

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN DE UN EFLUENTE DE LA  
INDUSTRIA DE ACEITE DE PALMA PARA LA DEPURACIÓN DE CARGA  
ORGÁNICA Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS A NIVEL DE LABORATORIO**

**Tesis**

**Para optar el título de:**

**INGENIERA AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**MEDALLA GUTIERREZ SOFIA**

**Tingo María – Perú**

**2021**



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 009-2022-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 22 de marzo del 2022 a hora 11:10 a. m. a través de la Sala Virtual de Conferencias Microsoft Teams de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

**“EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN DE UN EFLUENTE DE LA INDUSTRIA DE ACEITE DE PALMA PARA LA DEPURACIÓN DE CARGA ORGÁNICA Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS A NIVEL DE LABORATORIO”**

Presentado por la Bachiller: **MEDALLA GUTIERREZ, Sofia**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

**Dr. VICTOR M. BETETA ALVARADO**  
**PRESIDENTE**

Tingo María, 15 de junio de 2022

**Ing. M. Sc. LAURIANO ZAVALA DE LA CRUZ**  
**MIEMBRO**

**Ing. MSc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**  
**MIEMBRO**

**Ing. M. Sc. JOSE LUIS PAREDES SALAZAR**  
**ASESOR**

# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

## FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



## EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN DE UN EFLUENTE DE LA INDUSTRIA DE ACEITE DE PALMA PARA LA DEPURACIÓN DE CARGA ORGÁNICA Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS A NIVEL DE LABORATORIO

<b>Autor</b>	: Medalla Gutiérrez, Sofía
<b>Asesor (es)</b>	: Ing. MSc. Paredes Salazar José Luis.
<b>Programa de investigación</b>	: Ciencia y tecnología ambientales.
<b>Línea de investigación</b>	: Tratamiento de aguas.
<b>Eje temático</b>	: Reducción de la contaminación del agua.
<b>Lugar de ejecución</b>	: Laboratorio de calidad de agua – FNRN-UNAS.
<b>Duración</b>	: 6 meses
<b>Financiamiento</b>	: Propio.

Tingo María – Perú

2021

## DEDICATORIA

A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de amor que han estado conmigo hasta el día de hoy. Por la bendición de permitirme terminar esta etapa profesional y ayudarme a superar muchos obstáculos del camino.

A mis padres, Amelia Gutiérrez y Alejandro Medalla, por brindarme su apoyo incondicional, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, son mi motivo y aliento para cumplir mis metas.

A mi hermano Cristian Nil por su apoyo en mi vida profesional. Por siempre confiar en mí. A mis hermanos Jimmy y Miriam por alentarme a seguir adelante siempre.

A mi hija Leire María por ser el motor de mi vida, hoy he dado un paso más para servirte de ejemplo. Gracias a ti he decidido subir un escalón más y crecer como persona y profesional. Te amo inmensamente mi pequeña.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A mis padres Amelia y Alejandro por brindarme su apoyo incondicional en los momentos difíciles. Por ser los que me impulsan a cumplir mis metas.
- A mi alma mater Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables y plana docente, por contribuir en mi formación profesional.
- A mi asesor Ing. MSc. José Luis Paredes Salazar por su confianza, orientación y los conocimientos aportados dentro de la investigación.
- A los señores miembros del jurado calificador: Ing. MSc. Víctor Beteta Alvarado, Ing. MSc. Franklin Dionisio Montalvo, Ing. MSc. Lauriano Zavaleta de la Cruz por sus sugerencias en el presente trabajo.
- A Webster Pérez Segura por sus conocimientos y aportes en el desarrollo de esta tesis.
- A mis compañeros de la promoción de Ingeniería ambiental 2014, por su apoyo durante los cinco años de estudio que compartimos en la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos .....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes de la investigación.....	3
2.2. Efluentes de la industria del aceite de palma.....	4
2.2.1. Generación de los efluentes de la industria del aceite de palma.....	5
2.2.2. Contaminación por vertimientos de efluentes del aceite de palma.....	5
2.2.3. Tecnologías aplicadas en el tratamiento de efluentes de la industria del aceite de palma.....	7
2.3. Electrocoagulación .....	8
2.3.1. Fundamentos de la electrocoagulación .....	8
2.3.2. Aplicaciones de la electrocoagulación.....	8
2.4. Celdas de electrocoagulación .....	9
2.4.1. Diseño y desarrollo de una celda de coagulación.....	9
2.4.2. Sistema de operación de una celda de electrocoagulación .....	10
2.4.3. Factores que afectan la electrocoagulación.....	10
2.5. Ventajas de la depuración de efluentes con electrocoagulación.....	11
2.6. Aplicación de la electrólisis a una emulsión aceite-agua .....	12
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
3.1. Lugar de ejecución.....	14
3.1.1. Ubicación política .....	14
3.1.2. Clima.....	14

3.2.	Materiales y equipos .....	15
3.2.1.	Materiales.....	15
3.2.2.	Reactivos.....	15
3.2.3.	Equipos .....	15
3.3.	Metodología.....	15
3.3.1.	Obtención de un efluente artificial de la industria de extracción del aceite de palma, que presente los parámetros fisicoquímicos típicos de DBO <sub>5</sub> y SST, en este tipo de vertimientos.....	15
3.3.2.	Construcción de una celda de electrocoagulación a nivel laboratorio con electrodos de fierro y aluminio, para implementar el sistema experimental de la investigación; <b>Error! Marcador no definido.</b>	
3.3.3.	Aplicación del tratamiento de coagulación al efluente artificial obtenido a un voltaje estándar, a tres temperaturas y tres valores de pH.....	17
3.3.4.	Determinación de la eficiencia alcanzada en los tratamientos de electrocoagulación y relacionar los resultados a las variables de estudio.....	17
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
4.1.	Obtención de un efluente artificial de la industria de extracción del aceite de palma, que presente los parámetros fisicoquímicos típicos de DBO <sub>5</sub> y SST, en este tipo de vertimientos.....	19
4.2.	Construcción de una celda de electrocoagulación a nivel laboratorio con electrodos de fierro y aluminio, para implementar el sistema experimental de la investigación .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b> 20
4.3.	Aplicación del tratamiento de coagulación al efluente artificial obtenido a un voltaje estándar, a tres temperaturas y tres valores de pH .....	21

4.4. Determinación de la eficiencia alcanzada en los tratamientos de electrocoagulación y relacionar los resultados a las variables de estudio .....	25
V. CONCLUSIONES .....	30
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	31
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
1.	Etapas y actividades de apoyo del proceso de extracción del aceite rojo. ....	6
2.	Efluentes originados en el proceso para la extracción del aceite rojo y su destino final. ....	6
3.	Caracterización del agua residual artificial de la investigación. ....	19
4.	Variación de la DBO <sub>5</sub> mediante la electrocoagulación del efluente a diferentes pH y temperatura. ....	21
5.	Variación de los SST, mediante la electrocoagulación del efluente a diferentes pH y temperatura. ....	24
6.	Eficiencia en remoción de la DBO <sub>5</sub> mediante la electrocoagulación del efluente a diferentes pH y temperatura. ....	26
7.	Eficiencia en remoción de SST mediante la electrocoagulación del efluente a diferentes pH y temperatura. ....	28
8.	Matriz de datos. ....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Racimos de palma para extracción de aceite. ....	4
2. Efluentes de una planta de beneficio de aceite de palma. ....	5
3. Reactores para electrocoagulación tipo batch: (a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie. ....	9
4. Reactor tipo filtra prensa. ....	10
5. Formación de agregados de aceite. ....	12
6. Ubicación política del lugar de ejecución. ....	14
7. Prototipo de la celda de electrocoagulación de la investigación. ....	20
8. Evaluación del efecto del pH en la remoción de la DBO <sub>5</sub> . ....	22
9. Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción de la DBO <sub>5</sub> . ....	23
10. Evaluación del efecto del pH en la remoción de SST. ....	25
11. Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción de SST. ....	25
12. Evaluación de la eficiencia en la remoción de DBO <sub>5</sub> , por la variación del pH. ....	27
13. Eficiencia en la remoción de DBO <sub>5</sub> por efecto de la variación de temperatura. ....	28
14. Evaluación de la eficiencia en la remoción SST, por efecto de la variación del pH. ...	29
15. Evaluación de la eficiencia en la remoción de SST, por efecto de la variación de la temperatura. ....	29
16. Sistema experimental utilizado en la investigación. ....	38
17. Pesado del fruto de palma. ....	38
18. Preparación del fruto de palma para preparación del agua residual. ....	39
19. Medición de la temperatura del agua residual artificial. ....	39
20. Celda de electrocoagulación lista para tratamiento. ....	40
21. Medición de la temperatura durante la operación de la celda de electrocoagulación. .	40
22. Vista lateral del agua residual en tratamiento de electrocoagulación. ....	41
23. Vista completa de la celda de electrocoagulación durante el tratamiento del agua. ....	41
24. Medición de la variable temperatura durante los tratamientos. ....	42
25. Medición de la variable pH durante la aplicación de los tratamientos. ....	42
26. Verificación del voltaje y continuidad en los electrodos. ....	43
27. Verificación del incremento espontaneo de temperatura en la celda. ....	43
28. Visualización de la fase aceitosa por efecto de la electrocoagulación. ....	44

29. Visualización de la formación de espuma mezclada con aceite del agua residual.....	44
30. Visualización de la formación de espuma mezclada con aceite del agua residual.....	45
31. Obtención de muestra del tratamiento de electrocoagulación. ....	45
32. Medición del Oxígeno disuelto para determinar la DB05. ....	46
33. Medición del pH.....	46
34. Visualización del cambio de apariencia en el agua tratada. ....	47
35. Comparación de muestras obtenidas por efectos de variación de temperatura y pH. ..	47

## RESUMEN

La contaminación del agua por efluentes procedentes de la industria de palma aceitera, requiere propuestas de alternativas que resulten con altas eficiencias. La electrocoagulación, es una tecnología que aplica corriente eléctrica para depurar un efluente; en este estudio, se presenta la evaluación de la remoción de la DBO<sub>5</sub> y SST, de un efluente artificial de la industria de la palma aceitera, por efecto de la electrocoagulación, aplicando diferentes temperaturas y valores de pH. Se construyó un celda de electrocoagulación de vidrio de 9 litros de capacidad, con electrodos de hierro y aluminio, dispuestos de manera vertical, la corriente eléctrica, fue proporcionada por una fuente de poder de 45 voltios y 30 Amperios de intensidad, el agua residual fue preparada y se obtuvo un agua con una DBO<sub>5</sub> de 2865,6 mg O<sub>2</sub>/L, SST de 3418,2 mg/L, un pH de 4,7 y una temperatura de 55,2 °C. Posteriormente se determinó la reducción de DBO<sub>5</sub> y SST, a las temperaturas de 40°C, 50 °C y 65 °C y a los pH de 4,2, 5,1 y 5,9. Los resultados obtenidos demostraron que en este tipo de efluente la DBO<sub>5</sub> alcanzó la mayor remoción con 94.48%, cuando es pH y la temperatura son mayores, mientras que los SST la remoción fue mayor, a la menor temperatura y mayor valor de pH, con un 98,12%. La prueba de Tukey realizado con un 95% de confiabilidad, demuestra que existe diferencia significativa en la variación de DBO<sub>5</sub> y SST, entre los tres valores de temperatura y pH.

**Palabras clave:** DBO, SST, reducción, Tukey, celdas.

## ABSTRACT

The contamination of water by effluents from the oil palm industry requires proposals for alternatives that result in high efficiencies. Electrocoagulation is a technology that applies electrical current to purify an effluent; In this study, the evaluation of the removal of BOD<sub>5</sub> and TSS from an artificial effluent from the oil palm industry is presented, due to the effect of electrocoagulation, applying different temperatures and pH values. A 9 liter capacity glass electrocoagulation cell was built, with iron and aluminum electrodes, arranged vertically, the electric current was provided by a 45 volt power source and 30 Amps intensity, the waste water was prepared and a water with a BOD<sub>5</sub> of 2865.6 mg O<sub>2</sub>/L, SST of 3418.2 mg/L, a pH of 4.7 and a temperature of 55.2 °C was obtained. Subsequently, the reduction of BOD<sub>5</sub> and SST was determined, at temperatures of 40 °C, 50 °C and 65 °C and at pHs of 4.2, 5.1 and 5.9. The results obtained showed that in this type of effluent the BOD<sub>5</sub> reached the highest removal with 94.48%, when it is pH and the temperature are higher, while the SST removal was higher, at the lower temperature and higher pH value, with a 98.12%. The Tukey test, carried out with 95% reliability, shows that there is a significant difference in the variation of BOD<sub>5</sub> and SST, between the three values of temperature and pH.

**Keywords:** BOD, SST, reduction, Tukey, cells.

## I. INTRODUCCIÓN

Dentro de todos los grandes retos enfrentados por la población mundial, se encuentra el suministro de agua limpia a grandes masas en el mundo. Este recurso natural es de vital importancia requerida en las distintas labores y actividades que realizan los seres humanos, traduciéndose muchos volúmenes en aguas residuales. La contaminación del agua fue más relevante en el tiempo y se consideró un problema ambiental prioritario en el Perú, que altera el equilibrio ecológico de dicho recurso hídrico.

En la región Ucayali la producción nacional de palma aceitera ha ido creciendo año tras año llegando a posesionarse como una importante industria a nivel regional y nacional es también una de las actividades industriales que repercute significativamente sobre el medio ambiente, alterando factores ambientales que en mayor o menor medida producirán un impacto ambiental, como el caso del vertimiento del aceite crudo en un efluente. La técnica procedimental de extraer el aceite de los frutos de la palmera, genera residuos, entre estos se consideran a los efluentes industriales que contienen elevados niveles de materiales orgánicos, coloración, restos sólidos y valores significativos de aceite y grasa, características suficientes para asignarles tratamientos adecuados previos a la descarga hacia cuerpos de agua dulce con la finalidad de no provocar modificaciones drásticas de lo que se compone naturalmente.

Ante la realidad descrita sobre el daño ambiental que se ocasionan por el efluente industrial, las empresas que extraen aceite de palma, implementan diversos sistemas que tratan dichos residuos, siendo las más conocidas las piscinas anaeróbicas, facultativas y aeróbicas, que se diseñaron con la prioridad de que asimilen elevadas cargas orgánicas, con rasgos como bajo en pH, elevada temperatura, que contenga aceites y grasas, así como la presencia de sólidos sedimentables más conocidos como lodos. Con el objetivo de mitigar los impactos ambientales que causan los efluentes vertidos sin tratamientos por generación excesiva de lodos, es necesario investigar la aplicación de nuevas tecnologías en el tratamiento de aguas residuales.

Respecto a la técnica de la electrocoagulación, se emplea a la electricidad con fines de eliminar contaminantes en suspensión, disuelto o emulsificado en un determinado volumen de agua residual, dicha corriente se induce por medio de placas de metal en paralelo de varios materiales, siendo los de mayor uso el aluminio y el hierro. Esta tecnología representa una alternativa llamativa en tratar diversos tipos de efluentes, entre estos los efluentes de la industria de la palma aceitera; se conocen diversos aspectos ventajosos de la técnica mencionada, siendo de mayor relevancia su requerimiento de equipos sencillos facilitando su operación, elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos, muy efectivo en remover

diversos contaminantes. Sobre lo descrito, se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál es la eficiencia de la electrocoagulación para la depuración de carga orgánica y sólidos suspendidos de un efluente de la industria de extracción de aceite de palma a nivel de laboratorio? A la cual se formula la siguiente hipótesis: La eficiencia de la electrocoagulación para la depuración de carga orgánica y sólidos suspendidos de un efluente de la industria de extracción de aceite de palma a nivel de laboratorio, supera el 80,0%.

### **1.1. Objetivo general**

Evaluar la eficiencia de la electrocoagulación de un efluente de la industria de extracción de aceite de palma para la depuración de carga orgánica y sólidos suspendidos a nivel de laboratorio

### **1.2. Objetivos específicos**

- Obtener un efluente artificial de la industria de extracción del aceite de palma, que presente los parámetros fisicoquímicos típicos de DBO5 y SST, en este tipo de vertimientos.
- Determinar el efecto de la aplicación de energía eléctrica en una celda de electrocoagulación, implementada y caracterizada a nivel laboratorio.
- Aplicar el tratamiento de electrocoagulación al efluente artificial obtenido a un voltaje estándar, a tres temperaturas en orden creciente y tres valores de pH.
- Determinar la eficiencia alcanzada en los tratamientos de electrocoagulación y relacionar los resultados a las variables de estudio.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes de la investigación

#### 2.1.1. A nivel internacional

Malacatus (2017) señala que, el ratio de agua residual por tonelada de Racimo de Fruto Fresco, generada durante el procedimiento de extraer aceite de palmera es  $0,84 \text{ m}^3/\text{TRFF}$ , estos estudios fueron realizados utilizando cinco extractoras de aceite de palmera que se encuentran en Pichincha, Esmeraldas y Santo Domingo del Ecuador, aquí mencionan que los efluentes de estas extractoras son tratados en sistemas de lagunas.

Un sistema piloto de electrocoagulación utilizado para tratar agua residual con la finalidad de reusarlas, evaluaron la remoción de cromo, resultando 51,65% de remoción, dejando una concentración remanente del metal inferior al valor que se establece como estándar en el tema de vertimiento, situación distinta la que se presentó en la remoción de otros metales como Ni con 18,09%, Pb con 50%, Zn con 47,37%, cuyos valores de concentración superan los valores estipulados en esta normativa. Para otros metales como el Cu, se produjo un incremento hasta 519,48%, esto ocurrió por la placa utilizada en el tratamiento. Estos resultados fueron determinados bajo el pH de 3,18, con una conductividad eléctrica de 21,83 mS/m y la temperatura de 48,5 °C (Morales y Acosta, 2010).

Otra investigación realizada basada en el riesgo por el potencial contaminante de la industria láctea, que presenta efluentes con alto contenido de materia orgánica. Aquí se estudió la aplicación de un procedimiento que permitió tratar este tipo de agua mediante electrocoagulación, evaluándose tres variables como son: el tiempo, la cantidad de placas de la celda de electrocoagulación y voltaje del sistema, la eficiencia mediante este tratamiento, medida como porcentaje de remoción obtenido fue la siguiente: para la DQO se observó un valor de 93,0%, DBO<sub>5</sub> de 82,0 % y los SS fue 76,0% (López y Harnisth, 2016).

#### 2.1.2. A nivel nacional

Cuando Aguilar (2015), realizó una investigación en tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria de pintura en un reactor de electrocoagulación, con fines de determinar lo eficiente que es en remover la Demanda Química de Oxígeno (DQO), considerando y referenciando los valores del pH, la intensidad de corriente, la conductividad y el tiempo de tratamiento, reportó como resultado una media de eficiencia del 87,0% en remover

la DQO, con 5 amperios de intensidad de corriente, 7,12 del pH natural del efluente y con 15 min del tiempo de tratamiento.

Como complemento, se considera al estudio de la aplicación de la electrocoagulación a las muestras de agua residual obtenido del campus universitario de la Universidad Nacional de Trujillo para conocer su efecto en reducir la Demanda Química de Oxígeno y la correlación respecto a las variables: intensidad de corriente, el pH, diferente electrodo y longitud de separación de electrodos; el resultado muestra que, el DQO en un 66,0% fue removido al utilizar 6 amperios de la intensidad de corriente, en donde el pH natural del efluente fue 7,00 , además del tiempo de tratamiento de media hora (Mecola, 2019).

## 2.2. Efluentes de la industria del aceite de palma

El aceite obtenido de los frutos de palmera, crudo o rojo, está referido al aceite proveniente del mesocarpio del fruto y se le considera como el número dos a nivel mundial posterior al aceite obtenido de la soya. Las palmeras presentan frutos de coloración ligeramente roja, siendo de dicho color el aceite sin ser refinado (Bonomie y Reyes, 2012).



**Figura 1.** Racimos de palma para extracción de aceite.

Abdurahman (2011) califica el efluente de una planta de beneficio de aceite de palma el cual es un líquido cuya coloración es amarillo-marón que posee componentes agresivos como: elevada carga orgánica con valores de DQO con 55.000 mg/L y DBO con 25.000 mg/L, además contiene altas concentraciones de sólidos suspendidos que registran medias de 20.000 mg/L, la temperatura resulta ser elevada con 80 °C y en el caso del pH, se caracteriza por ser ácido donde el intervalo fluctúa entre los 4,0 a 5,0.

De acuerdo a las características descritas, este efluente necesita ser tratada adecuadamente en función a la calidad requerida en el uso que se le va a destinar, generalmente se destina para regar las mismas plantaciones de palma o se descargan en aguas superficiales.



**Figura 2.** Efluentes de una planta de beneficio de aceite de palma.

### **2.2.1. Generación de los efluentes de la industria del aceite de palma**

Según Althausen (2016), las plantas de beneficio de aceite de palmera (POME, de acuerdo a su sigla en el idioma inglés) utilizan en su proceso grandes cantidades de agua, de lo cual resulta también grandes volúmenes de aguas residuales, el consumo de agua es elevado para esterilizar el fruto, así como en clarificar el aceite. La media aproximada del volumen de efluente en una planta común es  $0,80 \text{ m}^3$  respecto al proceso de  $1,0 \text{ t}$  de racimos con fruta fresca (FFB, sigla en base al idioma inglés).

Para, una planta calificada como mediana procesa anualmente 150.000 toneladas de FFB, lo que equivale a 30,0 toneladas de TFFB por hora, se estima un promedio aproximado  $120.000 \text{ m}^3$  de POME anual, que equivale diariamente a unos  $450 \text{ m}^3$ . Una comparación que ilustra este volumen de agua, podríamos tener como referencia que equivale al volumen mensual que ocupan cuatro piscinas olímpicas de  $50 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  correspondiente al largo, ancho y profundidad respectivamente (Althausen, 2016).

### **2.2.2. Contaminación por vertimientos de efluentes del aceite de palma**

Acuña (2000) menciona que, la separación y aprovechamiento de los residuos sólidos y la aplicación de algunas modificaciones menores en el proceso de extraer el aceite de los frutos

de la palmera, pueden reducir en forma significativa la problemática de contaminación del ambiente, porque dichos restos son de origen orgánico y se pueden convertir en abono de suelos. Este autor considera que dependiendo del grado de toxicidad de las descargas líquidas y también del estado de madurez del efluente se pueden considerar de bajo impacto al compararse respecto a las demás industrias. De manera contraria, Sánchez (2009) destaca que, este sector puede calificarse de alto potencial en impacto del ambiente, debido a la gran cantidad volumétrica de efluentes, así como restos generados, y el grado de dificultad para su adecuación de acuerdo al estándar establecido en las diferentes normativas.

Para Acuña (2000), extraer aceite de los frutos de palmera se inicia en la cosecha, luego se las transporta hacia la planta extractora mediante camiones de carga, o carretas tractadas, seguidamente, se descargan los racimos y se las pesan, luego inician la secuencia en el proceso (Tabla 1).

**Tabla 1.** Etapas y actividades de apoyo del proceso de extracción del aceite rojo de la empresa OLPASA.

<b>Fases durante el proceso</b>	<b>Acciones de apoyo</b>
1. Recepcionar los frutos	7. Palmisteria
2. Esterilización	8. Almacenamiento del aceite crudo
3. Desfrutado	9. Deslodado
4. Digestión o malaxado	10. Control de Calidad
5. Prensado	
6. Clarificación	

Fuente: ALVAREZ y LLAMOCURE, 2018.

**Tabla 2.** Efluentes originados en el proceso para la extracción del aceite rojo y su destino final.

<b>Etapas del proceso</b>	<b>Efluente</b>	<b>Destino del efluente</b>
Recepcionar	Impurezas del fruto	Abonamiento de palmeras
Esterilizar	Líquidos	Tratar el agua (Lagunas)
Desfrutado	Raquis vacíos	Parcelas para controlar las malezas
Extracción	Líquidos	Tratar el agua (Lagunas)

Clarificación	Líquidos	Tratar el agua (Lagunas)
Almacenamiento del aceite rojo	Agua y lodo residual	Tratar el agua (Lagunas)

---

Fuente: Bonomie y Reyes (2012).

En la Tabla 2, fueron plasmados las diversas fases correspondientes a la extracción del aceite de los frutos de la palmera, la generación de cada tipo de efluente, así como hacia dónde se las destina a los mismos; representación realizada con la finalidad de que se establezca las áreas donde las empresas dieron inicio de los actos tendentes a la prevención, control y la mitigación del daño hacia el ambiente.

### **2.2.3. Tecnologías aplicadas en el tratamiento de efluentes de la industria del aceite de palma**

#### **2.2.3.1. Tratamiento típico del POME en laguna abierta**

Referido al sistema biológico con acción de diversas bacterias cuya función es digerir la materia orgánica, en su paso por una secuencia de lagunas abiertas, iniciando con uno de tipo anaeróbico, seguido por un facultativo y el final de tipo aeróbico. Teniendo un buen diseño que posea tiempo adecuado de retención y un adecuado mantenimiento para remover lodos, la eficiencia en la reducción de DQO en el efluente es 1.500 mg/L aproximadamente. Entre las ventajas tenemos su bajo costo, sin embargo, entre las desventajas podríamos mencionar que son sistemas pasivos o estáticos, que no cuentan con una mezcla interna ni con control de temperatura según Althausen (2016).

En tales condiciones las bacterias no desarrollan una óptima digestión tornándose un proceso con baja eficiencia, que se relaciona a: el tiempo de retención y el volumen y área requerida; la abundante generación de lodos (10-15 m<sup>3</sup> por día), las inversiones y gastos en estos sistemas, la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera, produciendo fuerte olor según Althausen (2016).

#### **2.2.3.2. Tratamiento moderno del POME**

Pese a las características agresivas, el POME posee alto potencial energético, por aplicación de una digestión anaeróbica, las bacterias emiten una mezcla de gases que contiene dióxido de carbono (35,0%) y metano (60,0%) que alcanzan una media de 6,0 kW/h/m<sup>3</sup>. Por

cada metro cúbico de POME se registra un valor potencial que fluctúa entre los 25 m<sup>3</sup> hasta los 35 m<sup>3</sup> del combustible biogás (Althausen, 2016).

La expectativa acerca de la eficiencia de los tratamientos de los efluentes en una planta que extrae aceite de los frutos de palmera, ha sido prometedora, en eficiencia y costos, esto ha generado que a través de los años se presenten avances, los cuales permiten categorizarlos en reactores por generación, con características mejoradas en forma progresiva y agrupadas en reactores de primera generación o lagunas cubiertas, que no presentan control de temperatura y son de baja eficiencia. A los primeros, le siguen los reactores de mezcla continua, denominados de segunda generación los cuales son provistos de un sistema de mezcla y alimentación continua, calefacción, remoción continua de lodo, avanzada automatización, cantidad y calidad del biogás elevado y muy estable. Por último, denominados de tercera generación están los sistemas multietapas, que combinan diferentes tipos de birreactores de digestión anaeróbica. Para dicho sistema, el reactor UASB contribuye con un 20,0% de biogás respecto a la totalidad producida del sistema según Althausen (2016).

### **2.3. Electrocoagulación**

#### **2.3.1. Fundamentos de la electrocoagulación**

Técnica que utiliza la inducción de corriente eléctrica en el agua residual por medio del uso de placas metálicas en paralelo de varios materiales, en el listado que se tiene, se consideran los más comunes al de aluminio y el de hierro. El uso de corriente eléctrica provoca las reacciones químicas para desestabilizar las estructuras de los contaminantes presentes. Este mecanismo es el precursor de la desnaturalización de contaminantes según Arango (2005).

Durante la ejecución de la técnica, se generan coagulantes in situ debido a la disolución de los iones de hierro o aluminio de los electrodos de hierro o aluminio respectivamente. Respecto a generar iones metálicos se originan en el ánodo y en el cátodo y da como resultado la producción de burbujas de hidrógeno que en su ascenso facilitan la eliminación de partículas floculadas, que se retiraran seguidamente según Arango (2005).

#### **2.3.2. Aplicaciones de la electrocoagulación**

La técnica utilizada en la presente tesis, se aplica en remover contaminantes de aguas residuales, como un tratamiento terciario, su funcionalidad puede ser aprovechada en diversas industrias en la remoción de contaminantes que convencionalmente se separan en tratamientos

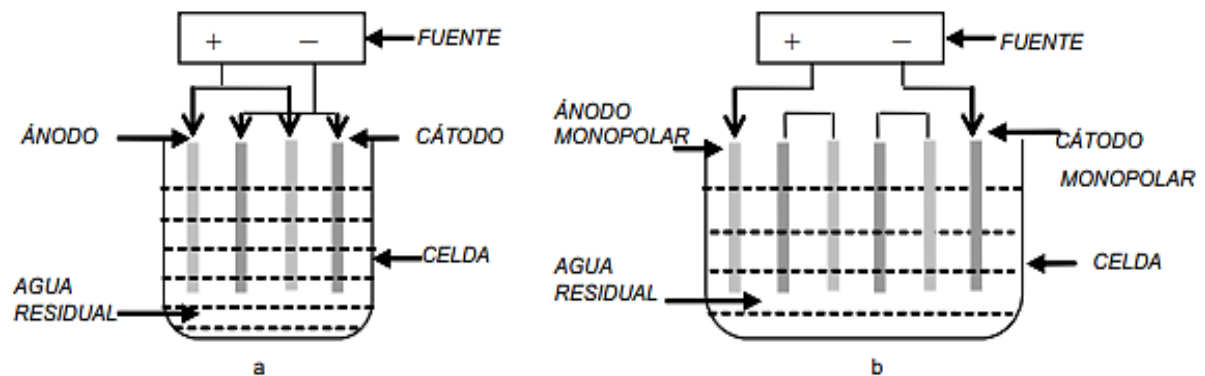
primarios, como es separación de sólidos suspendidos. Así su aplicación se extiende a industrias tales como la correspondiente a la galvanoplastia, electro-plataado metálico, fábricas de envasado, industria papelera, peletería, molino de acero, efluentes con niveles de plomo, cromo o mercurio y además de los efluentes con contenido de aceites que se generan en taller de máquinas, refinерías, taller de reparación de autos, transporte, almacenamiento y distribución de aceites, efluente de la industria alimentaria, lavandería e industria textil, y finalmente se utilizó en remover contaminantes de aguas para ser consumido por las personas y aguas residuales domésticas según Arango (2005).

## 2.4. Celdas de electrocoagulación

El reactor para la electrocoagulación consiste en una operación tipo batch, es simple, consta de una celda electroquímica provista de un ánodo y un cátodo que se disponen verticalmente y se conectan a una fuente de energía externa. El material anódico es corroído eléctricamente por la oxidación, en cambio el cátodo se mantiene pasivamente, interactuando con el producto del fenómeno de corrosión del ánodo según Holt (2004).

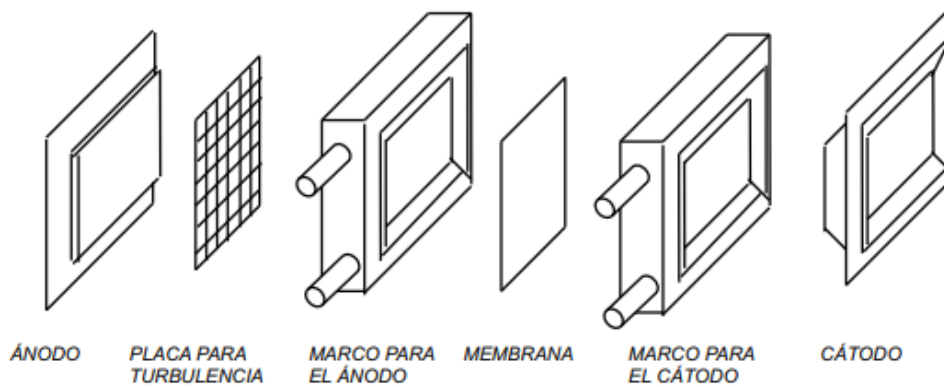
### 2.4.1. Diseño y desarrollo de una celda de coagulación

El diseño con electrodos que posean gran área superficial permite la disolución del metal por oxidación, es el que presenta mayor eficiencia, motivo por el cual se emplean celdas paralelas con electrodos monopolares o se conectan en serie. Dicho sistema indicado necesita de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente, además de un multímetro que cumplirá la función de leer el valor de la corriente según Mollah (2000).



**Figura 3.** Reactores para electrocoagulación tipo batch: (a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.

Existen otros tipos de reactores para la electrocoagulación, tal como, el tipo filtro prensa, que se conforma de una unidad de cobertura en forma de caja con un ánodo, un cátodo y una membrana como se observa en la Figura 4. Para el caso de dicho sistema, la operación y mantenimiento es más sencillo.



**Figura 4.** Reactor tipo filtra prensa.

#### 2.4.2. Sistema de operación de una celda de electrocoagulación

Durante la electrólisis ocurren una secuencia de procesos químicos y físicos en la cual el lado positivo presentan reacciones anódicas y en el caso del negativo se generan diversas reacciones catódicas.

El hierro o el aluminio son utilizados en placas, como electrodo de sacrificio o placas consumibles que aportan iones al sistema. Dichos iones que se liberan tienden a neutralizar la carga de las partículas que desestabilizan el sistema de suspensión en el contaminante lo que da inicio a la coagulación. También, debido a que el agua presenta partículas coloidales, aceites u demás contaminantes, ellos son movidos por el campo eléctrico que se les aplica, pudiéndose ionizarse, sufren reacciones de electrólisis o de hidrólisis, que resultan en un estado reactivo y excitado lo que ocasionan que se liberen, se destruyan o sean insolubles los contaminantes según Mollah (2000).

#### 2.4.3. Factores que afectan la electrocoagulación

**La densidad de corriente:** El acto de suministrar corriente eléctrica al sistema de electrocoagulación va determinar el número de iones del  $Al^{+3}$  o del  $Fe^{+3}$  que se liberarán por medio de los electrodos. El uso de corriente muy elevada, genera que la energía eléctrica se transforme en energía calórica cuyo resultado es que se eleve la temperatura del agua. Aplicar mucha densidad de corriente tiende a disminuir la eficacia de manera significativa. En el caso

de querer elegir la densidad de corriente adecuada, se puede tener en consideración otros factores de operación como es el caso de la temperatura y el nivel del pH.

**La presencia de NaCl:** La existencia de sal incrementa el valor de la conductividad en el agua contaminada. Los iones de cloruro reducirían los efectos contrarios de iones como el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{SO}_4^{2-}$ , estos pudieran conducir a que se precipiten el  $\text{Ca}^{+2}$  y el  $\text{Mg}^{+2}$  y depositarse como una película insoluble sobre los electrodos, que incrementa la capacidad entre los electrodos, lo que significaría que se reduciría la eficiencia de la corriente. Cuando se desea que ocurra un proceso de electrocoagulación normal, es recomendable que se contengan niveles de  $\text{Cl}^-$  en un 20,0% según Guohua (2003).

**El pH:** Tanto el nivel del pH como la eficiencia de corriente se relacionan afectando la electrocoagulación de manera positiva, y en función a la formación del hidróxido del metal y la naturaleza del contaminante se obtiene el rendimiento, el cual ha sido mejor los resultados cuando se tiene niveles de pH cerca de 7,0; pero hay que tener en cuenta que, que ante el valor indicado del pH se consume bastante energía a consecuencia de la existencia de la heterogeneidad en la conductividad. Así, ante la presencia de elevada conductividad no hay efecto significativo por parte del pH, esta propiedad química luego de la electrocoagulación puede elevarse en presencia de agua residual ácida, pero tienden a disminuir en el caso de que el agua residual sea alcalina. En el caso de que exista una elevación del nivel de pH bajo condiciones ácidas se le atribuye a que reaccione el hidrógeno en el cátodo generado por  $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$  según Guohua (2003).

**La temperatura:** No se tienen muchos reportes sobre el efecto de la temperatura en la electrocoagulación, debido a que se observó comportamientos en donde la eficiencia en la corriente tiende a incrementarse al inicio hasta alcanzar a los 60,0 °C el valor máximo, seguidamente tiende a disminuir. La temperatura aumenta la eficiencia al incrementarse en la actividad de destruir la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo según Arango (2005).

## 2.5. Ventajas de la depuración de efluentes con electrocoagulación

Las ventajas de esta tecnología son principalmente los costos de operación, ya que, son más bajos que en los procesos convencionales donde se requieren polímeros. Además, necesita simples equipos de fácil manejo, que permiten manejar los problemas encontrados en su funcionamiento, y dan como resultado la obtención de aguas potables, incoloras e inodoras. En

un tratamiento de coagulación convencional, es necesario el almacenamiento y uso de productos químicos a diferencia de la electrocoagulación en la cual se generan lodos más compactos y en menor cantidad, son antiácidos, muy estable y se separan de manera rápida por filtración. Se pueden remover partículas coloidales más pequeñas, por efecto del campo eléctrico aplicado ya que provoca su movimiento acelerado, facilitando la coagulación y las burbujas de gas producidas, llevan el contaminante a la superficie de la solución, concentrándose muy fácil, siendo recuperado y removido según Arango (2005).

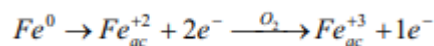
## 2.6. Aplicación de la electrólisis a una emulsión aceite-agua

Una emulsión es una dispersión del aceite en el agua, que por la presencia de una surfactante forma la fase continua estable. Los grupos aniónicos en la molécula de surfactante tiende a prevenir que se agreguen y coagulen las gotas de aceite por medio de la repulsión electrostática (Petterson, 1985), similar al esquema de la Figura 5.

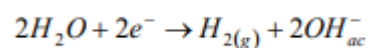


**Figura 5.** Formación de agregados de aceite.

En un ánodo de sacrificio de Fe, se oxida en  $Fe^{+2}$  el cual se oxida de nuevo en iones de  $Fe^{+3}$ , reaccionando de la siguiente manera:



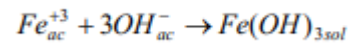
La electrólisis incrementa la fuerza iónica del medio y el electro genera cationes debido a su elevada carga de +3, neutralizando de manera eficiente la superficie con carga de moléculas del surfactante. Paralelamente se libera el hidrógeno en el cátodo mediante la reacción:



Como consecuencia de la electrólisis, el pH del medio incrementa. La respuesta a la reacción en base a las ecuaciones anteriores, es que la emulsión se desestabiliza y las partículas del aceite coloidal tienden a agregarse (Mollah, 2000).

### Formación de un lodo rico en aceite

La reacción entre el  $Fe^{+3}$  formado electroquímicamente y los  $OH^{-}$  formados en el cátodo genera el hidróxido férrico (Ibáñez et al., 1975), según la reacción:



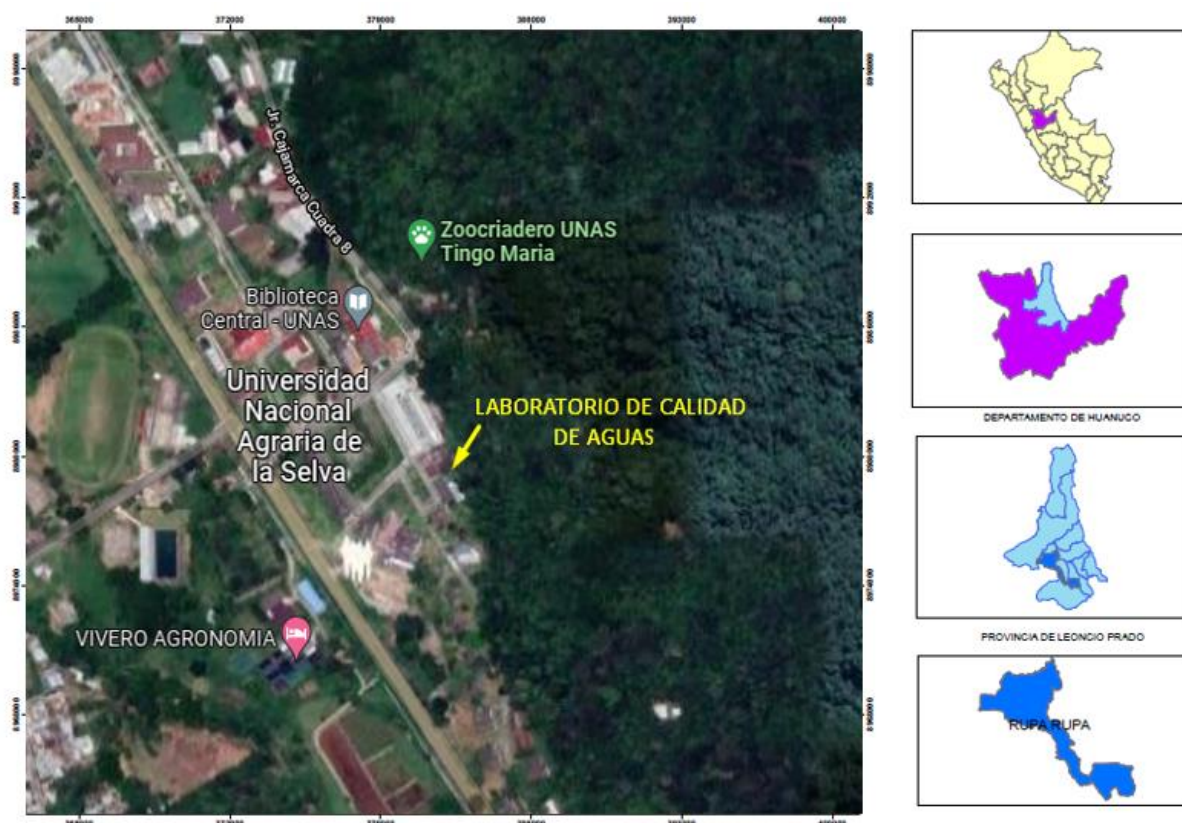
El hidróxido férrico desestabiliza las gotas de aceite que flotan, alcanzando a la superficie en donde se remueven muy fácilmente por una actividad de desnatado.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

##### 3.1.1. Ubicación política

Las diversas actividades de la investigación fueron llevadas a cabo en el Laboratorio de Calidad del Agua en la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), se enmarca políticamente dentro del distrito de Rupa Rupa, Provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. Con coordenadas UTM: E: 390283 m y N: 8970638 m.



**Figura 6.** Ubicación política del lugar de ejecución.

##### 3.1.2. Clima

El distrito Rupa Rupa está ubicada a 663 msnm, valor que lo enmarca dentro de la Selva Alta, en donde su clima característico es el cálido con abundante precipitación, el valor de la temperatura media anual es 25,0 °C, abarcando un intervalo de temperatura desde el máximo valor de 30,5 °C hasta una mínima de 18,5 °C; con respecto a la humedad relativa, la media es 78,5%, con un intervalo desde los 77,5% hasta la máxima de 80,0%.

## **3.2. Materiales y equipos**

### **3.2.1. Materiales**

Se utilizó el Fruto de palma, cuba de vidrio de 35 x 20 x 15 cm, láminas de Aluminio de 15 x 20 cm, láminas de Fierro de 15 x 20 cm, cables de conexión, silicona, filtro y vasos de precipitación.

### **3.2.2. Reactivos**

Se utilizó agua destilada, HCl en cc e NaOH.

### **3.2.3. Equipos**

Se utilizó una balanza Analítica marca Ohaus con  $\pm 0.0001$  g de precisión, pH-metro marca Hanna modelo HI98127 precisión  $\pm 0.1$  pH, oxímetro marca Lamotte, Modelo QW049A, la fuente de alimentación de corriente eléctrica de 50 v y una estufa eléctrica marca Imaco.

## **3.3. Metodología**

### **3.3.1. Obtención de un efluente artificial de la industria de extracción del aceite de palma, que presente los parámetros fisicoquímicos típicos de DBO<sub>5</sub> y SST, en este tipo de vertimientos**

Se trabajó con 1 kg del fruto de la palma y mediante un tratamiento térmico, en medio acuoso por 45 min, se acondicionaron los frutos para la extracción del aceite. Se consideró lo indicado por Brugés (2004), en donde, en el proceso inicial, el esterilizador y la pulpa del fruto tienden a trabajar como un condensador, necesitando consumir mucho vapor. La gradiente de temperatura resulta elevada ( $T=90$  °C).

Posteriormente se realizó la molienda del fruto, en un molino manual, y se prensó para extraer el aceite, complementariamente se realizó el control de peso para determinar el rendimiento de la operación. La extracción se realizó por (03) veces, posteriormente dejo reposar por un periodo de tiempo de tres (03) horas, se determinó la DBO<sub>5</sub> y la concentración de SST.

#### **3.3.1.1. Determinación del pH**

El valor que se registró se obtuvo mediante un pH-metro equipado con electrodo de vidrio.

### 3.3.1.2. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno

Se utilizó el método de dilución por cinco días a 20 °C (Ramalho, 1996).

La muestra fue incubada por cinco días con 20 °C, la medición del oxígeno disuelto fue realizada por el método electrométrico, al inicio y culminada la incubación.

En la determinación de la DBO<sub>5</sub> en zonas con elevada carga de contaminante se ha tenido que usar diluciones, por tal razón se empleó la fórmula siguiente:

$$DBO_5 \left( \frac{mg}{L} \right) = OD_s^i - OD_b^f + \left( \frac{V_b}{V_s} \right) (OD_b^f - OD_s^f)$$

Siendo:

$OD_s^i$  = Concentración inicial de oxígeno disuelto de la muestra en mg/L

$OD_s^f$  = Concentración de oxígeno disuelto a 5 días de la solución en mg/L

$OD_b^f$  = Oxígeno disuelto final del blanco o agua de dilución (mg/L)

$V_s$  = Cantidad volumétrica de la muestra.

$V_f$  = Capacidad volumétrica de la botella de incubación.

### 3.3.1.3. Determinación de sólidos suspendidos

La cantidad de sólido suspendido fue medido de acuerdo a lo que establece el método 2540 publicado por el APHA (2005), se utilizó la expresión siguiente:

$$SST, \frac{mg}{L} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V}$$

Siendo:

SST: Sólido suspendido total (mg/L).

P<sub>1</sub>: Peso del filtro (mg).

P<sub>2</sub>: Peso del filtro y el residuo secado a 103 - 105 °C (mg).

V: Volumen de la muestra (mL).

### 3.3.2. Determinación del efecto de la aplicación de energía eléctrica en una celda de electrocoagulación, implementada y caracterizada a nivel laboratorio.

La celda para electrocoagulación fue diseñada, tomando como referencia la utilizada por Arango y Garcés (2007), se consideró una distribución de volumen que contempló tres regiones: en la región superior se depositaría el lodo de flotación o lodo poco denso y la espuma, denominada zona de flotación, otra región media de reacción electroquímica denominada zona de reacción que poseen los electrodos y en la región inferior, conocida como zona de sedimentación que sirvió para depositar el lodo de precipitación o lodo con mayor densidad.

Existe amplia información bibliográfica en donde resaltan favorablemente la remoción de contaminantes utilizando estos materiales en la electrocoagulación, siendo los metales más empleados durante dicho procedimiento (Koby, 2003).

Los diseños de los electrodos fueron en placas de forma rectangular que se disponen en serie. En el mercado, a dichos metales se los encuentra en láminas con un espesor de 3,0 mm. Se estableció una longitud de 2,0 cm entre el arreglo de placas con las caras laterales de la celda, que permitió que fluya el agua residual en la electrólisis. Una longitud de 1,25 cm desde la cara frontal con los electrodos, además, 1,25 cm entre estos y la cara posterior de la celda. El número de electrodos se determinó en base a una separación máxima entre electrodos de 14,0 mm más 3,0 mm de espesor de la placa, basado a la expresión siguiente (Arango y Garcés, 2007):

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{ancho de celda}) - 2 \times (\text{dist. electrodos a cara lateral})}{\text{distancia máxima entre electrodos} + \text{espesor de placa}}$$

### **3.3.3. Aplicación del tratamiento de coagulación al efluente artificial obtenido a un voltaje estándar, a tres temperaturas y tres valores de pH**

Para la fuente se procedió a establecer el rango de valores correspondiente a la corriente eléctrica y al voltaje de trabajo basados en una densidad de corriente entre los 50 hasta los 110 A/m<sup>2</sup>, intervalo promedio que fueron reportados en las publicaciones bibliográficas que garantizaban resultados muy favorables respecto a las tasas de remoción de los contaminantes (Arango y Garcés, 2007).

Se trabajó con efluentes experimentales a las temperaturas de 65 °C, 50 °C y 40 °C y modificando el pH en los valores aproximados de 4, 5 y 6 unidades.

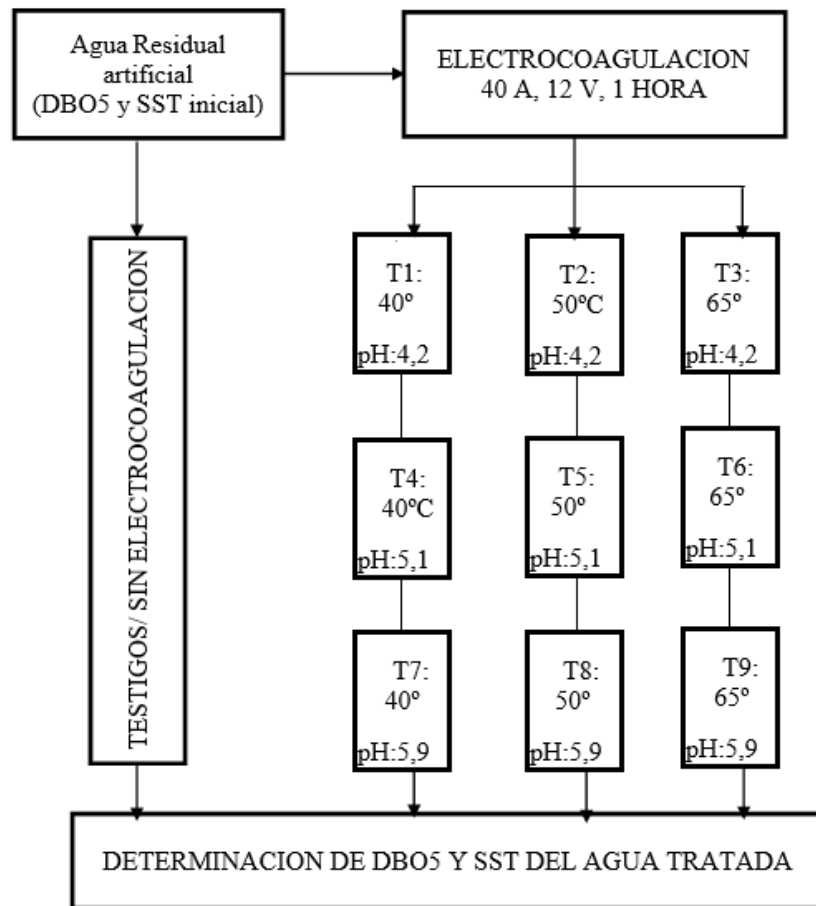
### **3.3.4. Determinación de la eficiencia alcanzada en los tratamientos de electrocoagulación y relacionar los resultados a las variables de estudio**

Para determinar la eficiencia que se alcanzó en los tratamientos de electrocoagulación, se aplicó las ecuaciones siguientes:

$$\text{Eficiencia de DBO (\%)} = \frac{\text{Valor de DBO} - \text{Valor final de DBO}}{\text{Valor inicial de DBO}} \times 100$$

$$\text{Eficiencia de SST (\%)} = \frac{\text{SST inicial} - \text{SST final}}{\text{Valor inicial SST}} \times 100$$

### 3.3.5. Diseño experimental



### 3.3.6. Variables

#### 3.3.6.1. Variables dependientes

- Eficiencia de remoción de DBO5 y SST.

#### 3.3.6.2. Variables independientes

- Temperatura del efluente (65°C, 50°C y 40°C)
- Valores de pH (4, 5 y 6)

### 3.3.7. Pruebas de múltiple rango de diferencia francamente significativa de Tukey (HSD Tukey)

Una vez tabuladas los datos obtenidos, se utilizó la prueba estadísticas denominada diferencia francamente significativa de Tukey (HSD Tukey), herramienta que se emplea con fines de conocer a los tratamientos de mayor diferencia significativa, prueba utilizada a un nivel de significancia del 5,0%. Se utilizó el software Statgraphics centurión XVII, versión española.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1. Obtención de un efluente artificial de la industria de extracción del aceite de palma, que presente los parámetros fisicoquímicos típicos de DBO<sub>5</sub> y SST, en este tipo de vertimientos

**Tabla 3.** Caracterización del agua residual artificial de la investigación.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
SST	3418,2	mg/L
DBO <sub>5</sub>	2865,6	mg O <sub>2</sub> /L
pH	4,7	Unidades de pH
Temperatura	55,2	°C

El agua residual artificial obtenida, presentó un pH ácido, con una considerable concentración de materia orgánica disuelta y de sólidos suspendidos totales, esto se debe al tratamiento térmico al que fue sometido el fruto de palma, con el fin de facilitar la extracción de sus componentes en el agua, entre los componentes extraídos también se obtuvo el aceite de palma, el cual a nivel industrial es el producto principal.

Respecto a las caracterizaciones del agua residual galvánica, sometida a electrocoagulación, Morales y Acosta (2010) mencionan que, para optimizar y evaluar el sistema, realizaron visitas a la empresa Compañía Eléctrica Ltda. y recolectaron 10 L de agua, proveniente del proceso de Enjuague, que durante el proceso son descargadas al alcantarillado; esta muestra fue caracterizada y se determinó que el pH oscilaba entre 0-1 con papel indicador y 1,40 con el pH-metro; la conductividad era de 26.4mS/m, y la temperatura de 18,2 °C , los cuales son valores más bajos respecto a los establecidos en esta investigación.

**4.2. Determinar el efecto de la aplicación de energía eléctrica en la celda de electrocoagulación, implementada y caracterizada a nivel laboratorio.**



**Figura 7.** Prototipo de la celda de electrocoagulación de la investigación.

La celda de electrocoagulación se diseñó y ensambló con vidrio de 8 mm de espesor, tuvo un volumen de 9000 mL, cuyas dimensiones son largo, ancho y altura son 30 cm x 15 cm x 20 cm, respectivamente. Se utilizaron 5 placas de aluminio de 18 cm x 15 cm, suspendidas, y dispuestas a un espacio de 6 cm a lo largo de la celda y se trabajó con una fuente de poder con un rango de salida de corriente continua de 12 V y un amperaje de salida de 40 amperios.

Una celda de similares características fue utilizada por Morales y Acosta (2010), quienes realizaron una investigación que consistió en la aplicación de un tratamiento de electrocoagulación en aguas residuales galvánicas, para el cual utilizaron un prototipo construido en acrílico provisto de un conjunto de tres placas metálicas, ubicadas en posición vertical, dos de hierro y una de cobre, cuyas dimensiones fueron de 10 cm x 17.6 cm, con capacidad para unos 8 L.

La celda de electrocoagulación se probó con agua de la red y no presentó problemas durante su operación, pero es importante mencionar que las placas de aluminio utilizadas como electrodos fueron de material reusado, con excelente adaptación como electrodo de sacrificio.

Para Morales y Acosta (2010), el prototipo utilizado en su investigación tuvo deficiencias relacionadas con el control de características como dimensiones y espesor de las placas, porque no favoreció una rápida producción de flocs en relación con el tiempo; respecto

a la distancia entre electrodos fijada en 3 cm, es una distancia relativamente corta para las dimensiones de las placas, lo cual influyó en la disminución de la densidad de corriente.

#### 4.3. Aplicación del tratamiento de coagulación al efluente artificial obtenido a un voltaje estándar, a tres temperaturas y tres valores de pH

**Tabla 4.** Variación de la DBO<sub>5</sub> mediante la electrocoagulación del efluente a diferentes pH y temperatura.

Temperatura del efluente	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)			
	Antes de electrocoagulación	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L) Después de electrocoagulación		
		pH= 4,2	pH= 5,1	pH= 5,9
40 °C		564,58	457,28	348,79
50 °C	2865,6	484,63	348,56	214,55
65 °C		470,3	334,46	158,11

Con la aplicación del tratamiento de electrocoagulación, se obtuvo como resultado que cuando el pH del efluente es mayor, la eficiencia en la reducción de la DBO<sub>5</sub> también incrementa, un efecto similar se obtuvo con el incremento de la temperatura sobre la eficiencia en la reducción de la DBO<sub>5</sub>. Los resultados observados podrían deberse a la concentración de iones OH<sup>-</sup> en cada valor de pH, siendo en la investigación el pH de 5,9 el que presenta mayor concentración de iones OH<sup>-</sup>, estos se suman a los iones hidroxilo que se generan por el proceso de electrocoagulación.

Para Arango (2005), el efecto del pH en la electrocoagulación se relaciona con la eficiencia de la corriente sobre la disolución del hidróxido del metal, de ser así se puede afirmar que el rendimiento del proceso es función de la naturaleza del contaminante, los cuales debido a su naturaleza fisicoquímica presentan diversos rangos de pH y en la mayoría de los casos, la mejor remoción se produce con valores de pH cercanos a 7.

Como ha podido comprobarse con esta investigación en un agua residual artificial de la industria de la palma aceitera, con la cual el pH, incrementó con la aplicación de la electrocoagulación, concuerda con lo mencionado por Arango (2005), quien dice que el pH, después de la electrocoagulación podría incrementarse si se trata de aguas residuales ácidas,

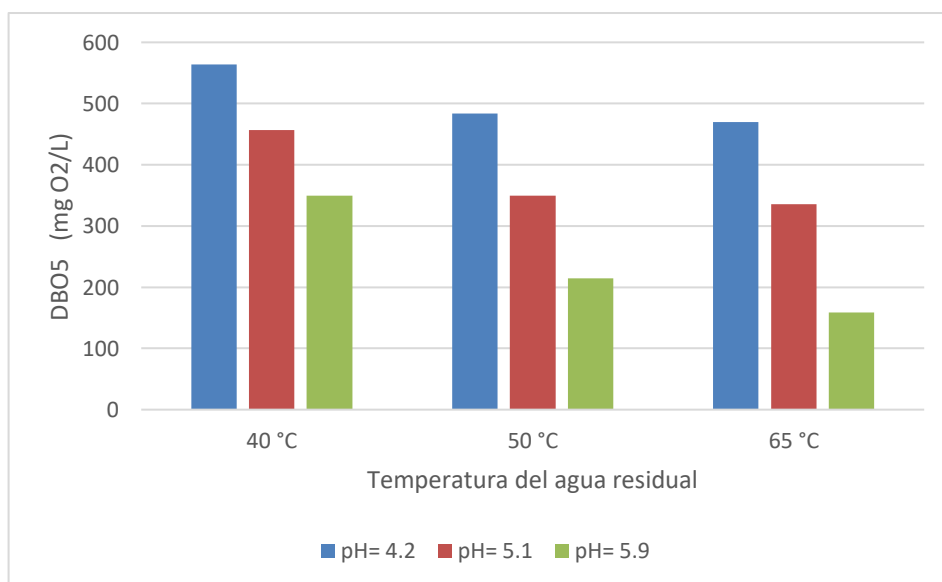
pero también podría decrecer para aguas alcalinas y sustenta lo que afirma mencionando que el incremento de pH a condiciones ácidas se debe a la reacción del hidrógeno en el cátodo.

Por otro lado, los iones  $H^+$  disociados por la electrolisis, actúan, desestabilizando las partículas coloidales de la materia orgánica disuelta, terminando, agregándose a los flóculos de hidróxido de aluminio, generado por electrocoagulación, los cuales descienden por gravedad.

Arango (2005), en su publicación referente a la electrocoagulación, hace mención que el uso de placas de metal, que pueden ser de hierro o aluminio son utilizadas como electrodo denominado de sacrificio o placa consumible debido a su aporte iones al sistema que son liberados y ejercen la neutralización de las cargas de las partículas que empiezan a desestabilizar los sistemas con material contaminante en suspensión para posteriormente continuar la coagulación y descenso de flocs.

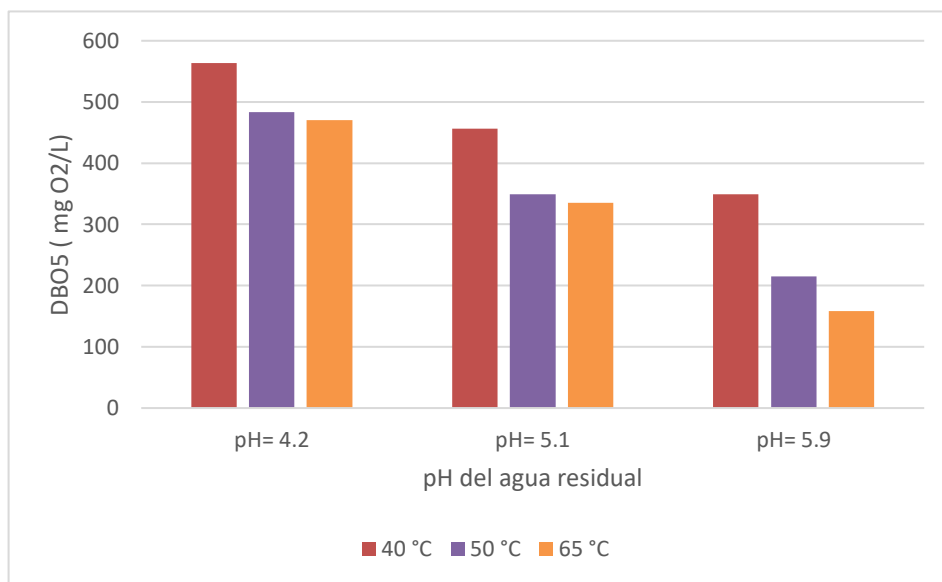
Con respecto al efecto de la temperatura del efluente, sobre la eficiencia en la remoción de  $DBO_5$ , por acción del proceso de electrocoagulación, el cual libera durante su aplicación, libera calor, el cual coadyuva a la disolución de la materia orgánica en el agua, la misma que posteriormente es eliminada mediante la formación de flóculos.

Según Arango (2005), no existe suficiente investigación, sobre el efecto que ejerce la temperatura en el tratamiento de electrocoagulación, sin embargo, mencionan que cuando la temperatura alcanza valores cercanos a  $60^\circ C$  es posible que la eficiencia en la corriente incremente a su máximo, y luego esta empieza a decrecer. Al parecer a mayor temperatura incrementa la eficiencia debido a su efecto positivo en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo.



**Figura 8.** Evaluación del efecto del pH en la remoción de la  $DBO_5$ .

En la Figura 8 se puede visualizar que con la aplicación del proceso de electrocoagulación la concentración de la  $DBO_5$  residual del efluente es mayor, cuando menor es la temperatura en el efluente. En la investigación de la aplicación de electrocoagulación de aguas residuales galvánicas desarrollada por Morales y Acosta (2010), éstos mencionan que el pH el rango de 1.52 – 2.73, que establecieron en su proceso, son valores muy bajos y no permiten que se dé el máximo rendimiento de producto; y sobre la temperatura establecida en su estudio en un rango de 37.5 – 39 °C, que es baja con respecto de la energía que debería liberarse en este tipo de reacciones, la cual está en un rango de 50-60 °C.



**Figura 9.** Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción de la  $DBO_5$ .

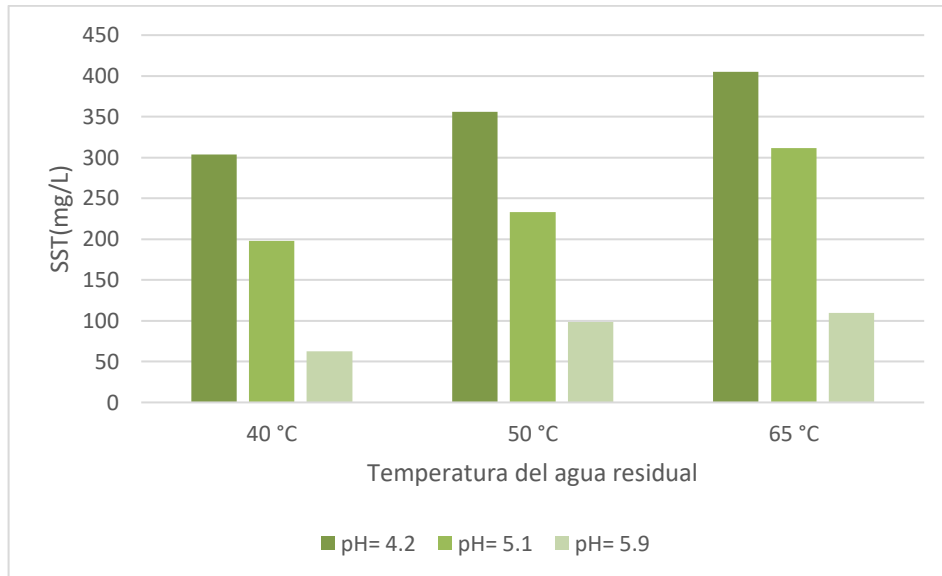
En la Figura 9, se puede visualizar que con la aplicación del proceso de electrocoagulación la concentración de la  $DBO_5$  residual del efluente registró mayores valores, cuando se utilizó menor valor del nivel de pH en el efluente que se consideró como prueba del experimento.

**Tabla 5.** Variación de los SST, mediante la electrocoagulación del efluente a diferentes pH y temperatura.

Temperatura del efluente	SST (mg/L) antes de electrocoagulación	SST (mg/L) después de electrocoagulación		
		pH= 4,2	pH= 5,1	pH= 5,9
40 °C		302,91	197,63	64,42
50 °C	3418,2	356,78	232,59	98,33
65 °C		405,09	311,52	109,17

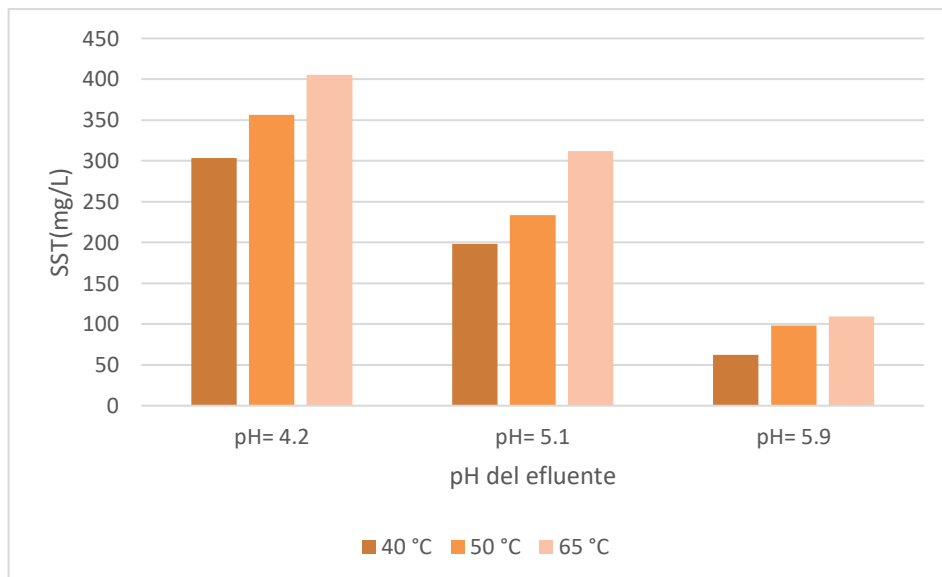
Con la aplicación del tratamiento de electrocoagulación, la concentración de SST del efluente disminuye cuando el pH incrementa, sin embargo, cuando la temperatura del efluente es mayor, la concentración de SST del efluente aumenta. El efecto del pH, se puede explicar por la influencia de los iones hidroxilo en la formación de flóculos, los cuales forman una red y descienden al fondo de la celda por gravedad, arrastrando en su trayectoria los sólidos que se encuentran en suspensión. Un efecto que contrarresta la eliminación de SST, es el incremento de la temperatura, debido a que se afecta la consistencia del floculo formado, dificultado la separación de estos por gravedad.

Los valores de porcentaje de remoción de SST obtenidos en esta investigación, son menores comparados con la remoción de DBO, situación similar a la que obtuvo López y Harnisth (2016), al evaluar la reducción de SS en aguas residuales de la industria láctea, obteniendo una reducción de 76.81%, los autores explican el resultado por el comportamiento que presentan los sólidos en suspensión que se producen, los cuales logran alcanzar la densidad adecuada para su floculación, adicionalmente complementan su argumento mencionando que eliminación de las materias por sedimentación es debido a la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran suspendidas, que acaban decantando al fondo de los contenedores.



**Figura 10.** Evaluación del efecto del pH en la remoción de SST.

En la Figura 10, se observa que en la aplicación de un tratamiento de electrocoagulación cuando mayor es la temperatura del agua residual, se ve afectada negativamente la remoción de SST.



**Figura 11.** Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción de SST.

En la Figura 11, se observa que en la aplicación de un tratamiento de electrocoagulación, cuando mayor es el pH del agua residual, se favorece la remoción de SST.

#### **4.4. Determinación de la eficiencia alcanzada en los tratamientos de electrocoagulación y relacionar los resultados a las variables de estudio**

**Tabla 6.** Eficiencia en remoción de la DBO<sub>5</sub> mediante la electrocoagulación del efluente a diferentes pH y temperatura.

Temperatura del efluente	Porcentaje de eficiencia en reducción (%)		
	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)		
	pH= 4,2	pH= 5,1	pH= 5,9
40 °C	80,3	84,04	87,83
50 °C	83,09	87,84	92,51
65 °C	83,59	88,33	94,48

En la tabla se observa que la mayor eficiencia en reducción de DBO<sub>5</sub> en agua residual artificial de la industria de extracción del aceite de palma, mediante un tratamiento de electrocoagulación, se produce con los valores de la temperatura y pH más altos manejados en la investigación.

También se observa que con el pH más bajo del agua residual, la diferencia en la reducción de DBO<sub>5</sub> con la aplicación de la electrocoagulación, por elevación de la temperatura del agua residual, no es muy significativa.

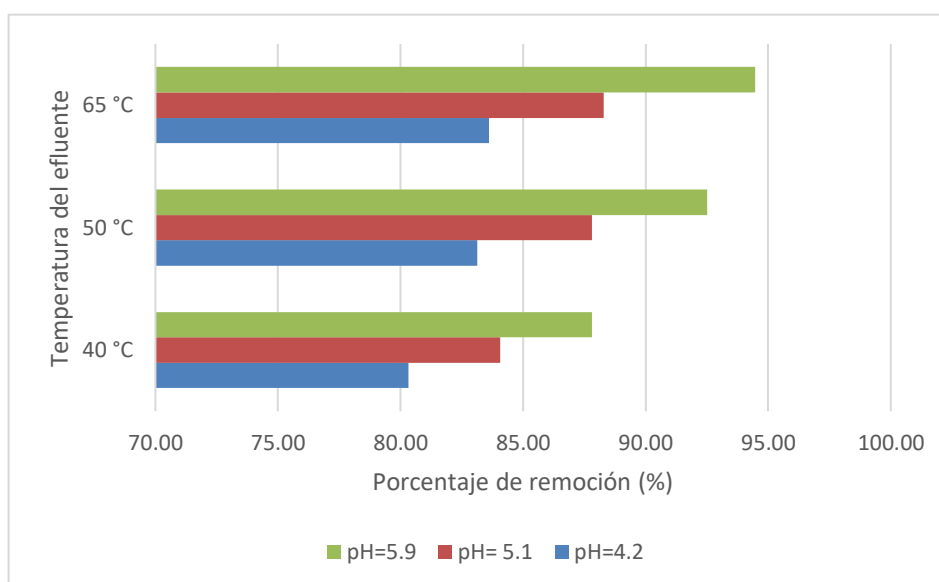
Mercado et al. (2009), en su publicación, sobre electrocoagulación en aguas residuales del sector automotriz, para reducir la concentración de níquel, hace mención que la materia orgánica, presente en un cuerpo de agua, se convierte prácticamente en el medio de transporte de metales pesados; basándonos en lo mencionado por los autores, y contrastando la remoción de contaminantes, cuantificados en este caso, como DBO y SST, los cuales también podrían ser considerados medios de transporte de otros iones y por ende su remoción repercute en contaminantes de otra naturaleza.

Comparando la eficiencia de la electrocoagulación para remoción de contaminantes de tipo metales pesados, citada por Mercado et al. (2009), quienes mencionan que la aplicación de electrocoagulación en diferentes aguas residuales, presentaron eficiencias de remoción de: 91,2% y 50% de Zn y Pb, respectivamente, en aguas aceitosas de una plataforma petrolera, de 99,92% de Zn y 99,97% de Cr, en aguas residuales industriales provenientes del tratamiento de superficies, de 95% de Zn, en aguas residuales de la industria de galvanizado En otros tipos de aguas residuales tratadas mediante electrocoagulación, tales como agua residual de curtiembre se pudo alcanzar 99,6% de remoción de cromo, en agua residual de la industria textil se obtuvo

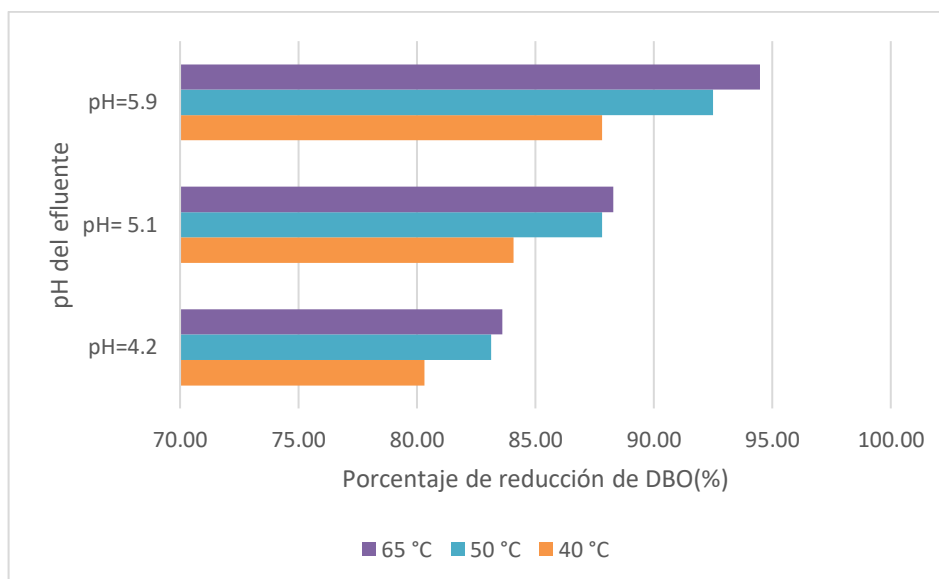
una remoción de 99,7% de Cr y 99,9% Zn, en agua residual de una industria de pinturas, se pudo obtener 94,1 % de remoción de Zn.

López y Harnisth (2016) investigaron el efecto de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea, y entre los resultados obtenidos mencionan un promedio de eficiencia del 93.33% de remoción de  $\text{DBO}_5$ , esto buen resultado tendría su explicación, porque en el proceso de electrocoagulación, las cargas positivas producto de la oxidación del Al, se liberan y se dispersan en el medio líquido; llegando a formar óxidos metálicos que ejercen una atracción eléctrica sobre los contaminantes que han sido desestabilizados.

Mecola (2019) realizó la publicación de su investigación en la que evaluó el efecto en la remoción de materia orgánica por medio de la electrocoagulación en aguas residuales de la ciudad universitaria de la Universidad Nacional de Trujillo, en este caso, el investigador cuantificó la materia orgánica como DQO y según sus resultados se alcanzó un 66% de remoción de materia orgánica, trabajando con un pH de 7, sin embargo al evaluar la remoción a pH de 4, hubo un incremento de remoción a 68%.



**Figura 12.** Evaluación de la eficiencia en la remoción de  $\text{DBO}_5$ , por la variación del pH.

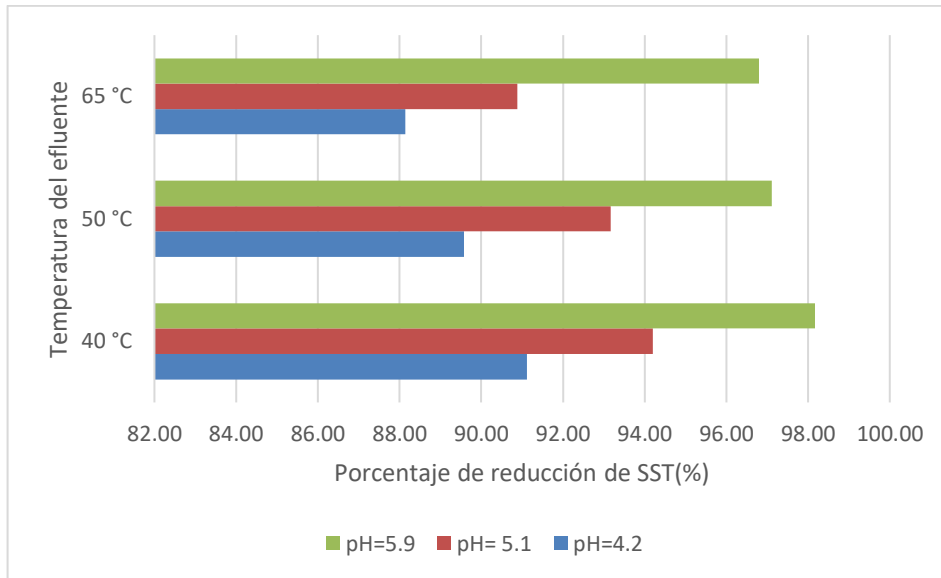


**Figura 13.** Eficiencia en la remoción de DBO<sub>5</sub> por efecto de la variación de temperatura.

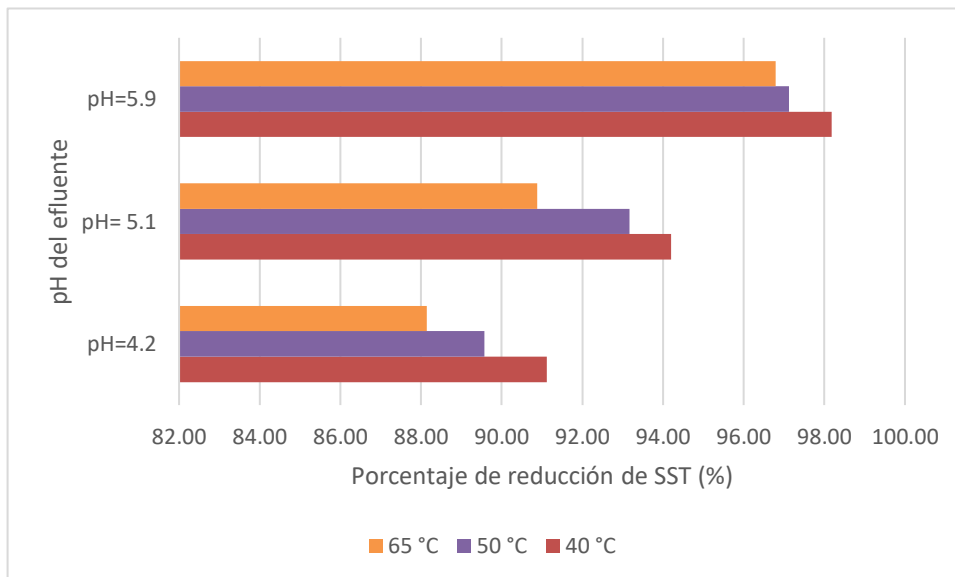
**Tabla 7.** Eficiencia en remoción de SST mediante la electrocoagulación del efluente a diferentes pH y temperatura.

Temperatura del efluente	Porcentaje de eficiencia de SST (mg/L) después de electrocoagulación		
	pH= 4,2	pH= 5,1	pH= 5,9
40 °C	91,14	94,22	98,12
50 °C	89,56	93,2	97,12
65 °C	88,15	90,89	96,81

Hubo mayor eficiencia en reducción de SST en agua residual artificial de la industria de extracción del aceite de palma, mediante un tratamiento de electrocoagulación, se produce con el menor valor de la temperatura y menor valor de pH (Tabla 7).



**Figura 14.** Evaluación de la eficiencia en la remoción SST, por efecto de la variación del pH.



**Figura 15.** Evaluación de la eficiencia en la remoción de SST, por efecto de la variación de la temperatura.

Con el análisis estadístico realizado, se puede ver que los datos obtenidos en el laboratorio, tienen un bajo coeficiente de variabilidad, eso quiere decir que existe homogeneidad entre los datos experimentales y según el Test de Tukey, los tratamientos realizados mediante electrocoagulación a las temperaturas y pH de la investigación, estadísticamente presentan diferencias significativas (Ver Apéndice B de Anexos).

## V. CONCLUSIONES

1. El efluente artificial de la industria de extracción del aceite de palma se caracteriza por presentar una DBO<sub>5</sub> de 2865,6 mgO<sub>2</sub>/L, SST de 3418,2 mg/L, pH de 4,7 y Temperatura de 55,2.
2. La celda de electrocoagulación trabajó con una fuente de poder con un rango de salida de corriente continua de 12 V y un amperaje de salida de 40 amperios.
3. El tratamiento de electrocoagulación ofrece buenos resultados para tratar el efluente de la industria de extracción del aceite de palma. A mayor pH del efluente mayor es la eficiencia en la reducción de la DBO<sub>5</sub> y SST. El incremento de la temperatura en el efluente mejora la eficiencia en la reducción de la DBO<sub>5</sub> pero menor es la eficiencia en remoción de SST.
4. La electrocoagulación logra una eficiencia en la remoción de DBO<sub>5</sub> de 92,51% con un pH de 5,9 y 40 °C. La eficiencia en la reducción de SST es de 98,12% con un pH de 5,9 y 40 °C.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

1. Realizar investigaciones con agua residual real de la industria de la palma, para determinar la diferencia en la eficiencia y por ende la viabilidad económica de esta alternativa.
2. Realizar investigaciones que permitan determinar la calidad de los lodos que se generan, con el fin de determinar si existe remoción de otros compuestos secundarios que se forman por reacciones en el efluente.
3. Realizar pruebas con diferentes metales como electrodos para determinar si la eficiencia incrementa.
4. Realizar investigaciones para determinar la influencia de la conductividad del efluente en la depuración del efluente por electrocoagulación.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdurahman, N.H., Rosli, Y.M., & Azhari, N.H. (2011). Development of a membrane anaerobic system (MAS) for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Desalination*, 266(1), 208-212.
- Acuña, Á. (2000). *Proceso de extracción de aceite de palma africana mediante el desgranado del fruto fresco*. Industrias Acuña LTDA. INAL. <http://palmaceite.tripod.com/desgranadofrio.pdf>. Consulta: 20/11/20
- Aguilar, E. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua* [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio UNMSM. [https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4303/Aguilar\\_ae.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4303/Aguilar_ae.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Althausen, M. (2016). Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio-Convertir un residuo en un recurso. *Revista Palmas*, 37, 31-37.
- Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49-56.
- Arango, A., y Garces, L. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(147), 56-67.
- Brugés, C. (2004). *Estimación y reducción de pérdidas en el proceso de extracción de aceite de palma en la planta de beneficio de fruto palmar Santa Elena S.AC. (Tumaco)* [Tesis de Posgrado, Universidad de la Sabana-Colombia].
- Guerrero, E. E. N. (2015). *Estudio sobre la recirculación de agua de producción utilizada para la extracción del aceite crudo de Palma*, 125.
- Guohua, C. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, 11–41. [www.elsevier.com/locate/seppur](http://www.elsevier.com/locate/seppur).
- Holt, P., Barton, G., & Mitchell, C. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59, 355-367. [www.elsevier.com/locate/chemosphere](http://www.elsevier.com/locate/chemosphere).
- Ibanez, J., G., Takimoto M., & Vasquez, R. (1975). Laboratory Experiments on electrochemical remediation of the environment: electrocoagulation of Oily Wastewater. *Journal of chemical education*, 72(11), 1050-1052.

- Koby, M., Can, O., & Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 100(1-3), 163-178.
- Lopez, P., y Harnisth, A. (2016). Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Enfoque UTE*, 7(1), 13-21.
- Malacatus, P., Guerrero, B., y Llerena, G. (2017). Generación de efluentes en el proceso de extracción de aceite crudo de Palma en el Ecuador. *Dominio de las Ciencias*, 3(4), 459-469.
- Mecola, N. (2019). Efecto de la electrocoagulación en la concentración de materia orgánica de aguas residuales de la Universidad Nacional de Trujillo. *Rev. Cienc. Tecnol.*, 15(1), 143-147.
- Mercado, I., Rios, J., y Arango, A. (2009). Electrocoagulación: una alternativa electroquímica para depurar aguas residuales industriales del sector automotriz. *Rev. Tratamiento de aguas residuales. Residuos*, 109(1), 1-6. [https://www.researchgate.net/publication/280533507\\_Electrocoagulacion\\_una\\_Alternativa\\_Electroquimica\\_para\\_Depurar\\_Aguas\\_Residuales\\_Industriales\\_del\\_Sector\\_Automotriz](https://www.researchgate.net/publication/280533507_Electrocoagulacion_una_Alternativa_Electroquimica_para_Depurar_Aguas_Residuales_Industriales_del_Sector_Automotriz)
- Mollah, M., Yousuf, A., Schennach, R., Parga, J., & Cocke, D., (2000). Electrocoagulation (EC) - science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41. Elsevier Science, [www.elsevier.nl/locate/jhazmat](http://www.elsevier.nl/locate/jhazmat).
- Morales, N., y Acosta, G. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 33-44.
- Petterson. J. (1985). *Industrial Wastewater Treatment Technology*. Butterworth Publishers, Stoneham.
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté, S.A.
- Sánchez, R., Najul, M., Ortega, E., y Ferrara, G. (2009). El manejo de los residuos en la industria de agroalimentos en Venezuela. *Revista Interciencia*, 34(2), 91-99.
- Santos, J., Ramírez, J. A., y Acosta, E. Y. (2000). Experiencias en la utilización de aguas residuales y lodos del fondo de las lagunas de estabilización en la plantación Palmar del Oriente. *Palmas*, 21(Especial), 241-249. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/791/791>

## ANEXOS

### Apéndice A. Datos de las pruebas experimentales

**Tabla 8.** Matriz de datos.

<b>Parámetro</b>	<b>Temperatura</b>	<b>pH</b>	<b>Valor</b>	<b>Promedio</b>
DBO	40°C	4,2	565,26	
DBO	40°C	4,2	564,82	
DBO	40°C	4,2	563,65	564,58
DBO	40°C	5,1	455,76	
DBO	40°C	5,1	458,4	
DBO	40°C	5,1	457,67	457,28
DBO	40°C	5,9	348,67	
DBO	40°C	5,9	347,24	
DBO	40°C	5,9	350,45	348,79
DBO	50°C	4,2	486,45	
DBO	50°C	4,2	484,56	
DBO	50°C	4,2	482,87	484,63
DBO	50°C	5,1	349,89	
DBO	50°C	5,1	347,58	
DBO	50°C	5,1	348,21	348,56
DBO	50°C	5,9	212,6	
DBO	50°C	5,9	216,78	
DBO	50°C	5,9	214,26	214,55
DBO	65°C	4,2	471,54	
DBO	65°C	4,2	468,6	
DBO	65°C	4,2	470,76	470,30
DBO	65°C	5,1	332,56	
DBO	65°C	5,1	336,67	
DBO	65°C	5,1	334,14	334,46
DBO	65°C	5,9	156,9	
DBO	65°C	5,9	159,9	
DBO	65°C	5,9	157,54	158,11

<b>Parámetro</b>	<b>Temperatura</b>	<b>pH</b>	<b>Valor</b>	<b>Promedio</b>
SST	40°C	4,2	300,65	
SST	40°C	4,2	305,66	
SST	40°C	4,2	302,43	302,91
SST	40°C	5,1	196,09	
SST	40°C	5,1	199,34	
SST	40°C	5,1	197,45	197,63
SST	40°C	5,9	65,6	
SST	40°C	5,9	66,45	
SST	40°C	5,9	61,21	64,42
SST	50°C	4,2	355,34	
SST	50°C	4,2	358,9	
SST	50°C	4,2	356,11	356,78
SST	50°C	5,1	230,56	
SST	50°C	5,1	232,76	
SST	50°C	5,1	234,45	232,59
SST	50°C	5,9	99,45	
SST	50°C	5,9	97,34	
SST	50°C	5,9	98,2	98,33
SST	65°C	4,2	403,67	
SST	65°C	4,2	406,33	
SST	65°C	4,2	405,26	405,09
SST	65°C	5,1	310,23	
SST	65°C	5,1	312,34	
SST	65°C	5,1	311,98	311,52
SST	65°C	5,9	108,62	
SST	65°C	5,9	108,56	
SST	65°C	5,9	110,34	109,17

## Apéndice B. Análisis estadístico

### Análisis de la varianza de la concentración de DBO con la electrocoagulación

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Concentración final de DB..	27	0.98	0.98	4.95

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	411291.36	4	102822.84	297.09	<0.0001
Parámetro 1-Electrocoagula..	0.00	0	0.00	sd	sd
Variable Temperatura	92582.29	2	46291.15	133.75	<0.0001
Variable pH	318709.07	2	159354.53	460.44	<0.0001
Error	7614.07	22	346.09		
Total	418905.43	26			

#### Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=41.92780

Error: 346.0942 gl: 22

Parámetro 1-Electrocoagula.. Medias n E.E.

DBO 375.69 27 3.66 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

#### Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=22.03035

Error: 346.0942 gl: 22

Variable Temperatura Medias n E.E.

65°C 320.96 9 6.35 A

50°C 349.24 9 6.35 B

40°C 456.88 9 6.35 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

#### Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=22.03035

Error: 346.0942 gl: 22

Variable pH Medias n E.E.

5.90 240.48 9 6.35 A

5.10 380.10 9 6.35 B

4.20 506.50 9 6.35 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Análisis de la varianza de la concentración de SST con la electrocoagulación**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Concentración final SST	27	0.98	0.98	6.77

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	351955.07	4	87988.77	360.14	<0.0001
Parámetro 2- Electrocoagul..	0.00	0	0.00	sd	sd
Variable Temperatura	34051.83	2	17025.92	69.69	<0.0001
Variable pH	317903.24	2	158951.62	650.60	<0.0001
Error	5374.95	22	244.32		
Total	357330.03	26			

**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=22.03035**

Error: 244.3161 gl: 22

Parámetro 2- Electrocoagul.. Medias n E.E.

SST	230.94	27	3.08	A
-----	--------	----	------	---

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=18.50974**

Error: 244.3161 gl: 22

Variable Temperatura Medias n E.E.

40°C	188.32	9	5.33	A
50°C	229.23	9	5.33	B
65°C	275.26	9	5.33	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=18.50974**

Error: 244.3161 gl: 22

Variable pH Medias n E.E.

5.90	90.64	9	5.33	A
5.10	247.24	9	5.33	B
4.20	354.93	9	5.33	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Apéndice C. Imágenes de la investigación.**



**Figura 16.** Sistema experimental utilizado en la investigación.



**Figura 17.** Pesado del fruto de palma.



**Figura 18.** Preparación del fruto de palma para preparación del agua residual.



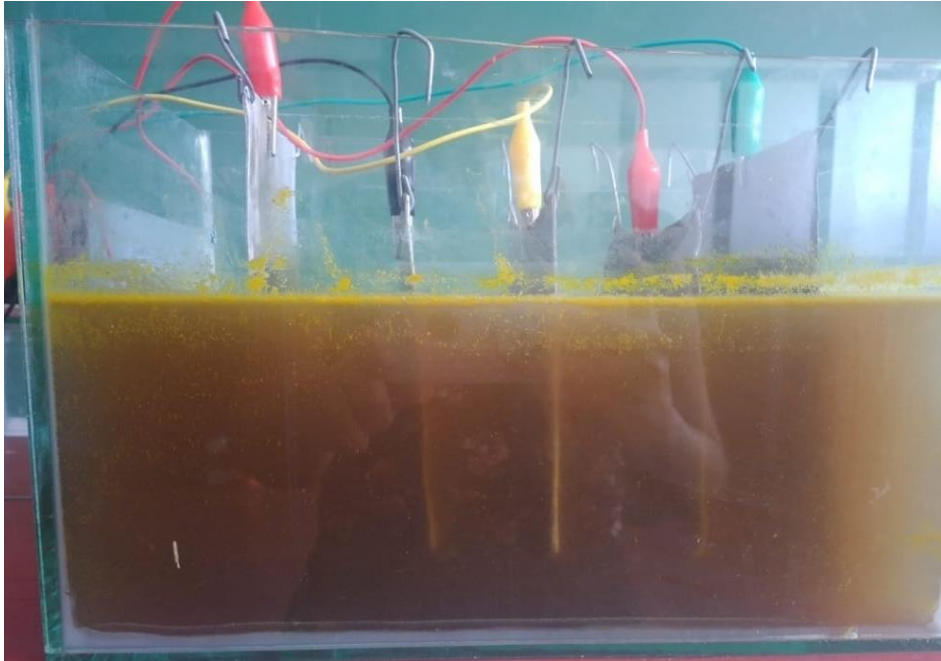
**Figura 19.** Medición de la temperatura del agua residual artificial.



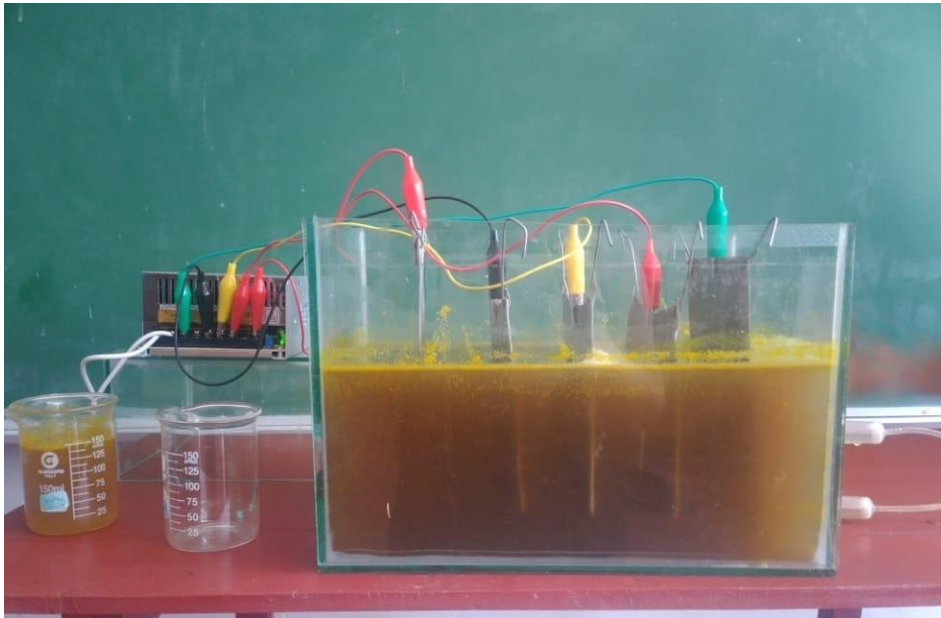
**Figura 20.** Celda de electrocoagulación lista para tratamiento.



**Figura 21.** Medición de la temperatura durante la operación de la celda de electrocoagulación.



**Figura 22.** Vista lateral del agua residual en tratamiento de electrocoagulación.



**Figura 23.** Vista completa de la celda de electrocoagulación durante el tratamiento del agua.



**Figura 24.** Medición de la variable temperatura durante los tratamientos.



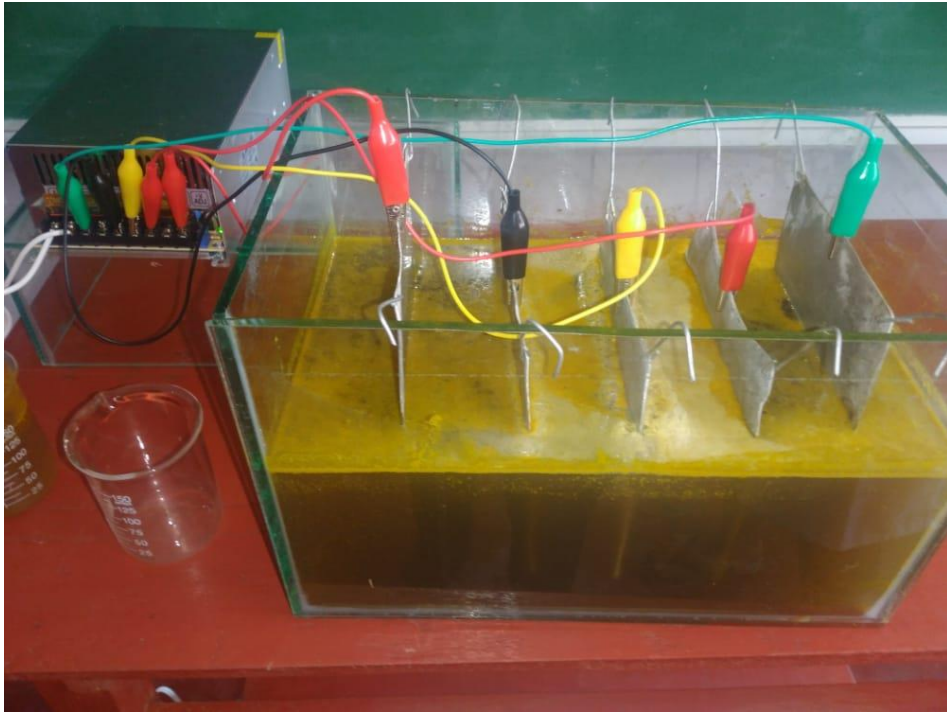
**Figura 25.** Medición de la variable pH durante la aplicación de los tratamientos.



**Figura 26.** Verificación del voltaje y continuidad en los electrodos.



**Figura 27.** Verificación del incremento espontaneo de temperatura en la celda.



**Figura 28.** Visualización de la fase aceitosa por efecto de la electrocoagulación.



**Figura 29.** Visualización de la formación de espuma mezclada con aceite del agua residual.



**Figura 30.** Visualización de la formación de espuma mezclada con aceite del agua residual.



**Figura 31.** Obtención de muestra del tratamiento de electrocoagulación.



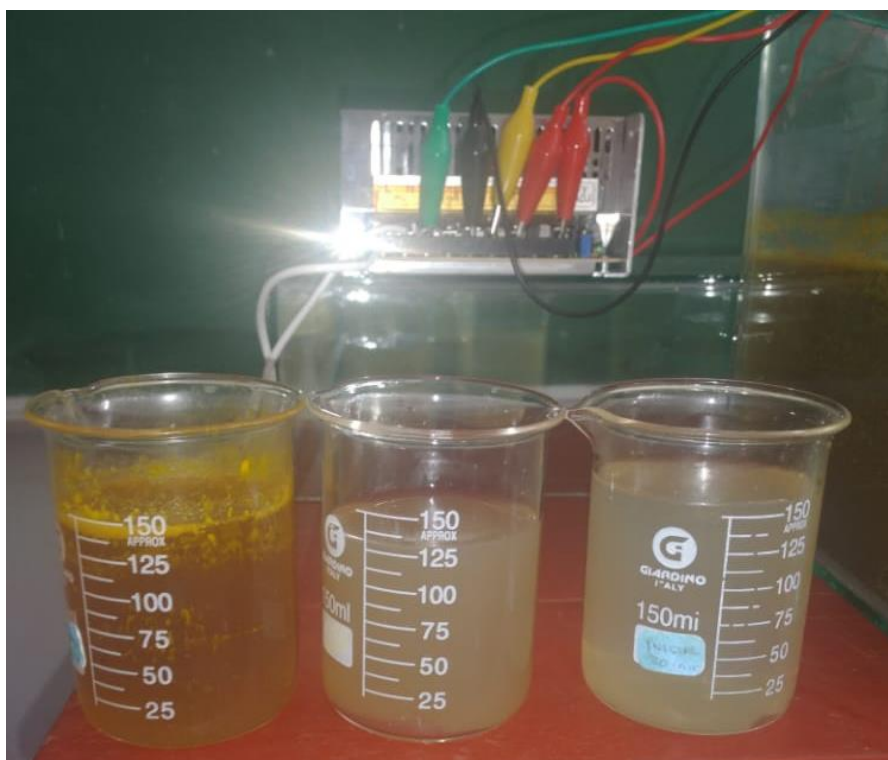
**Figura 32.** Medición del Oxígeno disuelto para determinar la DB05.



**Figura 33.** Medición del pH



**Figura 34.** Visualización del cambio de apariencia en el agua tratada.



**Figura 35.** Comparación de muestras obtenidas por efectos de variación de temperatura y pH.