para detener la reacción.	Sulfito de sodio <i>Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub></i>	Sólido	Xi-Irritante	N-Peligroso para el medio ambiente	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(2),P2(2) P3(2),P5(2) P9(2),P12(2)
8. Dejar en sedimentación durante 24 horas	Lodos sedimentados	Sólido	No-No indicado	N-Peligroso para el medio ambiente	No-No indicado	No-No indicado	D- Degradable y rompible a productos inocuos	Nr-No renovable	P1(3),P6(3) P10(3)

Autor, 2020

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

La primera fase del proceso mixto comprendió el desarrollo de la alternativa C/F. En primera medida, se requirió del uso de ácido clorhídrico (HCl) como reactivo para reducir el pH del agua residual al valor requerido (Universidad Nacional de Heredia, 2011). Este es un compuesto corrosivo para la salud humana y el medio ambiente, por lo que los principios 1, 2, 3 y 12 tuvieron una calificación de 2. El principio 7 se calificó como 1 debido a que este compuesto no es renovable. Por otra parte, al utilizarse solo la cantidad requerida de HCl para disminuir el pH de la muestra a 4, se le dio al principio 10 un valor de 3, puesto que no se utiliza más allá del volumen requerido, de manera que pueda ser degradable a productos inocuos.

Posteriormente se utilizó Sulfato de Hierro ( $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ ) como coagulante. Este compuesto que causa irritación en la piel y, no presenta un peligro para el medio ambiente (Merck, 2018). Teniendo en cuenta esto, los principios 1,2, 3 y 12 recibieron un valor de 2, puesto que los residuos de este contaminante presentan un riesgo moderado para la salud humana. Dentro de este proceso se utilizó exclusivamente la dosis requerida de coagulante, de manera que todo el volumen fuera utilizado dentro de la sedimentación del material en suspensión, además no fue necesario el uso de catalizadores ni sustancias auxiliares, por lo tanto, los principios 5, 9 y 10 tuvieron una calificación de 3 y un alto acercamiento verde. Para la realización del proceso de coagulación no se requirió una presión y temperatura diferente a la del ambiente, de manera que el principio 6 se calificó como 3 y se obtuvo un alto acercamiento verde.

Una vez terminó el proceso de coagulación y sedimentación se generaron lodos precipitados. Los principios 1, 6 y 10 tuvieron una calificación de 3 debido a que se utilizó la temperatura y presión ambiente, y al ser estas compuestos en su mayoría por materia orgánica presentan una buena degradación a productos inocuos.

Estos lodos fueron extraídos del agua residual para poder continuar con el proceso C/F. Estos lodos se caracterizan por ser peligrosos a la salud humana y el medio ambiente debido a su alto contenido de materia orgánica sustancias contaminantes, de manera que si llegasen a fuentes hídricas superficiales se llegaría a presentar eutrofización de estas. En esta etapa del proceso, los principios 1 y 10 tuvieron una puntuación de 3 debido a que, aunque presentan un riesgo moderado a la salud y el medio ambiente cuando se encuentran en exceso, su degradación puede llegar a la formación de productos inocuos. Por otra parte, el principio 6 fue calificado como 1 debido a que en este punto del proceso los lodos fueron sometidos a un proceso de secado y volatilización a temperatura de 103°C y 550°C.

La segunda fase del proceso mixto comprendió el desarrollo de la alternativa E/F. El agua fue trasladada a la celda electrolítica. Primeramente, se utilizó Sulfato de Hierro ( $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ ) como coagulante. En esta etapa del proceso los principios 1, 3 y 12 recibieron un valor de 2 y un ligero acercamiento verde. Dentro de este proceso se utilizó exclusivamente la dosis requerida de coagulante, de manera que todo el volumen fuera utilizado dentro de la sedimentación del material en suspensión, además no fue necesario el uso de catalizadores ni sustancias auxiliares, por lo tanto, los principios 2, 5, 9 y 10 tuvieron una calificación de 3 y un alto acercamiento verde. Para la realización del proceso de oxidativo no se requirió una presión y temperatura diferente a la del ambiente, pero se requirió del uso de energía

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

para acelerar el proceso oxidativo, de manera que el principio 6 se calificó como 2 y se obtuvo un ligero acercamiento verde.

Posteriormente se utilizó Peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) como sustancia oxidante. Para este compuesto, los principios 1,2,3 y 12 fueron calificados como 2 debido a que los residuos de este presentan un riesgo moderado para el ser humano y el medio ambiente ya que es un compuesto corrosivo que puede llegar a causar ligera irritación al entrar en contacto con la piel (Consejo Colombiano de Seguridad, 2005; Merck, 2017); además, es un compuesto inestable que se descompone en oxígeno y agua, liberando en el proceso calor. Los principios 6 y 10 se calificaron como 3 debido a que no se presentó un exceso de reactivo para la realización del proceso, de manera que no hubo formación de subproductos y se llevó a cabo la degradación completa; de igual manera, no se requirió del cambio de temperatura y presión diferente al ambiente. El principio 7 se calificó como 1 debido a que el peróxido de hidrógeno es un compuesto degradable pero no renovable.

Luego de esto, se adicionó Sulfito de Sodio ( $Na_2SO_3$ ) como agente catalizador para detener la reacción oxidativa una vez se culminó el tiempo del experimento. A los principios 1, 9 y 12 se les asignó una calificación de 2 puesto que los residuos de Sulfito de Sodio generan un riesgo moderado a la salud y el medio ambiente puesto que al ser ingerido en grandes cantidades puede generar irritación en vías respiratorias, mientras que en el medio ambiente puede generar el aumento de la demanda química de oxígeno (Merck, 2012; Universidad Nacional de Heredia, 2016). Además, el Sulfito de Sodio como un catalizador para detener la reacción de oxidación, el cual presenta un moderado riesgo para la salud y el medio ambiente. El principio 2 tuvo una calificación de 3 debido que la reacción que se produjo no generó una formación de subproductos.

La última etapa de este proceso se generó los lodos producto de la coagulación del material orgánico sedimentable. Los principios 6 y 10 tuvieron una calificación de 3 debido a que se utilizó la temperatura y presión ambiente y, el principio 1 se calificó como 3 puesto que, aunque estos presentan un riesgo a la salud al estar compuestos en su mayoría por materia orgánica pueden ser degradados a productos inocuos a través de procesos biológicos. Los tres principios evaluados en esta etapa tuvieron un alto acercamiento verde.

Una vez obtenida la calificación de los principios evaluados en cada una de las etapas del proceso, se procedió a realizar un promedio de cada uno de estos, de manera que se tuviera una calificación general de cada principio.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Tabla 33. Calificación general de los principios.

Principio de Química verde	Calificación
P1	2.7
P2	2
P3	2
P5	2.5
P6	2.7
P7	1
P8	3
P9	2.7
P10	3
P12	2

Autor, 2020.

Luego de obtener la calificación para cada uno de los principios, se procedió a efectuar el cálculo del área de la estrella verde e índice de área de la estrella verde, de manera que a partir de estos se pudiese determinar el porcentaje y acercamiento verde que presenta el proceso en base al cumplimiento de los principios de química verde

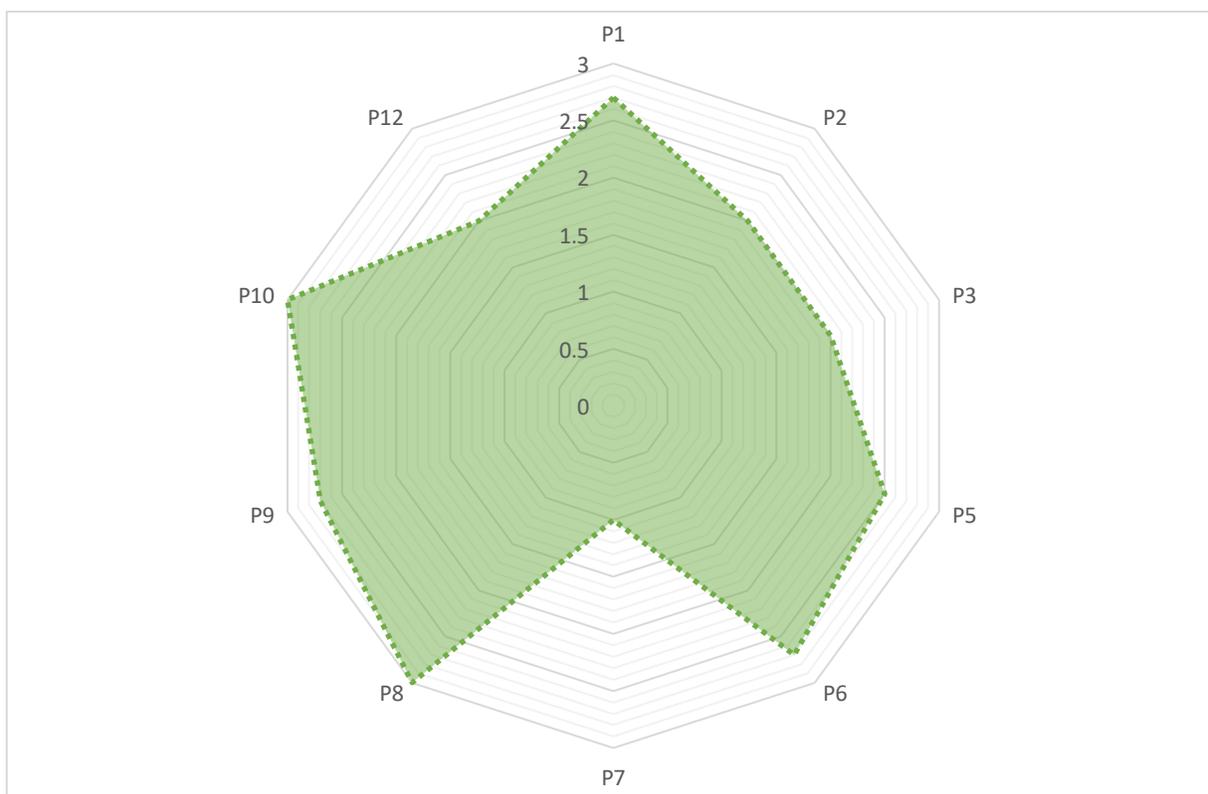
Tabla 34. Datos para la construcción del gráfico Estrella Verde.

Número de área	Principios abarcados dentro del área	Calificación de los principios	Valor del área	Área de la Estrella Verde	Área total	Índice de área de la Estrella Verde (%)	Cumplimiento de los principios de química verde
1	P1-P2	2.7-2	1.29				Ligero acercamiento verde
2	P2-P3	2-2	0.88				
3	P3-P5	2-2.5	1.17				
4	P5-P6	2.5-2.7	1.68				
5	P6-P7	2.7-1	0.49	13	24	54	
6	P7-P8	1-3	0.59				
7	P8-P9	3-2.7	2.09				
8	P9-P10	2.7-3	2.09				
9	P10-P12	3-2	1.47				
10	P12-P1	2-2.7	1.30				

Autor, 2020.

Una vez se obtuvo el área que abarcan cada uno de los principios, se procedió a realizar el gráfico de la Estrella Verde:

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.



Gráfica 12. Estrella Verde del proceso Mixto. Autor, 2020

El proceso Mixto presentó un porcentaje de cumplimiento de los principios de química verde de 54% (Tabla 34) y un ligero acercamiento verde. Se tuvo este resultado en vista de que los principios 1(Prevención), 2(Economía atómica), 3(Síntesis químicas menos peligrosas), 6(Incremento de la eficiencia energética) y 12(Química segura para la prevención de accidentes) fueron calificados como 2, debido principalmente a que los reactivos usados dentro de este proceso presentan un moderado riesgo para la salud y el medio ambiente; además, en el principio 6 se consideró el uso de energía para incrementar el proceso oxidativo, pese a que el valor de temperatura y presión fue la del ambiente. En cuanto a los principios 2(Economía atómica), 5(Solventes y sustancias auxiliares), 8(Reducir derivaciones) y 10(Diseño para la degradación) se les asignó una calificación de 3 debido a que en el proceso no se presentó un exceso de reactivos, lo cual no generó la formación de subproductos, de manera que el experimento fue diseñado para que todos los reactivos pudiesen ser degradados en su totalidad a productos inocuos.

El principio 9 tuvo una puntuación de 2,7 debido a que se requiere el uso de sulfito de Sodio como catalizador para detener el proceso oxidativo. El principio 7 se calificó como 1 debido a que ninguna de los reactivos empleados es renovable.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

## 10. Conclusiones

Al llevar a cabo la caracterización fisicoquímica del efluente generado durante el proceso de sacrificio bovino realizado en la Planta de Beneficio Animal del municipio de Girardot (Cundinamarca), se determinó que el proceso de tratamiento de aguas residuales es susceptible de optimización puesto que los resultados mostraron que parámetros como la DBO, DQO y Sólidos suspendidos, a través de los cuales se evalúa la disminución de materia orgánica y sólidos en suspensión, no cumplen actualmente con los valores máximos permitidos por la Resolución 0631 de 2015 para los vertimientos puntuales.

Se comprobó a través de pruebas experimentales, que las tres alternativas propuestas para el tratamiento de las aguas residuales presentaron buenos resultados en la disminución de DQO y turbidez del agua; Sin embargo, se obtuvo que la mejor alternativa desde el punto de vista técnico para el tratamiento de este efluente es el proceso mixto, debido a que se consiguió una disminución de la DQO de 93,8%, debido a que al implementar la estrategia de retirar los lodos generados en la etapa del proceso C/F antes de proceder a la fase del proceso E/F permitió que en este último se diera una mayor disminución de materia orgánica en comparación con la obtenida en cada proceso en solitario. No obstante, se considera que el parámetro de turbidez no logró un porcentaje de remoción tal alto en este proceso debido a la posible sobresaturación de  $\text{FeSO}_4$  producto de la adición de este compuesto en las dos fases que conforman esta alternativa.

La métrica holística “Estrella Verde” es una herramienta de gran utilidad para evaluar el acercamiento a la química verde que presentan los procesos químicos. Gracias a esta se pudo evaluar el porcentaje de acercamiento que tienen cada una de las alternativas de tratamiento propuestas a 10 de los 12 principios de química verde, de manera que se pudiese determinar cuál de estas presenta un mayor porcentaje de cumplimiento verde. Se determinó que los tres procesos evaluados presentan un ligero acercamiento verde a la química verde, debido en gran medida a factores tales como el riesgo moderado a la salud y el medio ambiente y la capacidad de renovabilidad que presentan cada uno de los reactivos empleados. No obstante, se determinó que el proceso C/F al obtener un porcentaje de acercamiento verde de 61% presenta una mayor cercanía con respecto a los otros dos procesos a lograr un gran acercamiento a la química verde.

Al evaluar la mejor alternativa desde el punto de vista ambiental, económico y técnico, se encontró que a nivel operativo las tres alternativas son eficientes en la remoción de carga orgánica a valores normativos permisibles. Sin embargo, desde el punto de vista económico y ambiental, el proceso C/F presentó ventajas adicionales frente a las otras dos alternativas, debido principalmente a costos asociados con el uso de reactivos y las características de estos desde la perspectiva ambiental.

## 11. Recomendaciones

Para mejorar las condiciones de tratamiento en cada uno de los procesos, es recomendable evaluar la influencia de la variable temperatura en la eficiencia presentada en cada alternativa para la disminución de la carga orgánica de los efluentes de frigorífico.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Con el fin de incrementar el acercamiento a la química verde de cada uno de los procesos, se recomienda la evaluación de coagulantes naturales que no presenten un riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

Considerando que los lodos generados no son aptos para ser susceptibles de aprovechamiento agrícola, resulta oportuno considerar la posibilidad de realizar pruebas adicionales para determinar la mejor alternativa para la disposición de los lodos generados.

Para mejorar la eficiencia del proceso Mixto en la disminución de turbidez, es oportuno determinar la concentración de Fe residual que se genera en la fase C/F para así poder ajustar la dosis ideal de este elemento, de manera que se pueda disminuir el valor de los costos asociados a este proceso.

Los efluentes de actividades de sacrificio animal pueden presentar contenidos de fosforo y grasas. Por esto, sería ideal evaluar la eficiencia de los procesos C/F, E/F y mixto en la remoción de estos contaminantes.

Los efluentes de frigorífico presentan altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes que presentan un problema ambiental, por lo que se recomendaría evaluar la toxicidad de estos residuos líquidos a través de la prueba de inhibición de fluorescencia de *Aliivibrio fischeri*.

## 12. Referencias bibliográficas

Acero, R., Riaño, G., & Cardona, D. (2013). *Evaluación del sistema de gestión ambiental de los frigoríficos cárnicos en Colombia*. doi:10.18041/1900-0642/criteriolibre.19.1102

Agencia de Noticias Universidad Nacional de Colombia. (2017). Nuevo proceso mejora tratamiento de aguas en mataderos del país. Obtenido de <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/nuevo-proceso-mejora-tratamiento-de-aguas-en-mataderos-del-pais.html>

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-US EPA. (2004). *Effluent limitations guidelines and new source performance standards for the meat and poultry products point source category*. Obtenido de <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20002F0Q.PDF?Dockey¼20002F0Q.PDF>

Aguilar, E. (2015). *EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN A ESCALA LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA*. Obtenido de [http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/4303/Aguilar\\_ae.pdf;jse=781398672990EE82BED0178EEA5421B0?sequence=3](http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/4303/Aguilar_ae.pdf;jse=781398672990EE82BED0178EEA5421B0?sequence=3)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

- Aguilar, M., Saez, J., Llorens, M., Soler, A., Ortuño, J., Meseguer, V., & Fuentes, A. (2005). *Improvement of coagulation–flocculation process using anionic polyacrylamide as coagulant aid*. Obtenido de <https://pdf.sciencedirectassets.com/271852/1-s2.0-S0045653500X05784/1-s2.0-S0045653504007775/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEHUaCXVzLVVhc3QtMSJHMEUCIQC0wmRyDaftrpe8DkxeR2QXd0tTkfdlJ3vrZInEc36l5AIgGVZ%2FbHP%2F6%2BltCcv1SHeMOzpm6M8yoG3U%2Bh2q>
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2015). *Manejo y control de los vertimientos generados por el sector cárnico de la ciudad de Bogotá. Guía para la prevención*. doi:ISBN 978-958-9387-96-2
- Alcaldía Municipal de Girardot, Cundinamarca. (2014). *Sistema de gestión ambiental Municipal (SIGAM) Girardot, 2014-2026*. doi:10.1038/132817a0
- Alcaldía municipal de Girardot, Cundinamarca. (2018). *Información general del municipio*. Obtenido de <http://www.girardot-cundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- American Public Health Association. (2015). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Andía, Y. (2000). *TRATAMIENTO DE AGUA COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN*. SEDAPAL. Obtenido de [http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)
- Ang, W., Mohammad, A., Teow, Y., Benamor, A., & Hilal, N. (2015). *Hybrid chitosan/FeCl<sub>3</sub> coagulationmembrane processes: performance evaluation and membrane fouling study in removing natural organic matter*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.053>
- Angulo Bedoya, M., Betancourt Latorre, A., & Hernán Gil Pavas, E. (2008). *Optimización de los parámetros de operación en un proceso de tratamiento de aguas por electro-oxidación*. Obtenido de [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/404/MonicaL.\\_AnguloBedoya\\_2008.pdf;jsessionid=82A4280817972C9C31645F8454D7FC98?sequence=1](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/404/MonicaL._AnguloBedoya_2008.pdf;jsessionid=82A4280817972C9C31645F8454D7FC98?sequence=1)
- Ardila, A., Arriola, E., Reyes, J., Berrio, J., & Fuentes, G. (2015). *Mineralización de Etilenglicol por Foto-Fenton asistido con ferrioxalato*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/370/37045328007/html/index.html>
- Audic, J., Crespi, M., & Huertas, J. (1983). *coagulación-loculación química complemento de la depuración biológica*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/6207/Article06.pdf>

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

- Avendaño, G., & Reyes, M. (2012). *Evaluación del metodo Fenton para tratamiento de aguas industriales en ingenieria*. Obtenido de <https://repository.ean.edu.co/bitstream/handle/10882/4012/Metodo%20Fenton.pdf;jsessionid=15D5DD426BB28590F98DFFD0083E21DD?sequence=1>
- Ayeche, R. (2012). *reatment by Coagulation-Flocculation of Dairy Wastewater with the Residual Lime of National Algerian Industrial Gases Company (NIGC-Annaba)*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.026>.
- Becerra, M., & Cadena, S. (2016). *EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO FENTON A NIVEL LABORATORIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA AGUAS SAN JUAN S.A.S ESP*. Obtenido de <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/618/1/6102489-2016-2-IQ.pdf>
- Bustillo-Lecompte, C. F., & Mehrvar, M. (2015). *Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.jenvman.2015.07.008
- Cabrera, X., & Ramirez, M. (2009). *Estudio del proceso coagulación-floculación de aguas residuales de la empresa textil "desembarco del Granma" a escala laboratorio*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543760009.pdf>
- Cano, C. (2015). *Evaluación de un tratamiento de floculación-flotación para el agua residual generada en el procesamiento de subproductos avícolas*. Obtenido de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7965/EVALUACI%C3%93N%20DE%20UN%20TRATAMIENTO%20DE%20FLOCULACI%C3%93N-FLOTACI%C3%93N%20PARA%20EL%20AGUA%20RESIDUAL%20GENERADA%20EN%20EL%20PROCES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chan, Y., Chong, M., Law, C., & Hassell, D. (2009). *A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater*. Chemical Engineering Journal. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.06.041>
- Chaux, G., Rojas, G., & Bolaños, L. (2009). *PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA Y VIABILIDAD DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO PARA EFLUENTES DEMATADEROS EN PEQUEÑAS LOCALIDADES Caso: Municipio de El Tambo (Colombia)*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v7n1/v7n1a12.pdf>
- Congreso de Colombia, 1993. (s.f.). *Ley 99 de 1993*. Obtenido de [https://www.mininterior.gov.co/sites/default/files/dacn\\_ley\\_99\\_de\\_1993\\_0.pdf](https://www.mininterior.gov.co/sites/default/files/dacn_ley_99_de_1993_0.pdf)
- Consejo Colombiano de Seguridad. (2005). *Hoja de datos de seguridad acido clorhidrico liquido*. Obtenido de [http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/acido\\_clorhidrico.pdf](http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/acido_clorhidrico.pdf)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

- Consejo Colombiano de Seguridad. (2005). *Hoja De Seguridad Peroxido De Hidrogeno*. Obtenido de [http://www.uacj.mx/IIT/CICTA/Documents/Quimicos/Peroxido\\_de\\_hidrogeno.pdf](http://www.uacj.mx/IIT/CICTA/Documents/Quimicos/Peroxido_de_hidrogeno.pdf)
- Constitución Política de Colombia. (1991). *Constitución Política de Colombia: Art.79, Art.80*. Bogotá D.C: Ed. Legis.
- Contraloría de Cundinamarca. (2016). *Auditoria gubernamental con enfoque integral modalidad especial ambiental-Sentencia río Bogotá*. Obtenido de [http://www.contraloriadecundinamarca.gov.co/attachment/002%20informes/008%20informe\\_anual\\_del\\_estado\\_de\\_los\\_recurso\\_naturales\\_y\\_del\\_ambiente\\_del\\_departamento\\_de\\_cundinamarca/2016/assets/informe-final-girardot.pdf](http://www.contraloriadecundinamarca.gov.co/attachment/002%20informes/008%20informe_anual_del_estado_de_los_recurso_naturales_y_del_ambiente_del_departamento_de_cundinamarca/2016/assets/informe-final-girardot.pdf)
- Córdoba, D., & Farfán, L. (2018). *DIAGNÓSTICO DE CONDICIONES DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO DE LA PLANTA DE BENEFICIO ANIMAL DEL MUNICIPIO DE GIRARDOT AÑO 2018*. Obtenido de <https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/6842/TSO%20CORDOBA%20SATOFIMIO%20DIANA%20CAROLINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cortolima. (2013). *CALIDAD DE AGUAS .Factores Físico Químicos y Bacteriológicos de los Ecosistemas Acuáticos*. Obtenido de [https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro\\_documentos/pom\\_totare/diagnostico/1\\_211calidad\\_de\\_aguas.pdf](https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/1_211calidad_de_aguas.pdf)
- Davarnejad, R., & Nasiri, S. (2017). *Slaughterhouse wastewater treatment using an advanced oxidation process: Optimization study*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.envpol.2016.11.008
- Deloya, A. (2006). *Métodos de análisis físicos y espectrofométricos para el análisis de aguas residuales*. Obtenido de [http://Dialnet-MetodosDeAnalisisFisicosYEspectrofometricosParaEIA-4835509%20\(1\).pdf](http://Dialnet-MetodosDeAnalisisFisicosYEspectrofometricosParaEIA-4835509%20(1).pdf)
- Fabris, R., Chow, C., & Drikas, M. (2012). *Comparison of coagulant type on natural organic matter removal using equimolar concentrations*. © IWA Publishin. doi:10.2166/aqua.2012.060
- Fandiño, H. (2017). *DISEÑO PRELIMINAR DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE LA ESPERANZA DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER EN COLOMBIA*. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9238/Fandi%C3%B1oHans2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gabino, R. (2018). *Opuntia ficus-indica como coagulante para remoción de sólidos suspendidos totales del efluente de beneficio en avícola La Chacra*. Obtenido de <https://34.199.100.111/handle/20.500.12394/5029>

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Galvín, R. (2012). *PROCESOS FISICOQUÍMICOS EN DEPURACIÓN DE AGUAS*.

Obtenido de <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788499693873.pdf>

García, C., & Herrera, A. (2014). *FORMULACION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES DOMESTICAS PARA EL 50% DE LA POBLACION DEL MUNICIPIO DE FUSAGASUGÁ - CUNDINAMARCA AÑO 2014*. Obtenido de <https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/4838/T.IC%20GRACIA%20RODRIGUEZ%20CRISTYAN%20CAMILO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gomes de Barros, V., Duda, R., Vantini, J., Omori, W., Ferro, M., & Oliveira, R. (2017). *Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of Methanothermobacter and Methanosarcina archaea and Thermotogae bacteria*.  
doi:10.1016/j.biortech.2017.07.106

Gomes de Barros, V., Rodriguez, C., Botellos-Suarez, W., Duda, R., Alves de Oliveira, R., da Silva, E., . . . Madeira, L. (2020). *Treatment of biodigested coffee processing wastewater using Fenton's oxidation and coagulation/flocculation*.  
doi:10.1016/j.envpol.2019.113796

IDEAM; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Sentencia Río Bogotá*.  
Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/ocga/sentencia>

Lenntech. (2018). *Conductividad del agua*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm>

Lorenzo, Y. (2006). *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*.  
Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>

Mateus, M., & Poveda, I. (2016). *DESARROLLO DE UNA ALTERNATIVA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL TRATADA DE LA PTAR DEL FRIGORÍFICO BLE LTDA*. Obtenido de <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/516/1/6102556-2016-2-IQ.pdf>

Mendez, I., & Pietrogiovanna, J. (2010). *DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE REACTIVO FENTON EN UN TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR FENTON-ADSORCIÓN*. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v26n3/v26n3a4.pdf>

Merck. (2012). *FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD SULFITO DE SODIO*. Obtenido de [https://www.javeriana.edu.co/documents/4486808/5015300/SULFITO+DE+SODIO\\_MERCK.pdf/e1b04fd5-6526-469c-8dab-b163e291c5f6?version=1.0](https://www.javeriana.edu.co/documents/4486808/5015300/SULFITO+DE+SODIO_MERCK.pdf/e1b04fd5-6526-469c-8dab-b163e291c5f6?version=1.0)

Merck. (2017). *Ficha de Datos de Seguridad del Peroxido de Hidrógeno*. Obtenido de [https://www.merckmillipore.com/Web-ID-Site/id\\_ID/-/SGD/ShowDocument-](https://www.merckmillipore.com/Web-ID-Site/id_ID/-/SGD/ShowDocument-)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

File?ProductSKU=MDA\_CHEM-107209&DocumentType=MSD&DocumentId=107209\_SDS\_PE\_ES.PDF&DocumentUID=6501870&Language=ES&Country=PE&Origin=PDP

Merck. (2018). *Ficha de datos de Seguridad Sulfato de Hierro (II) heptahidratado*. Obtenido de [https://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-DE-Site/de\\_DE/-/EUR/ShowDocument-File?ProductSKU=MDA\\_CHEM-103963&DocumentId=103963\\_SDS\\_ES\\_ES.PDF&DocumentType=MSD&Language=ES&Country=ES&Origin=PDP&Display=inline](https://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-DE-Site/de_DE/-/EUR/ShowDocument-File?ProductSKU=MDA_CHEM-103963&DocumentId=103963_SDS_ES_ES.PDF&DocumentType=MSD&Language=ES&Country=ES&Origin=PDP&Display=inline)

Mestres, R. (2013). *Química Sostenible: Naturaleza, fines y ámbito*. doi:10.1016/s0187-893x(13)72503-5

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015*. Obtenido de [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res\\_631\\_marz\\_2015.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010-2022)*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/direccion-integral-de-recurso-hidrico/politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). *Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (s.f.). *Decreto 3930 de 2010*. Obtenido de [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)

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *Decreto 1287 de 2014*. Obtenido de <http://www.minvivienda.gov.co/Decretos%20Vivienda/1287%20-%202014.pdf>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017*. Obtenido de <http://www.minvivienda.gov.co/GuiasRAS/RAS%20-%200009.pdf>

Mittal, G. (2006). *Treatment of wastewater from abattoirs before land application - A review*. Bioresource Technology. doi:10.1016/j.biortech.2004.11.021

Monge, S., & Silva, A. (2016). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. Obtenido de [http://www.cytcd.org/sites/default/files/manual\\_sobre\\_oxidaciones\\_avanzadas\\_0.pdf](http://www.cytcd.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf)

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Morales, M., Martínez, J., Reyes, L., Martín, O., Razo, G., Obaya, A., & Ruvalcaba, R. (2011). *¿Qué tan verde es un experimento?* Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/eq/v22n3/v22n3a9.pdf>

Muñoz, D. (2005). *Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero: para una población menor a 200 habitantes*. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA. Obtenido de [http://Dialnet-SistemaDeTratamientoDeAguasResidualesDeMatadero-6117975%20\(2\).pdf](http://Dialnet-SistemaDeTratamientoDeAguasResidualesDeMatadero-6117975%20(2).pdf)

Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). *OCDE-FAO Perspectivas agrícolas 2017-2026*. doi:ISBN 978-92-64-28077-9

Ozturk, D., & Erdem Yilmaz, A. (2019). *Treatment of slaughterhouse wastewater with the electrochemical oxidation process: Role of operating parameters on treatment efficiency and energy consumption*. doi:10.1016/j.jwpe.2019.100834

Pabón, S., & Gélvez, J. (2009). Arranque y operación a escala real de un sistema de tratamiento de lodos activos para aguas residuales de matadero. *Revista Ingeniería e Investigación*, 29.

Páramo, J. (s.f.). *TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DE UN RASTRO MUNICIPAL MEDIANTE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA TIPO FENTON*. CIATEC. Obtenido de <http://ciatec.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1019/85>

Paramo-Vargas, J., Camargo, A., Estrada, M., Gutierrez, S., Godinez, L., & Peralta, J. (s.f.). 2015. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. doi:10.1016/j.jelechem.2015.07.002

Racar, M., Dolar, D., Farkaš, M., Milčić, N., Špehar, A., & Košutić, K. (2019). *Rendering plant wastewater reclamation by coagulation, sand filtration, and ultrafiltration*. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.04.045

Ribeiro, G., Costa, D., & Machado, A. (2013). *“Green Star”: a holistic Green Chemistry metric for evaluation of teaching laboratory experiments*. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/17518251003623376?needAccess=true>

Rodas M., E., & Botello S., W. (2016). Actividad hidrolítica de aislados bacterianos con potencial aplicación en el tratamiento de efluentes de frigorífico. doi:10.24188/recia.v8.n1.2016.202

Rodrigues, C., Boaventura, R., & Madeira, L. (2014). *Technical and Economic Feasibility of Polyester Dyeing Wastewater Treatment by Coagulation/Flocculation and Fenton's Oxidation*. doi: 10.1080/09593330.2013.866983

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Rodrigues, C., Neto, A., Duda, R., De oliveira, R., Boaventura, R., & Madeira, L. (2017). *Combination of Chemical Coagulation, Photo-Fenton Oxidation and Biodegradation for the Treatment of Vinasse from Sugar Cane Ethanol Distillery*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.104>.

Rojas, R. (2002). *Conferencia Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales*. Obtenido de <http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000093-9097e9190c/GESTION%20INTEGRAL%20DEL%20TRATAMIENTO%20AR.pdf>

Rubio-Clemente, A., Chica, E., & Peñuela, G. (2014). *Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico*. doi:10.25100/iyc.v16i2.3696

Ruiz, A., & Garcés, L. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43.

Sampieri, R., Fernandez, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. Obtenido de <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>

Satyanarayan, S., & Vanerkar, A. (2005). *Conventional Approach for Abattoir Wastewater Treatment*. doi:10.1080/09593332608618554

Sistema de Información Ambiental de Colombia-SIAC. (2007). *FICHA TECNICA: Total de sólidos en suspensión (Sólidos Suspendidos Totales)*. Obtenido de <http://institucional.ideam.gov.co/descargas?com=institucional&name=pubFile814&downloadname=>

Sistema de Información Ambiental de Colombia-SIAC. (2015). *Demanda y Uso del Agua*. Obtenido de <http://www.siac.gov.co/demandaagua>

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2016). *Programa de gestión para el manejo integral de residuos*. Obtenido de [http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Lineamientos\\_Int/PRO-1300-SIPG-01\\_Manejo\\_Integral\\_de\\_Residuos-V5.pdf](http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Lineamientos_Int/PRO-1300-SIPG-01_Manejo_Integral_de_Residuos-V5.pdf)

Universidad Nacional de Heredia. (2011). *Hoja de seguridad Ácido clorhídrico MSDS*. Obtenido de [http://Acido%20clorhidrico%20\(3\).pdf](http://Acido%20clorhidrico%20(3).pdf)

Universidad Nacional de heredia. (2013). *Hoja de seguridad Sulfato de hierro (II) MSDS*. Obtenido de <http://www.pegatex.com.co/pdf/Carpincol MR60.pdf>

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Universidad Nacional de Heredia. (2013). *Hoja de seguridad Sulfito de sodio MSDS*. Obtenido de [http://sulfito%20de%20sodio%20\(2\).pdf](http://sulfito%20de%20sodio%20(2).pdf)

Universidad Nacional del Litoral. (2019). *Ingeniería en Recurso Hídrico*. Obtenido de <https://www.unl.edu.ar/carreras/ingenieria-en-recursos-hidricos/>

Valta, K., Kosanovic, T., Malamis, D., Moustakas, K., & Loizidou, M. (2015). Overview of water usage and wastewater management in the food and beverage industry. doi: 10.1080/19443994.2014.934100

Zapata, N., & Hernandez, M. (2017). *Tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de [http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion\\_digital/Agua\\_Servicio\\_Publico/Tratamiento\\_Aguas\\_Residuales-Zapata\\_N.pdf](http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Agua_Servicio_Publico/Tratamiento_Aguas_Residuales-Zapata_N.pdf)

Zhang, M., Dong, H., Zhao, L., Wang, D., & Meng, D. (2019). *A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective*. Obtenido de <https://pdf.sciencedirectassets.com/271800/1-s2.0-S0048969719X00121/1-s2.0-S0048969719311684/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEBMaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQDBso%2Frd%2B3%2BodO7WwBw0nvjWxKzKMvjicbRUzJQgO%2FN1QIgWJpo2veKSI58uZRw6TuCEjIOZicS%2BqgQ4e>

### 13. Anexos

#### Anexo 1. Ficha de preguntas de investigación

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.



**UNIVERSIDAD EL BOSQUE**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL**  
**PROYECTO DE GRADO**

**Preguntas Planta de Beneficio Animal municipio de Girardot, Cundinamarca**

- 1. Número de trabajadores en la empresa. (horario, hombres y mujeres)**  
18 operarios en la planta, 5 personas administrativa
- 2. Cuantas reses sacrifican diariamente. ¿Este número varía en épocas donde la población aumenta? (Es decir en temporada turística aumenta población flotante)**  
Mensualmente se sacrifican 500 reses, esto varía según la temporada, puesto que en época de alta población aumenta la demanda. Puede llegar a sacrificarse diariamente hasta 30 reses.
- 3. ¿La cantidad de carne que se produce, se distribuye únicamente para el municipio o la planta abastece a otros municipios?**  
Principalmente se tiene la planta como abastecedor del municipio, sin embargo, al ser una planta de beneficio “abierta”, las personas pueden llevar a sacrificar sus reses y el animal se entrega procesado al dueño (deben traer carros fríos) y el ya dispone de eso
- 4. Tienen algún control o registro de la cantidad de agua utilizada durante el proceso**  
No, Solo se sabe que el caudal que se entrega al alcantarillado es de 9 litros/ segundo
- 5. Tipos de residuos que se generan durante el proceso**  
Agua viene con estiércol, sangre (contaminante principal), pelos, fluidos del animal, el cuero no mucho porque eso lo venden a empresas  
Los lodos y estiércol provenientes de la PTAR se entregan a un tercero que realiza abono con este (le están haciendo seguimiento a esto) se generan 8 toneladas/mensuales de lodos  
Los residuos sólidos (todas las partes de la res que no se utilizan) se le entregan a una empresa llamada PROTEICOL, estos realizan harina y derivados para alimentación animal  
Residuos sólidos principalmente provenientes de oficinas y demás (estos van al relleno sanitario)  
Los cueros se entregan a un tercero también  
Cuando salen órganos dañados (descompuestos) aún no se manejan, aunque muy rara vez ocurre esto
- 6. ¿Cuál es el porcentaje de remoción de contaminante al que se llega luego de pasar el agua por el sistema de tratamiento?**  
El porcentaje de remoción que tiene la PTAR es de 76%
- 7. Si tienen algún sistema de tratamiento de aguas residuales, ¿qué pasa con esta agua?**  
Se vierten a la red de alcantarillado una vez tratadas
- 8. ¿Los sistemas de alcantarillado y vertimientos son diferentes tanto para las aguas residuales domésticas (baños, oficinas, etc.) como de las aguas residuales industriales producidas en el proceso productivo?**

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Si, solo las aguas industriales llegan al sistema de tratamiento

9. **¿El vertimiento de estas aguas se da principalmente a que fuente hídrica? ¿Se le da un tipo de tratamiento a estas aguas previo a su vertimiento?** No, el agua residual una vez tratada es vertida directamente al sistema de alcantarillado municipal
10. **¿Se ha llegado a presentar afectaciones (a nivel de salud, ambientales) a las comunidades aledañas a la planta de beneficio animal?**  
No, debido a que la planta se encuentra dentro del sector comercial de la plaza de mercado se encuentran muy pocas viviendas con las cuales no se ha tenido ningún inconveniente hasta el momento
11. **¿Se realizan análisis fisicoquímicos de las aguas residuales? ¿Cada cuánto? ¿Se cumple con lo establecido en la Resolución 0631 del 2015 para vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillado?**  
Trimestralmente se realizan pruebas de caracterización fisicoquímica, avaladas por un laboratorio certificado. Estas son reportadas a la CAR

*Autor, 2019.*

## **Anexo 2. Matriz metodológica.**

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

Objetivo General	Objetivo específico	Actividades	Método	Dimensión	Variable	Aspecto	Indicador	Técnicas	Instrumentos									
Evaluar los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación como alternativas de tratamiento de aguas residuales producidas en la PBA del municipio Girardot, Cundinamarca	Investigación de línea base sobre el municipio y la planta de beneficio animal	Análisis de documentación, depuración de información para creación de línea base	Analítico	Investigativo	N/A	N/A	N/A	Análisis de documentación, depuración de información para creación de línea base	Bases de datos, documentos verificados publicados									
										Elaborar un diagnóstico ambiental de los vertimientos de aguas residuales generados en la planta de beneficio animal del municipio	Visita técnica planta de beneficio animal	Experimental	Investigativo	Producción	Producción carnica mensual	# reces sacrificadas diaria* 30 días	Entrevista	Formato de preguntas de investigación
															Producción de agua residual diaria	m <sup>3</sup> /día	Entrevista	Formato de preguntas de investigación
														Eficiencia	Eficiencia de la PTAR	% Remoción de contaminante	Entrevista	Formato de preguntas de investigación
	Estudio de parametros fisicoquimicos del agua residual de la planta	Experimental	Ecologico	Agua residual	Estado actual de la calidad del agua residual	Turbidez	Método nefelometrico	Turbidimetro										
							DBO5	Medición de agotamiento	Oxitop									
							DQO	Método EPA 410.4	Espectrofotometro									
							Sólidos Suspendedos totales	Gravimetria a 103-105 °C	Horno de secado a 105°C									
	Analizar la efectividad de los procesos Coagulación-Floculación y Electro-Fenton, considerando la eficiencia de remocion de la carga contaminante y los costos asociados durante el tratamiento de los efluente de la PBA	Realización de pruebas experimentales	Experimental	Ecologico	Eficiencia	Porcentaje de remoción de contaminante según el proceso	(volumen de contaminante removido/volumen total de contaminante)*100	Práctica de laboratorio	Equipos de laboratorio									
						Sustancias requeridas para el tratamiento	# sustancias reactivas requeridas para cada proceso	Práctica de laboratorio	Equipos de laboratorio									
						Residuos generados	Cantidad de residuos generados/Volumen inicial de contaminantes	Análisis de laboratorio	Comparación teorico-practica									
						Impacto sobre el medio ambiente	% de contaminación por insumos quimicos / % de remoción	Análisis de laboratorio	Comparación teorico-practica									
	Hallar el costo de cada uno de los procesos a escala laboratorio	Analítico	Economico	Costos	Costos de pruebas experimentales	\$	Comparación de costos	Balance economico										
	Calcular el indice de química verde para cada uno de los procesos evaluados como medida para seleccionar la alternativa de mayor viabilidad desde el punto de vista ambiental	Analítico	Investigativo	Acercamiento verde	Cumplimiento principios de química verde	# principios que se cumplen/total de principios	Metodología propuesta por Morales, 2011	Articulo realizado por Morales, 2011										
Construcción del gráfico Estrella Verde	Analítico	Investigativo	Acercamiento verde	Cumplimiento criterios para la construcción	% de cumplimiento del principio evaluado	Metodología propuesta por Ribeiro, 2010	Software de graficación											

Autor, 2019.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

**Anexo 3. Resultados evaluación de parámetros para la selección del pH ideal para la alternativa C/F.**

<b>Muestra (pH)</b>	<b>conductividad (<math>\mu S.cm^{-1}</math>)</b>	<b>Salinidad (ppt.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Resistividad (K<math>\Omega.cm</math>)</b>	<b>SDT (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>
<b>Control (6.93)</b>	527	0.262	1.92	754	35
<b>2,0</b>	7053	0.883	146	3410	45
<b>3,0</b>	1660	0.870	571	888	63
<b>4,0</b>	1066	0.576	650	461	12
<b>5,0</b>	627	0.321	1.56	374	22
<b>6.8</b>	467	0.227	2.34	213	72

*Autor, 2020*

**Anexo 4. Resultados evaluación de parámetros para la selección de la dosis óptima de coagulante para la alternativa C/F**

<b>Muestra (Concentración)</b>	<b>conductividad (<math>\mu S.cm^{-1}</math>)</b>	<b>Salinidad (ppt.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Resistividad (K<math>\Omega.cm</math>)</b>	<b>SDT (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>
<b>Control</b>	527	0.262	1.92	754	35
<b>100</b>	832	0.331	1.56	314	22
<b>300</b>	756	0.308	1.69	293	23
<b>500</b>	901	0.364	1.46	343	12
<b>700</b>	991	0.402	1.31	376	10
<b>900</b>	863	0.369	1.40	346	10
<b>1100</b>	1180	0.555	904	539	12

*Autor, 2020.*

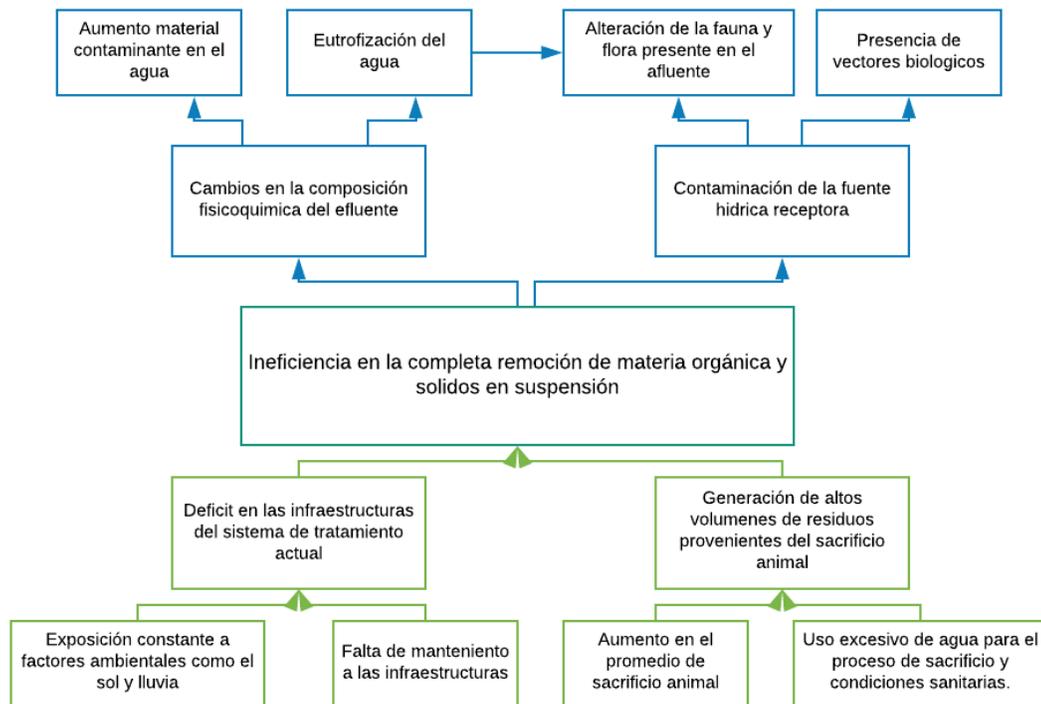
**Anexo 5. Resultados evaluación de parámetros para la selección de la relación molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>+2</sup>**

<b>Muestra</b>	<b>conductividad (<math>\mu S.cm^{-1}</math>)</b>	<b>Salinidad (ppt.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Resistividad (K<math>\Omega.cm</math>)</b>	<b>SDT (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>
<b>Control</b>	527	0.262	1.92	754	35
<b>0.5</b>	3010	1.34	388	1267	12
<b>1.5</b>	3223	1.47	351	1410	4
<b>3.0</b>	2680	1.22	417	1190	14

*Autor, 2020.*

**Anexo 6. Árbol de problema.**

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.



Anexo 7. Permiso para la toma de muestras de agua residual

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.

 <b>SerREGIONALES</b> Girardot <small>UNA EMPRESA CON FUTURO</small>	EMPRESA DE SERVICIOS MUNICIPALES Y REGIONALES "SER REGIONALES" NIT. 900.004.606-6

Girardot, febrero 19 de 2.020

Oficio No. 100.14.02 – 065

Señorita:  
**DANIELA VALENTINA CARDOSO ARAGON**  
Estudiante Ingeniería Ambiental Noveno Semestre  
Universidad El Bosque  
Bogotá D.C.

**ASUNTO:** RESPUESTA Oficio de fecha Febrero 6 de 2.020  
**REFERENCIA:** PETICION MUESTRA DE AGUA TRATADA

Respetada Señorita Cardoso:

Reciba cordial saludo por parte de la Empresa "Ser Regionales", en atención a la solicitud, es menester manifestarle lo siguiente:

- Evaluada la solicitud esta Gerencia ha decidió **AUTORIZAR** su solicitud respecto de la toma de muestras de agua en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (P.T.A.R.) que opera en la Planta de Beneficio Animal de la Empresa "Ser Regionales" para los fines aducidos en el oficio.
- Por lo anterior se ha dispuesto a la Ingeniera Ambiental de la empresa **ESTEFANIA MORALES HORTA** CC. No. 1.070.619.316 - Celular: 304 – 3979722

Es importante manifestar que "Ser Regionales" agradece cualquier aporte que dentro de su investigación y estudio nos sirva para el mejoramiento de la operación y a su vez el compromiso de apoyar a nuestros jóvenes universitarios para su formación profesional.

Atentamente,

  
**DEVIS FERNANDEZ AGUIRRE**  
Gerente General "Ser Regionales"

Proyecto: Secretaría General.

Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la Planta de Beneficio Animal del municipio Girardot, Cundinamarca.