

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



**EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO
PARA TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DEL MATADERO
MUNICIPAL DE TINGO MARÍA**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

ALVINO ALBORNOZ YAYDER YAYIR

Tingo María - Perú

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO PARA TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DEL MATADERO MUNICIPAL DE TINGO MARÍA

Autor	: YAYDER YAYIR ALVINO ALBORNOZ		
Asesor de Tesis	: Ing. RICARDO MARTIN CHÁVEZ ASECIO		
Programa de Investigación	: Calidad del agua.		
Línea de Investigación	: Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales.		
Lugar de Ejecución	: Laboratorio de Microbiología General y Laboratorio de Física de la UNAS.		
Duración	Fecha de Inicio	: 24 de julio de 2017	
	Término	: 22 de diciembre de 2017	
Financiamiento	:		
	FEDU	: S/. 0,00	
	Propio	: S/. 4750,00	
	Otros	: S/. 0,00	



T
AMB

Alvino Albornoz, Yayder Yayir

Eficiencia de la electrocoagulación a nivel de laboratorio para tratamiento del agua residual del matadero Municipal de Tingo María.

95 páginas; 39 cuadros; 30 figuras; 39 ref.; 30 cm.

Tesis (Ingeniero Ambiental) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Recursos Naturales Renovables

1. ELECTROCOAGULACIÓN
2. EFICIENCIA
3. NITRATOS
4. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO
5. FOSFATOS
6. SÓLIDOS TOTALES



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 03 de mayo 2019, a horas 7:00 p.m. en la Sala de Sesiones del Departamento Académico de Ciencias Ambientales de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, para calificar la Tesis titulada:

EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MATADERO MUNICIPAL DE TINGO MARÍA

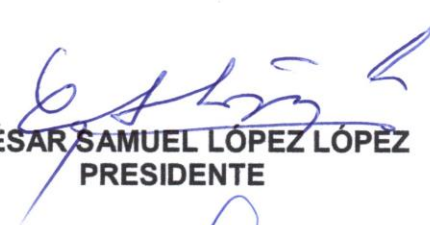
presentada por el Bachiller

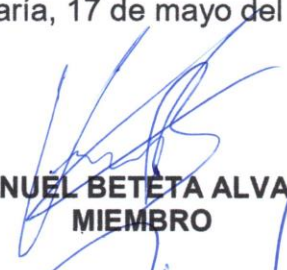
ALVINO ALBORNOZ YAYDER YAYIR

después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara a la tesis **APROBADA** con el calificativo de **MUY BUENO**

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

Tingo María, 17 de mayo del 2019


Dr. CÉSAR SAMUEL LÓPEZ LÓPEZ
PRESIDENTE


Ing. MSc. VÍCTOR MANUEL BETETA ALVARADO
MIEMBRO


Ing. MSc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
MIEMBRO


Ing. RICARDO MARTÍN CHÁVEZ ASENCIO
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi mamá Mida, quien con su amor, paciencia y esfuerzo me ha permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo.

A mi papá Manuel Cesar, por su invaluable apoyo ternura y cariño que siempre me ha ofrecido.

A mi mamita Benita, por su comprensión, cariño y amor día a día.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que compartieron sus conocimientos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme regalado el motivo de existir, la vida y guiarme en todo momento, porque cada día surgen oportunidades para probar que él es una fuente de poder con magnitudes infinitas.

A mi alma mater la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por la oportunidad de crecimiento y desenvolvimiento intelectual.

Al Ing. Ricardo Chávez Asencio, asesor del presente trabajo de investigación científica, por su aporte durante el trabajo de investigación.

A los miembros del jurado: Dr. Bctnlgo. Mtblgo. César Samuel López López, Ing. MSc. Víctor Manuel Beteta, Ing. MSc. Franklin Dionisio Montalvo, por las atenciones prestadas a lo largo de este proceso.

Al Ing. Richar Sias, por su constante y desinteresado apoyo en el tiempo que duro éste trabajo.

A mis padres, por haber sido mi empuje día a día, ayudándome a forjar mi porvenir, mi formación tanto en lo personal así como también profesionalmente.

A mi tía Beatriz y Alicia por haberme apoyado incondicionalmente.

Y por último a todos los demás amigos que de una u otra forma colaboraron en el presente estudio, a las personas que siempre confiaron en mí, por siempre gracias.

INDICE

Contenido	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	2
1.1.1. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Aguas residuales.....	3
2.1.1. Características físicas de las aguas residuales	3
2.1.2. Características químicas	6
2.1.3. Características biológicas	8
2.2. Proceso para el faenado de animales de abasto.....	8
2.2.1. Recepción y descanso	8
2.2.2. Inspección ate-mortem.....	8
2.2.3. Bañado.....	9
2.2.4. Aturdimiento	9
2.2.5. Sacrificio	9
2.2.6. Desollado	9
2.2.7. Remoción de cabeza.....	9
2.2.8. Eviscerado	10
2.2.9. Escaldado, depilado y chamuscado (cerdos)	10

2.2.10. Inspección post-mortem	10
2.2. Contaminación generada por el faenado de animales	10
2.3. Tratamiento del agua residual	11
2.4. Electrocoagulación	12
2.4.1. Celdas de electrocoagulación	14
2.4.2. Fases de la electrocoagulación	14
2.5. Mecanismos del proceso de electrocoagulación	15
2.6. Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación	17
2.7. Factores que afectan al proceso de electrocoagulación	19
2.13.1. pH	19
2.13.2. Densidad de corriente	19
2.13.3. Conductividad	20
2.13.4. Temperatura.....	21
2.13.5. Tiempo de residencia y operación.....	21
2.13.6. Material del electrodo	21
2.8. Coagulación de las proteínas	22
2.8.1. La sangre	23
2.9. Aplicaciones de la electrocoagulación	23
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
3.1. Ubicación del lugar de estudio	28
3.1.1. Ubicación política	28
3.1.2. Ubicación geográfica.....	28
3.2. Materiales y equipos	28

3.3.	Construcción y montaje de la celda de electrocoagulación a nivel de laboratorio	29
3.3.1.	Electrodos	30
3.3.2.	Fuente de poder	31
3.4.	Ensayos de laboratorio preliminares	32
3.5.	Recolección de muestra	32
3.6.	Etapa experimental	32
3.7.	Evaluación de parámetros	33
3.7.1.	Determinación de la temperatura	33
3.7.2.	Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno	33
3.7.3.	Determinación de sólidos totales	34
3.7.4.	Determinación de nitratos	35
3.7.5.	Determinación de fosfatos	35
3.8.	Eficiencia de remoción	35
3.9.	Diseño de investigación	36
3.9.1.	Variables independientes	36
3.9.2.	Variables dependientes	36
3.10.	Análisis e interpretación de datos	37
3.10.1.	Análisis de varianza (ANOVA)	37
3.10.2.	Prueba de Tukey	37
IV.	RESULTADOS	38
4.1.	Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO ₅	38
4.1.1.	ANVA para la DBO ₅	40
4.1.2.	Tukey para la DBO ₅ por efecto principal de la temperatura	41

4.1.3.	Tukey para la DBO ₅ por efecto principal de la intensidad de corriente.....	42
4.1.4.	Tukey para la DBO ₅ por efecto principal del tiempo	43
4.1.5.	ANVA para la DBO ₅ por efecto simple A en B y B en A.....	43
4.1.6.	Tukey para la DBO ₅ por efecto simple de A en B y B en A.....	44
4.1.7.	ANVA para la DBO ₅ por efecto simple A en C y C en A	45
4.1.8.	ANVA para la DBO ₅ por efecto simple de B en C y C en B	46
4.1.9.	Tukey para la DBO ₅ por efecto simple de B en C y C en B	47
4.1.10.	ANVA para la DBO ₅ por efecto simple de AxBxC.....	48
4.1.11.	Tukey para la DBO ₅ por efecto simple de AxBxC.....	49
4.2.	Eficiencia de la EC en la remoción de ST.....	50
4.2.1.	ANVA para sólidos totales.....	52
4.2.2.	Tukey para ST por efecto principal de la temperatura	53
4.2.3.	Tukey para ST por efecto principal de la intensidad de corriente.....	54
4.2.4.	Tukey para ST por efecto principal del tiempo	54
4.2.5.	ANVA para ST por efecto simple A en B y B en A.....	55
4.2.6.	Tukey para ST por efecto simple de A en B y B en A.....	56
4.2.7.	ANVA para ST por efecto simple A en C y C en A	57
4.2.8.	Tukey para ST por efecto simple de A en C y C en A.....	58
4.3.	Eficiencia de la EC en la remoción de nitratos.....	59
4.3.1.	ANVA para nitratos	61
4.3.2.	Tukey para nitratos por efecto principal de la temperatura	62

4.3.3.	Tukey para nitratos por efecto principal de la intensidad de corriente.....	62
4.3.4.	Tukey para de nitratos por efecto principal del tiempo.....	63
4.3.5.	ANVA para nitratos por efecto simple A en B y B en A.....	63
4.3.6.	Tukey para nitratos por efecto simple de A en B y B en A	65
4.4.	Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos.....	66
4.4.1.	ANVA para fosfatos.....	68
4.4.2.	Tukey para fosfatos por efecto principal de la temperatura	69
4.4.3.	Tukey para fosfatos por efecto principal de la intensidad de corriente.....	69
4.4.4.	Tukey para fosfatos por efecto del tiempo.....	70
4.4.5.	ANVA para fosfatos por efecto simple A en B y B en A.....	70
4.4.6.	Tukey para fosfatos por efecto simple de A en B y B en A	71
V.	DISCUSIÓN	73
VI.	CONCLUSIONES.....	79
VII.	RECOMENDACIONES	80
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
IX.	ANEXOS	87

INDICE DE CUADROS

Cuadro	página
1. Caracterización del agua residual de un matadero.	11
2. Procesos y operaciones unitarias según la etapa de tratamiento.	12
3. Características de la celda de electrocoagulación.....	31
4. Sistema experimental de estímulo creciente	36
5. ANVA para la DBO ₅	41
6. Prueba Tukey para la DBO ₅ por efecto principal de la temperatura	42
7. Prueba Tukey para la DBO ₅ por efecto principal de la intensidad de corriente	42
8. Prueba Tukey para la DBO ₅ por efecto principal del tiempo	43
9. ANVA para la DBO ₅ por efecto simple A en B y B en A.....	43
10. Prueba Tukey para la DBO ₅ por efecto simple de A en B y B en A	44
11. ANVA para la DBO ₅ por efecto simple A en C y C en A	46
12. ANVA para la DBO ₅ por efecto simple de B en C y C en B	47
13. Prueba Tukey para la DBO ₅ por efecto simple de B en C y C en B	48
14. ANVA para la DBO ₅ por efecto simple de AxBxC.....	49
15. Prueba Tukey para la DBO ₅ por efecto simple de AxBxC	49
16. ANVA para sólidos totales	53
17. Prueba Tukey para ST por efecto principal de la temperatura.....	54

18. Prueba Tukey para ST por efecto principal de la intensidad de corriente. ..	54
19. Prueba Tukey para ST por efecto principal del tiempo.	55
20. ANVA para ST por efecto simple A en B y B en A.....	55
21. Prueba Tukey para ST por efecto simple de A en B y B en A	56
22. ANVA para ST por efecto simple A en C y C en A	57
23. Prueba Tukey para ST por efecto simple de A en C y C en A	58
24. ANVA para nitratos.	61
25. Prueba Tukey para nitratos por efecto principal de la temperatura	62
26. Prueba Tukey para nitratos por efecto principal de la intensidad de corriente.	63
27. Prueba Tukey para de nitratos por efecto principal del tiempo.	63
28. ANVA para nitratos por efecto simple A en B y B en A.....	64
29. Prueba Tukey para nitratos por efecto simple de A en B y B en A	65
30. ANVA para fosfatos.	68
31. Prueba Tukey para fosfatos por efecto principal de la temperatura	69
32. Prueba Tukey para fosfatos por efecto principal de la intensidad de corriente.	70
33. Prueba Tukey para fosfatos por efecto principal del tiempo.	70
34. ANVA para fosfatos por efecto simple A en B y B en A.....	71
35. Prueba Tukey para fosfatos por efecto simple de A en B y B en A	72
36. Eficiencia de remoción de la DBO_5 (%).	88
37. Eficiencia de remoción de ST (%)	88
38. Eficiencia de la remoción de nitratos (%).	89
39. Eficiencia de la remoción de fosfatos (%).	89

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Sistema de electrocoagulación con ánodo y cátodo.....	15
2. Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO ₅ a 25 °C.	38
3. Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO ₅ a 45 °C.	39
4. Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO ₅ a 60 °C.	39
5. Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO ₅ a 75 °C.	40
6. Eficiencia de la EC en la remoción de ST a 25 °C.....	50
7. Eficiencia de la EC en la remoción de ST a 45 °C.....	51
8. Eficiencia de la EC en la remoción de ST a 60 °C.....	51
9. Eficiencia de la EC en la remoción de ST a 75 °C.....	52
10. Eficiencia de la EC en la remoción de nitratos a 25 °C.	59
11. Eficiencia de la EC remoción de nitratos a 45 °C.	59
12. Eficiencia de la EC en la remoción de nitratos a 60 °C.	60
13. Eficiencia de la EC en la remoción de nitratos a 75 °C.	60
14. Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos a 25 °C.....	66
15. Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos a 45 °C.....	66
16. Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos a 60 °C.....	67
17. Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos a 75°C.....	67
18. Resultados de análisis especial de nitratos y fosfatos.....	88

19. Resultados de análisis especial de nitratos y fosfatos.....	89
20. Fuente de energía de 0-18V y 0-5A en el laboratorio de física.....	90
21. Montaje de la celda de electrocoagulación en el laboratorio de física.	90
22. Pruebas preliminares con agua de grifo.....	91
23. Recolección de agua residual de matadero municipal de Tingo María.	91
24. Calentamiento previo.	92
25. Etapa experimental a 75 °C de calentamiento previo, 5A y 0 min.	92
26. Etapa experimental a 75 °C de calentamiento previo, 5A y 5 min.	93
27. Etapa experimental a 75 °C de calentamiento previo, 5A y 10 min.	93
28. Etapa experimental a 75 °C de calentamiento previo, 5A y 15 min.	94
29. Toma de muestras para determinar la DBO ₅ , ST, nitratos y fosfatos.	94
30. Midiendo la cantidad de oxígeno disuelto de las muestras.....	95

RESUMEN

La ciudad de Tingo María, al igual que otras ciudades del Perú presenta un crecimiento demográfico alto, no existe una política de ordenamiento territorial y la contaminación del río Huallaga es uno de los problemas ambientales principales, en tal sentido el presente trabajo tuvo como objetivo, determinar la eficiencia de la electrocoagulación a nivel de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales del matadero municipal de Tingo María; analizando la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólidos totales, nitratos y fosfatos, bajo las variables independientes de temperatura, intensidad de corriente y tiempo. La investigación realizada, consistió en la aplicación del método de electrocoagulación con electrodos de sacrificio de aluminio. La etapa experimental se desarrolló en el laboratorio de física, el análisis de parámetros se realizó en el laboratorio de microbiología y en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

La aplicación del método de electrocoagulación a las aguas en estudio permitió la remoción de la DBO_5 , sólidos totales, nitratos y fosfatos. Al usar $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo, logra una eficiencia en la remoción de la DBO_5 en un 96.28%, sólidos totales en un 97.8%, nitratos en un 70.2% y fosfatos en un 63.2%.

Palabras claves: Electrocoagulación, Eficiencia, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Totales, Nitratos, Fosfatos.

ABSTRACT

The city of Tingo Maria, just like in other cities within Peru, presents a quickly growing demographic, no policy exists regarding planning for land use and the contamination of the Huallaga river is one of the principal environmental problems, due to this, the present work had the objective of determining the efficiency of electrocoagulation, at a laboratory level, in the treatment of waste water from the municipal slaughter house in Tingo Maria; analyzing the removal of the biochemical oxygen demand (DBO_5), total solids, nitrates and phosphates, under the independent variables of temperature, current intensity and time. The research that was done consisted in the application of the electrocoagulation method using electrodes made from aluminum. The experimental stage took place in the physics laboratory, the analysis of the parameters was done in the microbiology laboratory and the soils laboratory at the Universidad Nacional Agraria de la Selva.

The application of the electrocoagulation method to the water in study allowed for the removal of the DBO_5 , total solids, nitrates and phosphates. By using a temperature of 75° , at current intensity of 5 A and a time of 15 min, a removal efficiency is reached for the DBO_5 at 96.28%, total solids at 97.8%, nitrates at 70.2% and phosphates at 63.2%.

Keywords: Electrocoagulation, Efficiency, Biochemical Oxygen Demand, Total Solids, Nitrates, Phosphates

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los desafíos mayores que enfrenta hoy la humanidad es proporcionar agua limpia a una inmensa mayoría de la población mundial. El agua es fundamental para todas las formas de vida, lo que la convierte en uno de los recursos esenciales de la naturaleza. Por ello hay una necesidad urgente de desarrollar técnicas innovadoras, más eficaces y económicas para el tratamiento de aguas residuales.

La electrocoagulación surge como una alternativa interesante para el tratamiento de efluentes de todo tipo, son muchas las ventajas de esta técnica, entre las más resaltantes se menciona que requieren de equipos simples y de fácil operación, elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos, alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.

Las aguas residuales del Matadero Municipal de Tingo María, constituyen uno de los problemas ambientales principales de la provincia, porque son vertidos sin ningún tipo de tratamiento al río Huallaga, acarreando consecuencias negativas como riesgo de enfermedades y la disminución de la capacidad de autodepuración del agua debido a su alto valor en contenido de carga orgánica e inorgánica; esto ha motivado a investigar la electrocoagulación y aplicarla para el tratamiento de las aguas residuales del Matadero Municipal de Tingo María con la finalidad de reducir la carga de contaminantes.

Esta investigación tiene por interrogante, ¿Cuál es la eficiencia de la electrocoagulación a nivel de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales del Matadero Municipal de Tingo María?

Como hipótesis se planteó, una eficiencia de remoción de la DBO₅, ST, nitratos y fosfatos de las aguas residuales del Matadero Municipal de Tingo María es superior al 85%, 85%, 50% y 50% respectivamente, mediante la electrocoagulación a nivel de laboratorio.

1.1. Objetivo general

Determinar la eficiencia de la electrocoagulación a nivel de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales del matadero municipal de Tingo María.

1.1.1. Objetivos específicos

- Evaluar la eficiencia de remoción de la DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno) por efecto de la temperatura, intensidad de corriente y tiempo.
- Evaluar la eficiencia de remoción de sólidos totales (ST) por efecto de la temperatura, intensidad de corriente y tiempo.
- Evaluar la eficiencia de remoción de nitratos por efecto de la temperatura, intensidad de corriente y tiempo.
- Evaluar la eficiencia de remoción de fosfatos por efecto de la temperatura, intensidad de corriente y tiempo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Aguas residuales

El agua residual o servida es una combinación de los líquidos y residuos arrastrados por el agua proveniente de casas, edificios comerciales, fábricas e instituciones combinada con cualquier agua subterránea, superficial o pluvial que pueda estar presente (MIRANDA, 2006).

Según MARA (1976), las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias.

Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua que proviene de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual (MIRANDA, 2006).

2.1.1. Características físicas de las aguas residuales

Según METCALF y EDDY (1996), la característica física más importante del agua residual es el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la

materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad.

2.1.1.1. Olor

Normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor algo desagradable, que resulta más tolerable que el del agua residual séptica. La problemática de los olores está considerada como la principal causa de rechazo a la implantación de instalaciones de tratamiento de aguas residuales (OROZCO, 2005).

2.1.1.2. Temperatura

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, hecho principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales (OROZCO, 2005).

2.1.1.3. Color

Según ARBOLEDA (1992), El agua residual suele tener un color grisáceo. Sin embargo, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaerobias, el color del agua residual cambia gradualmente de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro, cuando llega a este punto, suele clasificarse el agua residual como séptica.

2.1.1.4. Turbidez

La turbidez, como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La materia coloidal dispersa absorbe la luz, impidiendo su transmisión (OROZCO, 2005).

2.1.1.5. Sólidos totales

Analíticamente, se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación de entre 103° y 105 °C (COLLAZOS, 2008).

2.1.1.6. Densidad

Es una característica física importante del agua residual dado que de ella depende la potencial formación de corrientes de densidad en fangos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento. La densidad de las aguas residuales domésticas que no contengan grandes cantidades de residuos industriales es prácticamente la misma que la del agua a la misma temperatura (COLLAZOS, 2008)

2.1.1.7. Conductividad

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad, por lo tanto es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua, proviene de un ácido, una base o una sal disociada en iones (ARBOLEDA y HERRERA, 2015).

2.1.2. Características químicas

2.1.2.1. Potencial de Hidrogenión (pH)

Según MORENO (1997), el pH en un efluente doméstico alcanza un valor aproximado de 7 y 8. Cuando es más bajo indica la existencia de volcamientos ácidos y si es alto, estos son alcalinos y ambos provienen de comercios o industrias.

2.1.2.2. Demanda bioquímica de oxígeno

Según RAMALHO (1996), es el oxígeno consumido por microorganismos y/o contaminantes que se oxiden en un intervalo de tiempo (lo común es 5 días) a temperatura controlada (la más habitual es 20°). Esta técnica consiste esencialmente en la medición del oxígeno consumido por microorganismos (generalmente -bacterias) durante la utilización de la materia orgánica presente en la muestra, realizada en condiciones lo más parecidas a las que ocurren en la naturaleza. La técnica de DBO₅ es ampliamente utilizada en el análisis de efluentes domésticos e industriales, para determinar la cantidad de materia orgánica biodegradable que contiene la muestra en estudio.

2.1.2.3. Oxígeno disuelto

Según RAMALHO (1996), La presencia oxígeno disuelto en el agua es indispensable para la vida de peces y otros seres acuáticos, el problema es la baja solubilidad de este gas en el agua, además la cantidad de oxígeno en el agua depende de las condiciones ambientales, ya que su cantidad aumenta al disminuir la temperatura o aumentar la presión.

2.1.2.4. Demanda química de oxígeno

Según OROZCO (2005), La Demanda Química de Oxígeno, DQO, es la cantidad de oxígeno en mg/l consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua.

2.1.2.5. Nitratos

Según BARRENECHEA (2004), el nitrógeno es un nutriente importante para el desarrollo de los animales y las plantas acuáticas. Por lo general, en el agua se encuentra formando amoníaco, nitratos y nitritos. Si un recurso hídrico recibe descargas de aguas residuales domésticas o ganaderas, el nitrógeno estará presente como nitrógeno orgánico amoniacal, el cual, en contacto con el oxígeno disuelto, se irá transformando por oxidación en nitritos y nitratos. Este proceso de nitrificación depende de la temperatura, del contenido de oxígeno disuelto y del pH del agua. En general, los nitratos (sales del ácido nítrico, HNO_3) son muy solubles en agua debido a la polaridad del ion.

Según COLLADO (1993), La concentración de nitratos en efluentes de aguas residuales puede variar entre 0 y 20 mg/l en forma de nitrógeno (N), con valores típicos entre 15 y 20 mg/l. El contenido de nitratos en aguas de consumo público no debe exceder, según los estándares internos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA, de 10 mg/L.

2.1.2.6. Fosfatos

Según BARAJAS (2002), es importante en el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Debido al nocivo crecimiento incontrolado de algas en aguas superficiales, se han realizado grandes esfuerzos para

controlar la cantidad de compuestos del fósforo provenientes de descargas de aguas residuales domésticas y de escorrentía natural. Las aguas residuales municipales, pueden contener entre 4 y 12 mg/l de fósforo expresado como compuestos fosforados.

2.1.3. Características biológicas

En el tratamiento biológico se deben de tomar en cuenta las siguientes características del agua residual: principales grupos de microorganismos presentes, tanto en aguas superficiales como en residuales, así como aquellos que intervienen en los tratamientos biológicos; organismos patógenos presentes en las aguas residuales; organismos utilizados como indicadores de contaminación y su importancia (CORTADA, 2003).

2.2. Proceso para el faenado de animales de abasto

2.2.1. Recepción y descanso

Luego del arribo de los animales al matadero, estos pasan a los corrales de descanso por lo menos 12 horas de antelación a su sacrificio (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2.2. Inspección ate-mortem

La verificación sanitaria previa al sacrificio asegura que en la producción de carne para consumo humano sólo se acepten animales aparente o clínicamente sanos (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2.3. Bañado

La importancia sanitaria del bañado de los animales antes del sacrificio radica, principalmente, en la eliminación o reacción de la suciedad presente en el cuero de los mismos (restos de excremento, orina, alimento, secreciones, ectoparásitos, etc.) que evita que, al momento del sacrificio, haya una contaminación excesiva tanto de las instalaciones como de los canales o de la sangre para consumo humano o industrial (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2.4. Aturdimiento

Lugar donde se insensibiliza a los animales para permitir un adecuado beneficio (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2.5. Sacrificio

Tras aturdir al animal se procede al sacrificio mediante un corte contundente (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2.6. Desollado

En esta etapa se separan las patas y se procede al desollado, retirar la piel o cuero de las carcasas (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2.7. Remoción de cabeza

Se remueven las cabezas de los ganados; en los cerdos, la cabeza no debe ser removida hasta que la canal haya sido verificada para la detección de cisticercos. La cabeza debe ser limpiada y lavada para su verificación (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2.8. Eviscerado

Consiste en la higienización de las vísceras. La evisceración se realiza inmediatamente después del desollado (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2.9. Escaldado, depilado y chamuscado (cerdos)

Con el objetivo es ablandar la piel para facilitar el depilado, los animales son introducidos 5 minutos aproximadamente en un tanque de escaldado con agua, a una temperatura de 60 °C.

En los mataderos municipales el agua para el escaldado se encuentra siempre en ebullición (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2.10. Inspección post-mortem

La inspección de carnes es integral, abarcando todos los aspectos higiénico-sanitario de los productos cárnicos y sus derivados, desde la producción hasta su comercialización (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.2. Contaminación generada por el faenado de animales

La contaminación en los procesos de faenado generalmente es por agua residual. Los efluentes contienen sangre, excremento, contenido estomacal, grasa, plumas y huesos. Estas aguas residuales, vertidas directamente en los cuerpos de agua, generan un ambiente propicio para el desarrollo de vectores capaces de incubar y multiplicar en su cuerpo microorganismos que, posteriormente, podrían ser la causa de enfermedades en el ser humano (SIGNORINI *et al.*, 2006).

La cantidad de contaminantes que una planta de sacrificio o matadero produce, depende del tipo y cantidad de especies faenadas, así como de los residuos que se desechen y el tipo de tecnología empleada, entre otros factores (SIGNORINI *et al.*, 2006). Las aguas residuales de un matadero se pueden caracterizar de manera general por especie de acuerdo al siguiente cuadro.

Cuadro 1. Caracterización del agua residual de un matadero.

Parámetro (unidad)	Especies Faenadas		
	porcinos	bovinos	aves
DBO ₅ (mg/l)	1250	2000	1550
DQO (mg/l)	2500	4000	2500
Sólidos suspendidos (mg/l)	700	1600	ND
Nitrógeno total (mg/l)	150	180	150-400
Fósforo total (mg/l)	25	27	16-50
Grasa (mg/L)	150	270	ND
pH.	7.2	7.2	ND

Fuente: COWI Y UNEP, 2000

2.3. Tratamiento del agua residual

Los procesos y operaciones unitarias se combinan y complementan para dar lugar a diversos niveles de tratamiento de las aguas. Históricamente, los términos “pretratamiento” y, o “primario” se referían a las operaciones físicas unitarias; el término “secundario” se refería a los procesos químicos o biológicos unitarios, y se conocía con el nombre de “tratamiento terciario” o “avanzado”, a las combinaciones de los tres. No obstante, estos términos son arbitrarios y, en muchos casos, carecen de valor alguno. Un enfoque más racional consiste, en primera instancia, en establecer el nivel de eliminación de contaminantes

(tratamiento) necesario antes reutilizar o verter las aguas residuales al medio ambiente. A partir de este momento, basándose en consideraciones fundamentales, es posible agrupar las diferentes operaciones y procesos unitarios necesarios para el nivel de tratamiento adecuado; a continuación haremos una explicación de cada uno de ellos (METCALF y EDDY, 1996).

Cuadro 2. Procesos y operaciones unitarias según la etapa de tratamiento.

Tipo de tratamiento	Operaciones o procesos unitarios
Preliminares	Dilaceración, desbaste, filtración, flotación, remoción por gravedad, tanque Imhoff, filtración por membrana, remoción de grasas y aceites, tamizado grueso y fino y micro tamizado.
Primarios	Tamizado, sedimentación primaria
Secundarios	Lodos activados, reactores de lecho fijo, sistemas de lagunaje, sedimentación secundaria, deshidratación.
Terciarios	Coagulación química, floculación, sedimentación seguida de filtración y carbón activado. Intercambio iónico, osmosis inversa, electrocoagulación.

Fuente: METCALF y EDDY (1996).

2.4. Electrocoagulación

Es un proceso electroquímico muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales, por medio del cual se desestabilizan las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, en los que el hierro y el aluminio son los más utilizados (ARANGO, 2005).

El reactor electroquímico se compone de un depósito en el que se han sumergido dos electrodos el ánodo o electrodo de sacrificio y el cátodo o electrodo inerte, conectados a una fuente de alimentación (MARTINEZ, 2007).

El agua sometida a una electrolisis se ve favorecida por la presencia de sales en dilución, que posibilitan la conducción de electricidad y que están presentes en todas las aguas residuales e industriales (CHAVEZ *et al.*, 2009).

RAMIREZ (2013), Afirma que en un proceso de electrocoagulación se produce un desprendimiento de hidrogeno y oxigeno gaseoso en sus respectivos electrodos, estos gases al ascender a la superficie provocan tres fenómenos:

- Separación rápida de coloides, que evita que el electrodo se ensucie.
- Arrastre de sólidos desestabilizados a la superficie, los cuales forman una nata que posibilita una extracción por sedimentación clásica o por flotación.
- Debido a las microburbujas de gas se produce corrientes ascendentes y descendentes de la solución que ocasionan una mejor superficie de contacto y provocan un aumento en la eficiencia de desestabilización.

Estas micro burbujas, que obviamente son inicialmente moléculas, se adhieren a las minúsculas partículas contaminantes presentes en la solución, provocando un proceso de flotación que transporta a la superficie, en forma de espuma compacta, a todas las sustancias contaminantes, que por su densidad, o por sus reducidas dimensiones son difíciles de precipitar y permanecen en suspensión (JARAMILLO, 2012).

Los sólidos en suspensión que se producen logran alcanzar la densidad adecuada para su floculación. La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, que acaba en el depósito de las materias en suspensión (RAMALHO, 1996).

2.4.1. Celdas de electrocoagulación

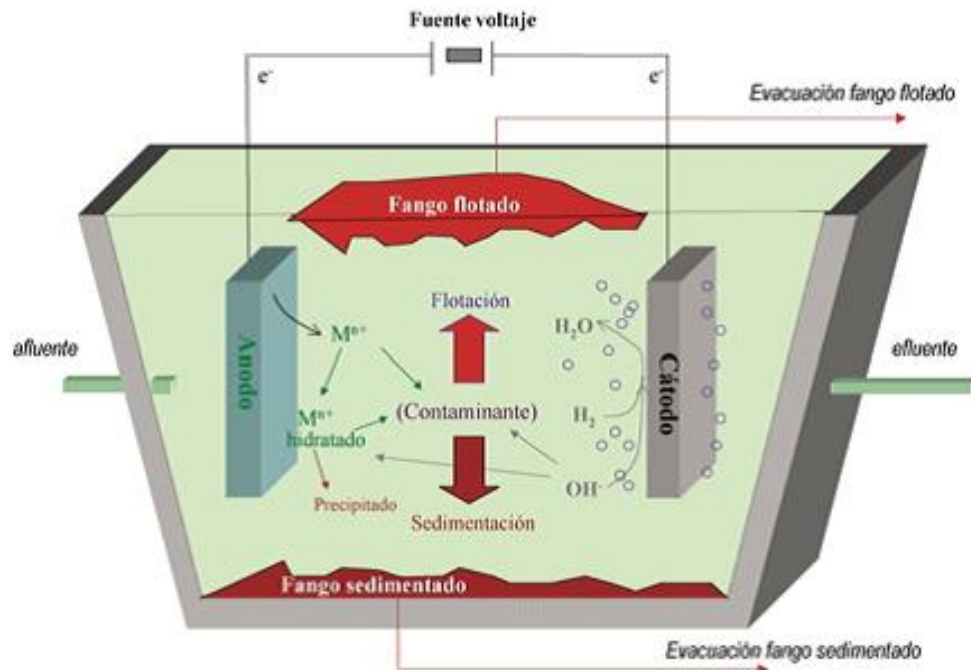
Un reactor o celda de electrocoagulación en su forma más simple tiene un ánodo y un cátodo, los cuales están conectados a una fuente de poder externa. Cuando el potencial aplicado, el material del ánodo es oxidado, mientras el material del cátodo es reducido (GILPAVAS *et al.*, 2008).

2.4.2. Fases de la electrocoagulación

MARTINEZ (2007), presenta las siguientes fases:

- **Fase de coagulación:** consiste en la formación de partículas suspendidas de mayor tamaño a partir de las micropartículas desestabilizadas.
- **Fase de floculación:** consiste en el fenómeno de adsorción de pequeños flóculos presentes dentro de la solución, formando en la fase de coagulación. Esta fase da lugar a la formación de partículas de mayor tamaño.
- **Fase de flotación/sedimentación:** los gases liberados en el cátodo y en el ánodo (oxígeno e hidrógeno respectivamente) promueven la aglomeración y migración a la superficie de los flóculos de baja densidad.

Al mismo tiempo se favorece la sedimentación de los floculos de mayor peso y tamaño (MARTINEZ, 2017).



Fuente: RESTREPO *et al.* (2006)

Figura 1. Sistema de electrocoagulación con ánodo y cátodo.

2.5. Mecanismos del proceso de electrocoagulación

En la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que permiten la remoción de los contaminantes. Estos procesos se pueden describir de la siguiente manera: En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos. A este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse (RESTREPO *et al.*, 2006).

Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado los sistemas que mantienen las partículas en

suspensión desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los contaminantes e iniciando así el proceso de coagulación (RESTREPO *et al.*, 2006).

Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de contaminantes que se puede dar por dos vías: la primera por reacciones químicas y precipitación y la segunda procesos físicos de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar (RESTREPO *et al.*, 2006).

Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres. Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua-contaminantes, que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua (MOLLAH *et al.*, 2001).

De acuerdo con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado por estequiometría con la cantidad de electricidad puesta en el sistema. (RAJESHWAR, 1997).

A diferencia de la coagulación química, proceso en el cual el coagulante es adicionado al sistema como agente químico, en la electrocoagulación el coagulante es formado *in situ* mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio. Como se explicó anteriormente, la producción de iones metálicos se da en el

ánodo y son los iones que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que hace las veces de coagulante (RESTREPO *et al.*, 2006).

Se considera que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y, finalmente, se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante (MOLLAH *et al.*, 2001).

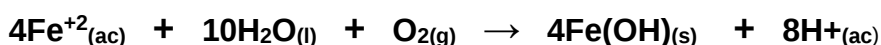
2.6. Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación

El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad. Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante (MOLLAH *et al.*, 2001).

Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso Fe(OH)_2 o hidróxido férrico Fe(OH)_3 (MOLLAH *et al.*, 2001).

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

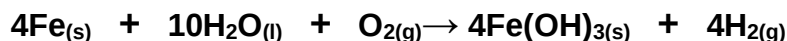
- En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



- En el cátodo:

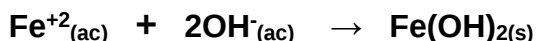


Reacción global:

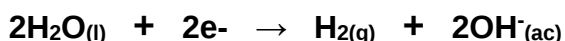


Mecanismo 2: Formación del hidróxido ferroso

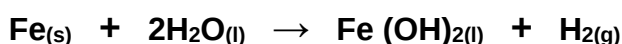
- En el ánodo se dan las reacciones:



- En el cátodo:



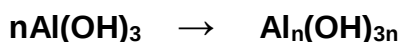
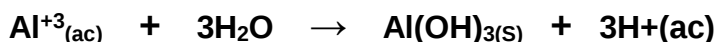
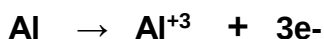
Reacción global:



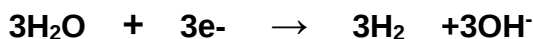
Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas (MOLLAH *et al.*, 2001).

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes.

- En el ánodo se dan las reacciones:



- En el cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^{-} reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $\text{Al}(\text{OH})_2^{+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^{+}$, y otras poliméricas, tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_{20}(\text{OH})_{24}^{7+}$ y

$\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $\text{Al}(\text{OH})_3$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $\text{Al}(\text{OH})_3$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (MOLLAH *et al.*, 2001).

2.7. Factores que afectan al proceso de electrocoagulación

Según RESTREPO *et al.* (2006), son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso.

2.13.1. pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación, y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.13.2. Densidad de corriente

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del

medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso (RESTREPO *et al.*, 2006).

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos (RESTREPO *et al.*, 2006).

El aumento de la intensidad corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura (RESTREPO *et al.*, 2006).

CHEN (2004), recomienda el empleo de densidades de corriente inferiores a $20\text{-}25\text{ A/m}^2$ para el buen funcionamiento del proceso de electrocoagulación; altas densidades de corriente, aumenta el tamaño de las burbujas producidas en los electrodos, lo que genera una alteración en el proceso de remoción de sólidos por flotación.

2.13.3. Conductividad

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.13.4. Temperatura

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima para luego decrecer (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.13.5. Tiempo de residencia y operación

Algunos autores indican que el tiempo de residencia determina que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos (PRIETO *et al.*, 2012).

2.13.6. Material del electrodo

En la electrocoagulación con ánodos de sacrificio, la selección del material del electrodo va depender de la naturaleza y afinidad que tenga el contaminante que se pretende remover con el coagulante producido, es decir, si se quiere remover material suspendido, el coagulante debe propiciar una desestabilización de los coloides para que éstos se aglutinen y posteriormente sean separados por precipitación. En el caso de elementos disueltos se busca que el coagulante los absorba o los retenga mediante algún mecanismo fisicoquímico. Cuando se trata de electrodos inertes como el acero inoxidable, el

titanio, platino, níquel, grafito, etc., el mecanismo de remoción es debido a que se presenta una deducción electroquímica del agua en el cátodo incrementándose el pH propiciando la formación de sales básicas poco solubles e hidróxidos de metales polivalentes que precipitan, es oportuno mencionar, que la superficie de las placas de los electrodos empleados en la electrocoagulación, se deben lavar regularmente dado que, si se forman capas de óxido, los electrodos se pueden pasivar, disminuyendo la eficiencia del tratamiento (ARBOLEDA y HERRERA, 2015).

2.8. Coagulación de las proteínas

Las proteínas, debido al gran tamaño de sus moléculas, forman con el agua soluciones coloidales. Estas soluciones pueden precipitar con formación de coágulos al ser calentadas a temperaturas superiores a los 70 °C o al ser tratadas con soluciones salinas, ácidos, alcohol, etc. La coagulación de las proteínas es un proceso irreversible y se debe a su desnaturalización por los agentes indicados, que al actuar sobre la proteína la desordenan por la destrucción de su estructura terciaria y cuaternaria (FARRERAS, 1992).

Cuando la temperatura es elevada aumenta la energía cinética de las moléculas con lo que se desorganiza la envoltura acuosa de las proteínas, y se desnaturalizan. Asimismo, un aumento de la temperatura destruye las interacciones débiles y desorganiza la estructura de la proteína, de forma que el interior hidrofóbico interacciona con el medio acuoso y se produce la agregación y precipitación de la proteína desnaturalizada (FARRERAS, 1992).

2.8.1. La sangre

La sangre es un líquido viscoso consistente en una suspensión de elementos (leucocitos, hematíes y plaquetas) en un medio coloidal (plasma). La sangre es opaca debido al gran número de células presentes y de color rojo a causa de la hemoglobina que portan los eritrocitos (FARRERAS, 1992).

La proporción de los principales componentes sanguíneos son: sólidos totales 18-20 %, proteína 13-15 %, grasa <1 %, carbohidratos <1 %, sales 2% y agua 80-82 % (OCKERMAN, 1994).

2.9. Aplicaciones de la electrocoagulación

Se ha aplicado la electrocoagulación para la remoción de diversas aguas residuales. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis (electro-flotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante. Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas (AGUILAR, 2015).

ARANGO y GARCES (2007), Diseñaron una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, utilizaron electrodos de hierro y aluminio con 2 cm de distancia entre estos, a 20 min de operación con pH = 7.5 y densidad de corriente = 43.23 A/m² obtuvo 46.36% de remoción de DQO con electrodo de aluminio y 52.40% con electrodo de hierro. Más tarde, JARAMILLO (2012) diseño y construyó un reactor de electrocoagulación para el estudio del tratamiento del agua residual de tintura y acabado textil, logrando remociones de: 19.1% en sólidos suspendidos, 39.4% en DQO y 64.8% en DBO₅; en ensayos tipo batch, en un tiempo de 3 min y a una intensidad de corriente de 3 A.

BARBOZA (2011), en su investigación titulada “Reducción de la carga contaminante de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá, Ayacucho, empleando la electrocoagulación”. Evaluó la reducción de turbidez, coliformes, dureza y DBO_5 . Durante la aplicación de 25 minutos de electrocoagulación a las muestras de agua, utilizando electrodos de aluminio y acero inoxidable, con densidad de corriente de 125 A/m^2 y 21-23V, con pH de 7.33 – 7.34 permitió obtener 94.65% de remoción de turbidez, 65.1% de remoción de coliformes fecales y 64.8% de disminución de DBO_5 y a 45 min de tratamiento logro disminuir hasta 89.5% de DBO_5 y 93% de coliformes fecales.

DAVILA *et al.* (2009), en su investigación denominada: “reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico total y sólidos totales en vinazas mediante electro-flotación/oxidación”, evaluaron diversos tipos de electrodos (hierro, aluminio y acero galvanizado) adicionando NaCl y/o H_2O_2 . Concluyeron que el material utilizado influye en la eficiencia del proceso, puesto que implica el desarrollo de diferentes procesos como flotación, coagulación y oxidación. El acero galvanizado y 400 A/m^2 presentó el mejor desempeño 59% remoción de sólidos totales a pH inicial 10.5 y concentración $\text{H}_2\text{O}_2 = 60 \text{ ppm}$.

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, estas aguas se caracterizan por altos contenidos de DBO y DQO además de altos porcentajes de grasas. Una investigación realizada con las aguas residuales de los restaurantes de Hong Kong, las cuales fueron tratadas por electrocoagulación y electroflotación, mostró remociones de 99 y 88 % en grasas y DQO respectivamente. (Wiblbett, 2000; citado por PRIETO *et al.*, 2012).

La electrocoagulación también ha sido probado en el tratamiento de aguas residuales de bodegas altamente contaminadas, al trabajar con electrodos de aluminio, 2.5 A y con tiempos de operación de 10 a 40 minutos, se demostró que a mayores periodos de tratamiento existe mejor eficiencia en la remoción de contaminantes, a 10 minutos se produjo entre 16.4 – 27.9% de reducción de DBO_5 y los 40 minutos se obtuvo 52.4%, al utilizar plantas acuáticas como tratamiento combinado después electrocoagulación, lograron 89.2% de reducción fosforo total (KIRZHNER *et al.*, 2012).

SARALA (2012), en la india, trató las aguas residuales domesticas de la ciudad de Hyderabad con la electrocoagulación, mediante electrodos de hierro, a diferentes intervalos de tiempo (5, 10, 15 y 20 minutos) e intensidad de corriente (0.12A, 0.25A, 0.36A). Determinaron que la máxima eficiencia (90%) para reducir DQO, sólidos totales fue con 0.25A y 0.36A a 20 minutos de tratamiento.

Otras posibles aplicaciones de la electrocoagulación están dadas en la remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos. Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas domesticas (Koparal *et al.*, citado por PRIETO *et al.*, 2012).

CABRERA (2017), Evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes de las aguas residuales porcinas mediante el uso de coagulantes y consorcios microbianos en la granja porcina, obteniendo resultados de remoción de turbidez 56.79%, coliformes totales 95.4%, nitratos 68.6%, DBO_5 67.92% y ST 58.8%.

RICCIO (2015), en su trabajo de investigación “Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector Agua de las Vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico”, utiliza electrodos de aluminio y fierro con una separación de 1 cm, una densidad de corriente de 32.72 A/m² y un tiempo de tratamiento de 20 minutos, obteniendo a estas condiciones los mayores porcentajes de remoción los cuales fueron: 86.33% de DBO₅, 78.89% de DQO, 92.94% de turbiedad, 96.32% de aceites y grasas, 50.44% de conductividad eléctrica, 52.91% de sólidos totales, 88.62% de sólidos suspendidos, 86,65% de dureza total, 83.04% de dureza cálcica, 99.92% de coliformes totales y 99.98% de *Escherichia Coli*.

CAMARGO (2015), en su investigación “Remoción de fósforo del lactosuero ácido residual mediante el proceso de electrocoagulación a nivel de laboratorio, distrito de Yanacancha – Junín”, en función del tiempo y en las diferentes soluciones de pH, obtiene así un 83.3% de remoción de fosfato en 3 horas y un 84.24 % en 4 Horas.

CUEVA y HUAROC (2015), En su trabajo de investigación, “Remoción de los contaminantes de aguas residuales de la planta lechera Mantaro por el método de electrocoagulación mediante energía eólica, a nivel de laboratorio”, para el cual utilizó dos electrodos uno de hierro y aluminio con un espesor de 1 cm, con una separación de 2 cm, para el tratamiento de los efluentes de origen lácteo. Realizo pruebas en un reactor con un volumen de 2 L; obteniendo como el máximo porcentaje de remoción a una densidad de corriente 44.2 A/m² y un tiempo de 25 minutos, las remociones obtenidas al nivel

más alto que es el óptimo es de: conductividad 56.11%, turbiedad 98.77%, DBO₅ 80.0%, DQO 81.32%, aceites y grasas 99.29%, solidos totales suspendidos (SST) 98.91%, solidos totales disueltos (TDS) 58.68%, solidos totales 83.11%, dureza cálcica 86.82%, dureza total 79.09%.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del lugar de estudio

3.1.1. Ubicación política

La recolección del agua residual se realizó en el efluente matadero Municipal de Tingo María; la etapa experimental se desarrolló en el Laboratorio de física y el análisis de parámetros se realizó tanto en el laboratorio de Microbiología y en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), políticamente ubicado en la ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco.

3.1.2. Ubicación geográfica

Geográficamente el Laboratorio de Microbiología General está ubicado en las coordenadas UTM (E 390552 m. y N: 8970269 m); a una altitud de 668 m.s.n.m. dentro del empalme Tingo María hoja 19-k de la Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional, correspondiente a la Región Selva; a la cual se accede por vía terrestre, por la carretera de Lima a Tingo María.

3.2. Materiales y equipos

En las pruebas de laboratorio y en la medición de las características físico-químicas se utilizaron diversos equipos y materiales, Estos equipos y materiales se exponen a continuación:

3.2.1 Materiales

- Aguas residuales provenientes del Industria del matadero municipal de Tingo Maria.
- Envases de PVC de polietileno de 10L.
- Etiquetas
- electrodos de hierro y aluminio
- 11 botellas de 400ml de capacidad.
- Pipetas
- Tubos de ensayo
- Embaces de 100ml para recolección de la muestra.

3.2.2 Equipos

- Fuente de corriente (GWINSTEK modelo GPS – 1850D)
- Pinza Amperimétrica (Fluke Modelo 355)
- Medidor Multiparametro; OD, pH, Conductividad y Temperatura (HANNA HI 9146)
- Cronómetro (Kenko modelo KK -5898)
- Balanza Analítica de precisión (Dakota modelo 300 X)

3.3. Construcción y montaje de la celda de electrocoagulación a nivel de laboratorio

La celda de electrocoagulación o cuba electrolítica fue diseñada para tratar 3.9 litros de efluente, teniendo en cuenta la metodología de AGUILAR (2015), el material seleccionado fue vidrio transparente de tal forma que nos permita apreciar con claridad todos los procesos físico-químicos de agua que se presentan en el proceso de electrocoagulación.

Se tuvo el criterio desde el inicio de fabricarla totalmente desarmable, para eso se fabricaron soportes de acrílico para los electrodos de

tal manera que se pudiera variar los espaciamientos entre los electrodos y realizar una mejor limpieza de la celda después de cada prueba.

La celda tiene las siguientes dimensiones:

Ancho = 14 cm Largo = 20 cm y Altura= 20 cm.

El agua residual se llenó hasta una altura de 14 cm dejando un espacio libre de 6 cm para la acumulación de lodos en la parte superior. La celda se diseñó con un criterio de generar 3 zonas principales las cuales se les denominó de la siguiente manera:

Zona de reacción: donde están sumergidos los electrodos y se produce el proceso de electrocoagulación.

Zona de Sedimentación: donde precipitan los lodos sedimentables

Zona de Flotación: donde se acumulan los lodos productos de la flotación.

Adicionalmente a esto se instaló un tomador de muestra, para esto se prefirió utilizar un caño de plástico el cual permitió tomar más fácilmente las muestras a analizar.

3.3.1. Electrodos

Electrodos fueron aluminio y hierro, esto se decidió consultando la bibliografía y basándose en estudios anteriores los cuales indican se obtienen muy buenos resultados, además que no son muy costosos y son fáciles de conseguir. Las dimensiones de los electrodos fueron de 10cm de largo, 10cm de ancho y 2mm de espesor. Se utilizaron un total de 10 placas metálicas como electrodos, 5 de aluminio y 5 de hierro, tomando al aluminio como ánodo (electrodo de sacrificio) y el hierro como cátodo.

3.3.2. Fuente de poder

La fuente de poder utilizada en las pruebas para poder regular la cantidad de corriente suministrada a la celda para el proceso de electrocoagulación, esta tiene una capacidad de suministrar de 0 a 5 amperios y un voltaje de 0 a 20 V.

La verificación de las lecturas de los medidores digitales de intensidad de corriente se utilizó un multítester digital y un cronometro para mediciones de tiempo.

Para el suministro de corriente continua a los electrodos se utilizaron cables de uso eléctrico y terminales tipo cocodrilos para conectarlos a las placas de hierro y aluminio.

Cuadro 3. Características de la celda de electrocoagulación.

Características	Unidades/Material	Valor
Material del ánodo	Aluminio	-
Material del cátodo	Hierro	-
Reactor	Vidrio	-
Volumen del reactor	Litros(L)	3.9
Intensidad máxima de la fuente de poder	Amperios (A)	5
Tensión máxima de la fuente de poder	Voltios (V)	18
Numero de electrodos	Unidad	10
Área de electrodos	Metros Cuadrados m ²	0.1
Distancia de separación de electrodos	Centímetros (mm)	1.5
Material de anclaje	Fibra de vidrio	-

3.4. Ensayos de laboratorio preliminares

Se realizaron ensayos preliminares con agua de grifo, para poder establecerla distancia entre los electrodos, se hicieron pruebas a diversas distancias de 10mm,15mm y 20mm teniendo en cuenta la cantidad de burbujas producidas, tamaño de burbujas y densidad de corriente, obteniéndose mejores resultados en una distancia de 15 mm, la cual fue asumida para las pruebas definitivas.

3.5. Recolección de muestra

Se recolecto las aguas residuales del matadero municipal, precisamente de los procesos de bañado, aturdimiento, sacrificio y desollado, con una jarra de 1L en un balde de 20L, entre las 7 - 8.30 am (hora donde se da en mayor número de sacrificios del día).

3.6. Etapa experimental

Se comenzó realizando el tamizado como parte de un tratamiento primario de esta manera se dio las condiciones necesarias para la electrocoagulación.

Después se procedió a calentar el agua residual a diferentes temperaturas en baño maría y se dejó en reposo a temperatura ambiente por un lapso de 1 hora.

Posteriormente se llevó a la celda de electrocoagulación para el desarrolló de las pruebas cada una con tres repeticiones las cuales se describen a continuación:

Ensayo A: a temperatura 25 °C e intensidad de corriente 1, 3 y 5 amperios.

Ensayo B: a temperatura de 45 °C e intensidad de corriente de 1, 3 y 5 amperios.

Ensayo C: a temperatura de 45 °C e intensidad de corriente de 1, 3 y 5 amperios.

Ensayo D: a temperatura de 45 °C e intensidad de corriente de 1, 3 y 5 amperios.

Luego se tomó muestras a 5, 10 y 15 minutos de exposición, dando lugar a 36 tratamientos (ver cuadro 4).

3.7. Evaluación de parámetros

Los análisis para la determinación de la DBO₅ y sólidos totales se realizaron en el laboratorio de microbiología; mientras que los análisis de nitratos y fosfatos se realizaron en el laboratorio de análisis de suelos de la UNAS.

3.7.1. Determinación de la temperatura

Se sumerge la punta de la sonda en la muestra a analizar asegurándose que el sensor de temperatura también esté sumergido y se registra el resultado.

3.7.2. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno

Método de dilución, 5 días a 20 °C (RAMALHO, 1996).

La muestra se incubó 5 días a temperatura estable de 20 °C, el oxígeno disuelto se midió por el método electrométrico, antes y después de la incubación.

Para determinar la DBO_5 en zonas con alta carga de contaminantes se debe de utilizar diluciones para ello utilizamos la siguiente formula:

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

Dónde:

- OD_s^i =Oxígeno disuelto inicial de la muestra (mg/L)
- OD_s^f =Oxígeno disuelto al periodo de 5 días de la solución (mg/L)
- OD_b^f =Oxígeno disuelto final del blanco o agua de dilución (mg/L)
- V_s = volumen de la muestra.
- V_b = volumen de la botella de incubación.

3.7.3. Determinación de sólidos totales

Los sólidos totales se midieron según lo establecido en el método 2540 (APHA, 2005) y calculados mediante la siguiente expresión:

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(P2 - P1)}{V}$$

Dónde:

- ST: solidos totales en mg/L.
- P1: peso de porcelana en mg.
- P2: peso de porcelana más el residuo seco a 103-105 °C en mg.
- V: volumen de muestra tomada en L

3.7.4. Determinación de nitratos

Se realizó los análisis en el laboratorio de análisis de suelos de la UNAS, mediante el método de KJENDHAL – BUCHI ALEMANIA.

3.7.5. Determinación de fosfatos

Se realizó los análisis en el laboratorio de análisis de suelos de la UNAS, mediante el método de METAVANADATO, ESPECTRO UV VISIBLE – THERMO SCIENTIFIC USA.

3.8. Eficiencia de remoción

Se calculó mediante una correlación porcentual entre la concentración inicial y final de los parámetros evaluados (DBO₅, ST, nitratos y fosfatos) presentes en cada muestra del efluente procesado dentro de la celda de electrocoagulación, según el tratamiento del mismo, mediante la siguiente formula (TAKE *et al.* 2012):

$$ER(\%) = \left(\frac{Ci - Cf}{Ci} \right) \times 100$$

Dónde:

- ER: eficiencia de remoción de parámetros evaluados (DBO₅, ST, nitratos y fosfatos), en %.
- Ci: concentración inicial parámetros evaluados (DBO₅, ST, nitratos y fosfatos).
- Cf: concentración final parámetros evaluados (DBO₅, ST, nitratos y fosfatos).

3.9. Diseño de investigación

El presente estudio corresponde a un diseño de tipo experimental de estímulo creciente, que obedece a variaciones de temperatura de calentamiento previo (25, 45, 60, 75 °C), por cada intensidad de corriente (1, 3 y 5 A), con muestreos en tres tiempo de operación (5, 10 y 15 minutos) y con tres repeticiones por tratamiento, evaluándose cuatro parámetros (DBO₅, ST, nitratos y fosfatos), para determinar la eficiencia de la electrocoagulación.

3.9.1. Variables independientes

Temperatura de calentamiento previo del agua residual, intensidad de corriente y tiempo de residencia.

3.9.2. Variables dependientes

Porcentaje de remoción de DBO₅, ST, Nitratos y Fosfatos.

Cuadro 4. Sistema experimental de estímulo creciente

Temperatura* (°C)	Intensidad de corriente eléctrica (A)								
	1			3			5		
	Tiempo (min)								
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
25	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
45	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
60	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
75	T28	T29	T30	T31	T32	T33	T34	T35	T36

*temperatura de calentamiento previo.

3.10. Análisis e interpretación de datos

El diseño experimental utilizado en la investigación es un diseño factorial de tres factores completamente al azar, con diferentes niveles y la variable de respuesta fue el porcentaje de remoción de DBO₅, ST, N y P.

Las variables que se consideran como factores para el diseño experimental son: intensidad de corriente eléctrica, temperatura de calentado previo y tiempo de tratamiento, lo que permitió investigar el efecto individual y la interacción entre los factores sobre la variable respuesta, al elaborar un análisis de varianza.

3.10.1. Análisis de varianza (ANOVA)

Los resultados fueron evaluados mediante un análisis de varianza multivariable (ANVA). Se distribuyeron las variables estadísticas y los tratamientos de acuerdo al diseño experimental, se utilizó el modelo estadístico completamente al azar (DCA), a un nivel de significancia de 5%, utilizando el programa Statgraphics Centurion XXIV, versión española.

3.10.2. Prueba de Tukey

Se empleó la diferencia francamente significativa de Tukey (HSD Tukey), con el fin de poder determinar entre que tratamientos había diferencias significativas, con un nivel de significancia 5%, utilizando el programa Statgraphics Centurion XXIV, versión española.

IV. RESULTADOS

4.1. Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO_5

En la figura 2, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO_5 , a temperatura de calentamiento previo de 25 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

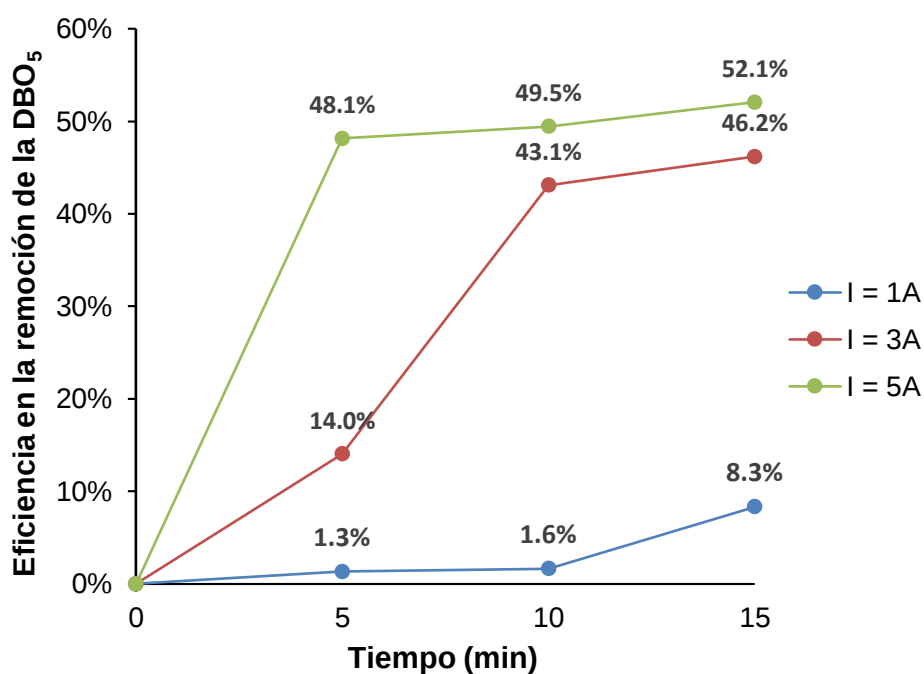


Figura 2. Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO_5 a 25 °C.

En la figura 3, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO_5 , a temperatura de calentamiento previo de 45 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

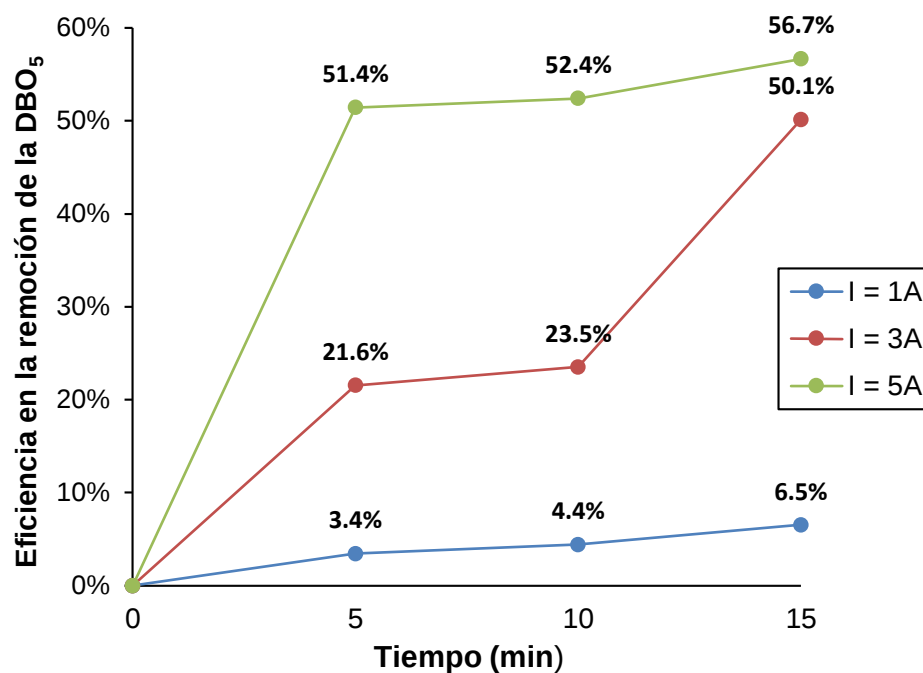


Figura 3. Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO₅ a 45 °C.

En la figura 4, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO₅, a temperatura de calentamiento previo de 60 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

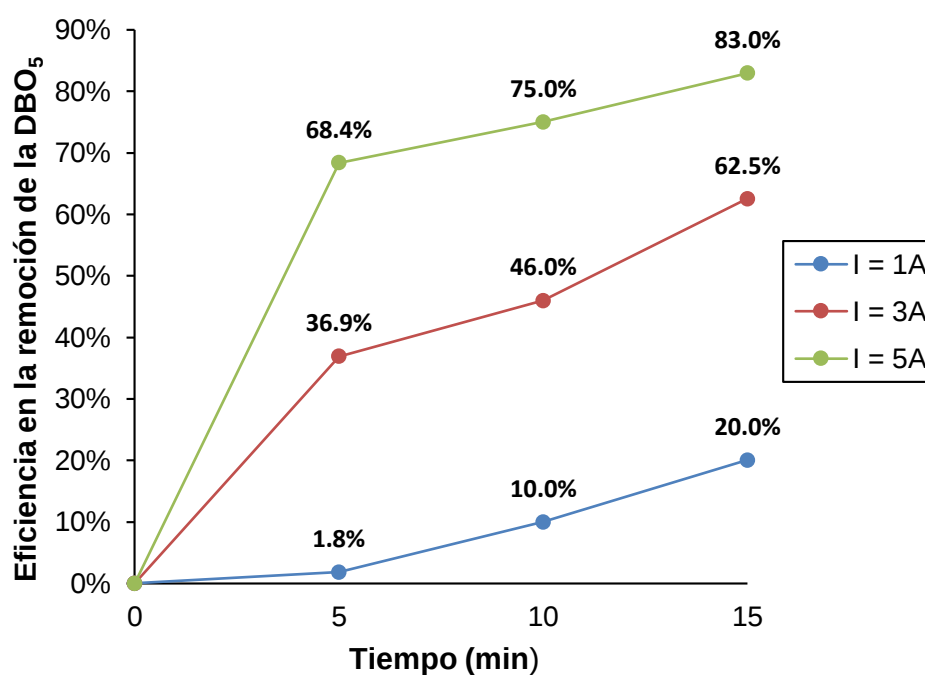


Figura 4. Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO₅ a 60 °C.

En la figura 5, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO_5 , a temperatura de calentamiento previo de $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

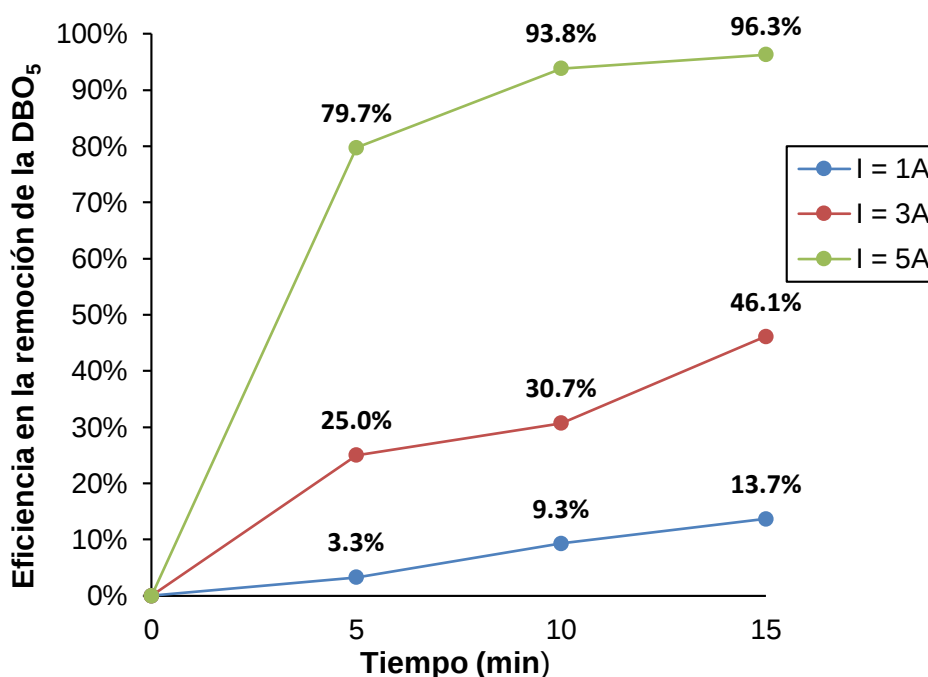


Figura 5. Eficiencia de la EC en la remoción de la DBO_5 a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.1.1. ANVA para la DBO_5

Se realizó el análisis de los datos que se observan en el cuadro 5, donde se encontró la significancia de los factores y de sus interacciones; se obtuvieron valores para $p < 0.05$ en todos los factores y en sus interacciones, lo cual indica que estos son estadísticamente significativos sobre la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO_5 .

Se encontró un coeficiente de correlación r^2 de 0.997, lo que significa que el modelo estadístico propuesto explica el 99.7% de la variabilidad de la proporción de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO_5 , indicando un buen ajuste del modelo a los datos recolectados.

Cuadro 5. ANVA para la DBO₅.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
Temperatura* (A)	5965.709	3	1988.57	908.049	<0.001**
Intensidad de corriente (B)	65290.24	2	32645.12	14906.88	<0.001**
Tiempo (C)	4359.256	2	2179.628	995.293	<0.001**
A x B	5551.918	6	925.32	422.533	<0.001**
A x C	328.408	6	54.735	24.994	<0.001
B x C	1185.532	4	296.383	135.339	<0.001**
A x B x C	912.707	12	76.059	34.731	<0.001**
Error experimental	157.675	72	2.19		
Total corregido	83751.44	107			

*temperatura de calentamiento previo.

** Significativo al 99 %

4.1.2. Tukey para la DBO₅ por efecto principal de la temperatura

El cuadro 6, hace una comparación múltiple, mediante la prueba de Tukey, para determinar cuáles medias son significativamente estadísticas diferentes de otras; se han identificado que a 60 °C y 75 °C tienen la misma significancia (a), esto quiere decir que los dos tratamientos han logrado reducir la DBO₅ en cantidades similares y además presentan el mayor efecto en la remoción de la DBO₅, mientras que a 45 °C y 25 °C tienen la misma significancia (b) y presentan menor efecto en la remoción de la DBO₅.

Cuadro 6. Prueba Tukey para la DBO₅ por efecto principal de la temperatura

Mérito	Temperatura (°C)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	60	44.8530	a
2	75	44.2213	a
3	45	30.0132	b
4	25	29.3600	b

4.1.3. Tukey para la DBO₅ por efecto principal de la intensidad de corriente

Se han identificado que todas las intensidades de corriente estadísticamente muestran diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada intensidad de corriente es diferente sobre la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO₅ (cuadro 7).

Cuadro 7. Prueba Tukey para la DBO₅ por efecto principal de la intensidad de corriente

Mérito	Intensidad de corriente (A)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	5	67.2043	a
2	3	37.1534	b
3	1	6.9778	c

4.1.4. Tukey para la DBO₅ por efecto principal del tiempo

Se han identificado que todos los tiempos estadísticamente muestran diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada intensidad de corriente es diferente sobre la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO₅ (cuadro 8).

Cuadro 8. Prueba Tukey para la DBO₅ por efecto principal del tiempo

Mérito	Tiempo (min)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	15	45.1298	a
2	10	36.6143	b
3	5	29.5915	c

4.1.5. ANVA para la DBO₅ por efecto simple A en B y B en A

Para todos los efectos simples se encontró diferencias estadísticas significativas, el cual indica que al menos una de las interacciones de cada factor fue diferente el efecto simple respecto a la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO₅ (Cuadro 9).

Cuadro 9. ANVA para la DBO₅ por efecto simple A en B y B en A

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A en b1	284.03	3	94.68	3.87	0.018
Error experimental	782.93	32	24.47		
A en b2	1576.42	3	525.47	3.24	0.035
Error experimental	5196.27	32	162.38		

A en b3	9657.18	3	3219.06	106.82	<0.001**
Error experimental	964.38	32	30.14		
B en a1	9925.83	2	4962.91	58.73	<0.001
Error experimental	2028.22	24	84.51		
B en a2	10722.16	2	5361.08	78.48	<0.001**
Error experimental	1639.39	24	68.31		
B en a3	19101.59	2	9550.79	120.26	<0.001**
Error experimental	1906.06	24	79.42		
B en a4	31092.58	2	15546.29	272.36	<0.001**
Error experimental	1369.91	24	57.08		
Total	96246.94	209			

** Significativo al 99 %

4.1.6. Tukey para la DBO₅ por efecto simple de A en B y B en A

La mayor eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO₅, se observó en la combinación de emplear una temperatura de 75 ° C (a4) con una intensidad de corriente de 5 A (b3), el cual reportó una media de eficiencia de 89.95 % (Cuadro 10).

Cuadro 10. Prueba Tukey para la DBO₅ por efecto simple de A en B y B en A

Interacción	Mérito	Variable	Eficiencia (%)	Significancia
A en b1	1	60 °C	10.62	a
	2	75 °C	8.75	a
	3	45 °C	4.79	b
	4	25 °C	3.75	b

A en b2	1	60 °C	48.48	a
	2	25 °C	34.44	b
	3	75 °C	33.96	b
	4	45 °C	31.74	b
A en b3	1	75 °C	89.95	a
	2	60 °C	75.46	b
	3	45 °C	53.51	c
	4	25 °C	49.89	c
B en a1	1	5 A	49.89	a
	2	3 A	34.44	b
	3	1 A	3.75	c
B en a2	1	5 A	53.51	a
	2	3 A	31.74	b
	3	1 A	4.79	c
B en a3	1	5 A	75.46	a
	2	3 A	48.48	b
	3	1 A	10.62	c
B en a4	1	5 A	89.95	a
	2	3 A	33.96	b
	3	1 A	8.75	c

4.1.7. ANVA para la DBO₅ por efecto simple A en C y C en A

Se realizó el análisis de los datos que se observan en el cuadro 11, donde se obtuvieron valores para $p > 0.05$ en todos los efectos simples, lo cual

indica que ninguna de estas interacciones son estadísticamente significativos sobre la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO₅.

Cuadro 11. ANVA para la DBO₅ por efecto simple A en C y C en A

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A en c1	1500.13	3	500.04	0.69	0.562
Error experimental	23042.04	32	720.06		
A en c2	2139.34	3	713.11	0.89	0.456
Error experimental	25569.49	32	799.05		
A en c3	2654.66	3	884.89	1.16	0.342
Error experimental	24486.54	32	765.20		
C en a1	983.97	2	491.99	1.08	0.357
Error experimental	10970.08	24	457.09		
C en a2	821.96	2	410.98	0.86	0.438
Error experimental	11539.59	24	480.82		
C en a3	1725.73	2	862.86	1.07	0.357
Error experimental	19281.92	24	803.41		
C en a4	1156.00	2	578.00	0.44	0.647
Error experimental	31306.49	24	1304.44		
Total	157177.92	209			

4.1.8. ANVA para la DBO₅ por efecto simple de B en C y C en B

Al realizar el análisis de los datos se observa que solo para la interacción C en b3 se obtuvo valor para $p > 0.05$, el cual indica que no existe

diferencia estadística significativa para esta interacción; pero en las demás interacciones se encontró diferencias estadísticas significativas, el cual indica que al menos una de las interacciones de cada factor fue diferente el efecto simple respecto a la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO₅ (Cuadro 12).

Cuadro 12. ANVA para la DBO₅ por efecto simple de B en C y C en B

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
B en c1	21699.82	2	10849.91	125.97	<0.001**
Error experimental	2842.34	33	86.13		
B en c2	22603.25	2	11301.62	73.05	<0.001**
Error experimental	5105.58	33	154.71		
B en c3	22172.70	2	11086.35	73.63	<0.001**
Error experimental	4968.50	33	150.56		
C en b1	569.13	2	284.57	18.86	<0.001**
Error experimental	497.82	33	15.09		
C en b2	4362.42	2	2181.21	29.86	<0.001**
Error experimental	2410.27	33	73.04		
C en b3	613.23	2	306.62	1.01	0.375
Error experimental	10008.33	33	303.28		
Total	97853.39	210			

** Significativo al 99 %

4.1.9. Tukey para la DBO₅ por efecto simple de B en C y C en B

Todos los tiempos a intensidad de corriente de 5 A son estadísticamente iguales, por lo que las mayores eficiencias de la

electrocoagulación en la remoción de la DBO_5 , se observó al emplear una intensidad de 5A (b3) a 5, 10 y 15 min (c1, c2, y c3), los cuales reportaron una media de 61.92%, 67.69% y 72.00 % respectivamente (Cuadro 13).

Cuadro 13. Prueba Tukey para la DBO_5 por efecto simple de B en C y C en B

Interacción	Mérito	Variable	Eficiencia (%)	Significancia
B en c1	1	5 A	61.92	a
	2	3 A	24.38	b
	3	1 A	2.47	c
B en c2	1	5 A	67.69	a
	2	3 A	35.83	b
	3	1 A	6.33	c
B en c3	1	5 A	72.00	a
	2	3 A	51.25	b
	3	1 A	12.14	c
C en b1	1	15 min	12.14	a
	2	10 min	6.33	b
	3	5 min	2.47	b
C en b2	1	15 min	51.25	a
	2	10 min	35.83	b
	3	5 min	24.38	c
C en b3	1	15 min	72.00	a
	2	10 min	67.69	a
	3	5 min	61.92	a

4.1.10. ANVA para la DBO_5 por efecto simple de $A \times B \times C$

Para todos los efectos simples se encontró diferencias estadísticas significativas, el cual indica que al menos una de las interacciones de cada factor

fue diferente el efecto respecto a la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO₅ (Cuadro 14).

Cuadro 14. ANVA para la DBO₅ por efecto simple de AxBxC

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
AxBxC	83593.77	35	2388.39	1090.62	<0.001
Error experimental	157.67	72	2.190		
Total	83751.44	107			

4.1.11. Tukey para la DBO₅ por efecto simple de AxBxC

La mayor eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la DBO₅ se observó en la combinación de emplear una temperatura de 75 °C, con una intensidad de corriente de 5 A y a tiempos de 15 y 10 min, el cual reportó una media de eficiencia de 96.28 % y 93.84 respectivamente (Cuadro 15).

Cuadro 15. Prueba Tukey para la DBO₅ por efecto simple de AxBxC

Mérito	temperatura (°C)	intensidad de corriente (A)	Tiempo (min)	Eficiencia (%)	significancia
1	75	5	15	96.2816	a
2	75	5	10	93.8472	a
3	75	5	5	82.9821	b
4	60	5	15	79.7276	b
5	60	5	10	75.0321	c
6	60	5	5	68.3802	d
7	60	3	15	62.5394	e

4.2. Eficiencia de la EC en la remoción de ST

En la figura 6, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de ST, a temperatura de calentamiento previo de 25 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

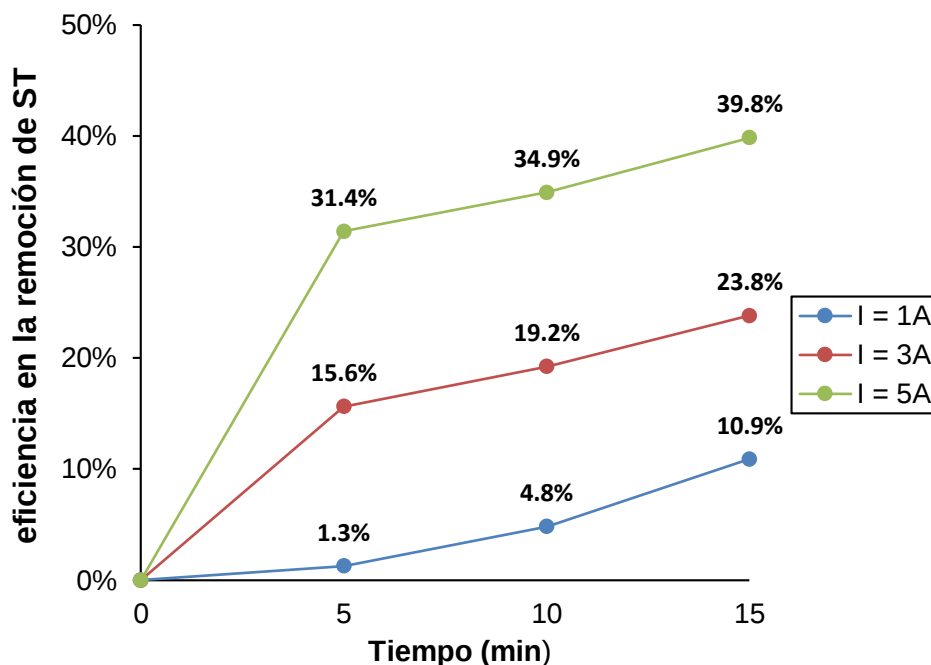


Figura 6. Eficiencia de la EC en la remoción de ST a 25 °C.

En la figura 7, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de sólidos totales, a temperatura de calentamiento previo de 45 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente. Se observa que al aumentar la temperatura, corriente eléctrica y tiempo se obtiene mejores resultados en la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de sólidos totales, mostrado siempre un crecimiento continuo moderado.

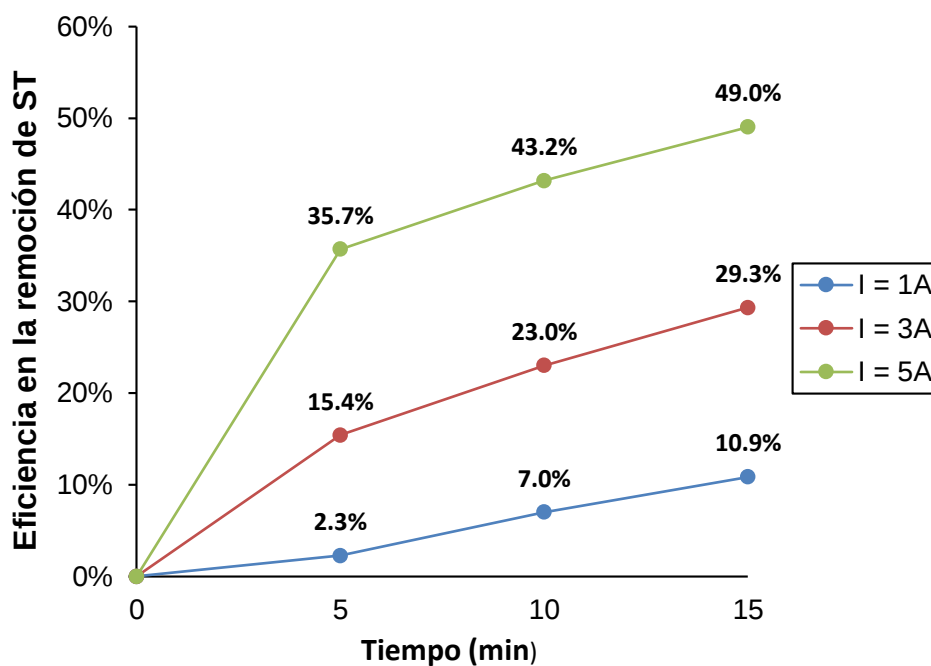


Figura 7. Eficiencia de la EC en la remoción de ST a 45 °C.

En la figura 8, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de ST, a temperatura de calentamiento previo de 25 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

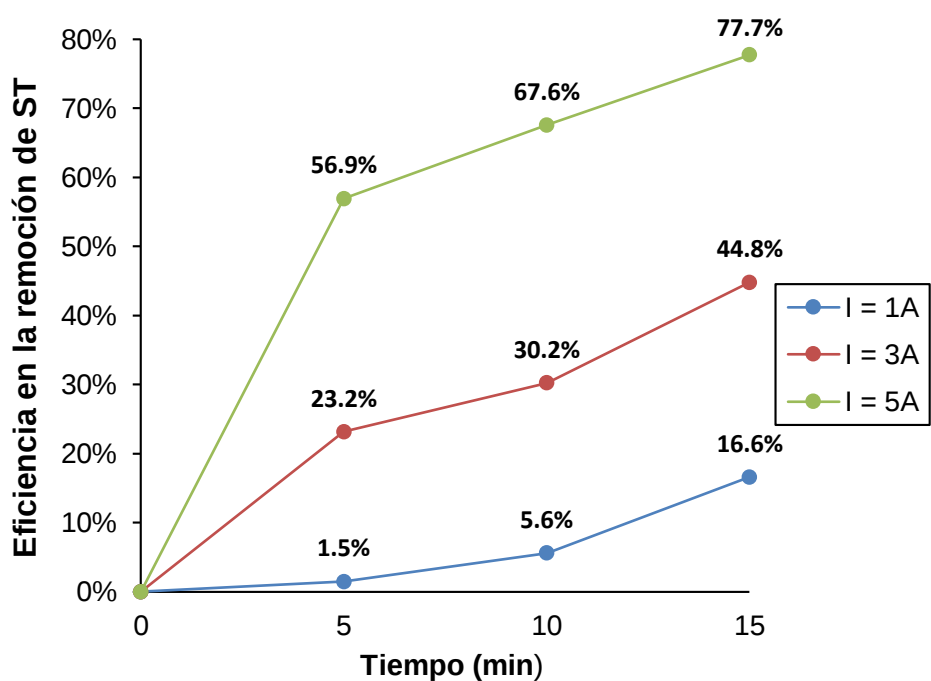


Figura 8. Eficiencia de la EC en la remoción de ST a 60 °C.

En la figura 9, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de sólidos totales, a temperatura de calentamiento previo de 75 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

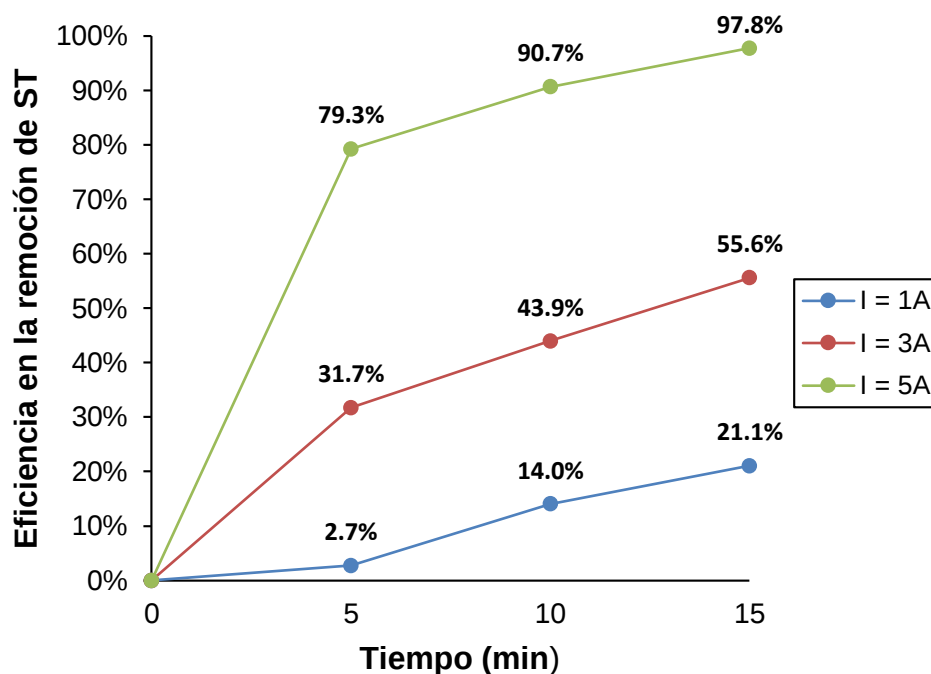


Figura 9. Eficiencia de la EC en la remoción de ST a 75 °C.

4.2.1. ANVA para sólidos totales

Se realizó el análisis de los datos que se observan en el cuadro 16, donde se encontró la significancia de factores y en sus interacciones; se obtuvieron valores para $p < 0.05$ en todos los factores y en sus interacciones (AxB y AxC), lo cual indica que estos son estadísticamente significativos sobre la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de sólidos totales; Mientras que la interacción (BxC y AxBxC) no son significativos.

Se encontró un coeficiente de correlación r^2 de 0.967, lo que significa que el modelo estadístico propuesto explica el 96.7% de la variabilidad de la

proporción de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de sólidos totales, indicando un buen ajuste del modelo a los datos recolectados.

Cuadro 16. ANVA para sólidos totales

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
Temperatura* (A)	13296.56	3	4432.186	196.709	<0.001**
Intensidad de corriente (B)	46153.68	2	23076.84	1024.196	<0.001**
Tiempo (C)	4064.291	2	2032.146	90.191	<0.001**
A x B	6474.932	6	1079.155	47.895	<0.001**
A x C	471.019	6	78.503	3.484	0.004**
B x C	57.007	4	14.252	0.633	0.641
A x B x C	62.164	12	5.18	0.23	0.996
Error experimental	1622.28	72	22.532		
Total corregido	72201.93	107			

*temperatura de calentamiento previo.

** Significativo al 99 %

4.2.2. Tukey para ST por efecto principal de la temperatura

En el cuadro 17, se hacen comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey; se han identificado que todas las temperaturas estadísticamente tienen diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada temperatura de calentamiento previo es diferente sobre la eficiencia de la EC en la remoción de sólidos totales.

Cuadro 17. Prueba Tukey para ST por efecto principal de la temperatura.

Mérito	Temperatura (°C)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	75	48.5260	a
2	60	36.0014	b
3	45	23.9821	c
4	25	20.2022	d

4.2.3. Tukey para ST por efecto principal de la intensidad de corriente

Se han identificado que todas las intensidades de corriente estadísticamente tienen diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada intensidad de corriente es diferente sobre la eficiencia de la EC en la remoción de sólidos totales (cuadro 18).

Cuadro 18. Prueba Tukey para ST por efecto principal de la intensidad de corriente.

Mérito	Intensidad de corriente (A)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	5	58.6639	a
2	3	29.6538	b
3	1	8.2161	c

4.2.4. Tukey para ST por efecto principal del tiempo

Se han identificado que todos los tiempos estadísticamente tienen diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada tiempo

es diferente sobre la eficiencia de la EC en la remoción de sólidos totales (cuadro 19).

Cuadro 19. Prueba Tukey para ST por efecto principal del tiempo.

Mérito	Tiempo (min)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	15	39.7695	a
2	10	32.0188	b
3	5	24.7456	c

4.2.5. ANVA para ST por efecto simple A en B y B en A

Al realizar el análisis de los datos se observa que solo para la interacción A en b1 se obtuvo valor para $p > 0.05$, el cual indica que no existe diferencia significativa; pero en las demás interacciones se encontró diferencias estadísticas significativas, el cual indica que al menos una de las interacciones de cada factor fue diferente el efecto simple respecto a la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de sólidos totales (Cuadro 20).

Cuadro 20. ANVA para ST por efecto simple A en B y B en A

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A en b1	253.45	3	84.48	1.95	0.141
Error experimental	1385.02	32	43.28		
A en b2	3238.23	3	1079.41	12.55	<0.001**
Error experimental	2753.29	32	86.04		
A en b3	16279.81	3	5426.60	81.20	<0.001**
Error experimental	2138.45	32	66.83		
B en a1	3983.05	2	1991.53	82.22	<0.001**
Error experimental	581.30	24	24.22		

B en a2	5834.28	2	2917.14	80.81	<0.001**
Error experimental	866.37	24	36.10		
B en a3	16082.27	2	8041.14	77.40	<0.001**
Error experimental	2493.29	24	103.89		
B en a4	26729.01	2	13364.50	137.32	<0.001**
Error experimental	2335.80	24	97.33		
Total	84953.63	209			

** Significativo al 99 %

4.2.6. Tukey para ST por efecto simple de A en B y B en A

La mayor eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de sólidos totales se observó en la combinación de emplear una temperatura de 75 ° C (a4) con una intensidad de corriente de 5 A (b3), el cual reportó una media de eficiencia de 89.22 % (Cuadro 21).

Cuadro 21. Prueba Tukey para ST por efecto simple de A en B y B en A

interacción	Mérito	Variable	Eficiencia (%)	Significancia
A en b2	1	75 °C	43.7446	a
	2	60 °C	32.7241	ab
	3	45 °C	22.5851	bc
	4	25 °C	19.5613	c
A en b3	1	75 °C	89.2285	a
	2	60 °C	67.3958	b
	3	45 °C	42.6435	c
	4	25 °C	35.3879	c
B en a1	1	5 A	35.3879	a
	2	3 A	19.5613	b

	3	1 A	5.6576	c
	1	5 A	42.6435	a
B en a2	2	3 A	22.5851	b
	3	1 A	6.7179	c
	1	5 A	67.3958	a
B en a3	2	3 A	32.7241	b
	3	1 A	7.8843	c
	1	5 A	89.2285	a
B en a4	2	3 A	43.7446	b
	3	1 A	12.6048	c

4.2.7. ANVA para ST por efecto simple A en C y C en A

Al realizar el análisis de los datos se observa, que solo para la interacción A en c3 se obtuvo valor para $p < 0.05$, el cual indica que existe diferencia significativa para esta interacción; pero en las demás interacciones, se obtuvo valores para $p > 0.05$, lo cual indica no existe diferencias estadísticas significativas (Cuadro 22).

Cuadro 22. ANVA para ST por efecto simple A en C y C en A

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A en c1	2715.70	3	905.23	1.695	0.188
Error experimental	17088.34	32	534.01		
A en c2	4718.87	3	1572.96	2.67	0.064
Error experimental	18852.56	32	589.14		

A en c3	6333.01	3	2111.00	3.666	0.022**
Error experimental	18429.17	32	575.91		
C en a1	348.01	2	174.01	0.99	0.386
Error experimental	4216.34	24	175.68		
C en a2	644.32	2	322.16	1.277	0.297
Error experimental	6056.34	24	252.35		
C en a3	1686.24	2	843.12	1.198	0.319
Error experimental	16889.33	24	703.72		
C en a4	1856.75	2	928.37	0.819	0.453
Error experimental	27208.06	24	1133.67		
Total	127043.02	209			

** Significativo al 99 %

4.2.8. Tukey para ST por efecto simple de A en C y C en A

La mayor eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de sólidos totales se observó en la combinación de emplear una temperatura de 75 ° C (a4) con un tiempo de 15 min (c3), el cual reportó una media de eficiencia de 58.13 % (Cuadro 23).

Cuadro 23. Prueba Tukey para ST por efecto simple de A en C y C en A

interacción	Mérito	Variable	Eficiencia (%)	Significancia
A en c3	1	75 °C	58.1305	a
	2	60 °C	46.3556	ab
	3	45 °C	29.7439	ab
	4	25 °C	24.848	b

4.3. Eficiencia de la EC en la remoción de nitratos

En la figura 10 y 11, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de nitratos, a temperatura de calentamiento previo de 25 °C y 45 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

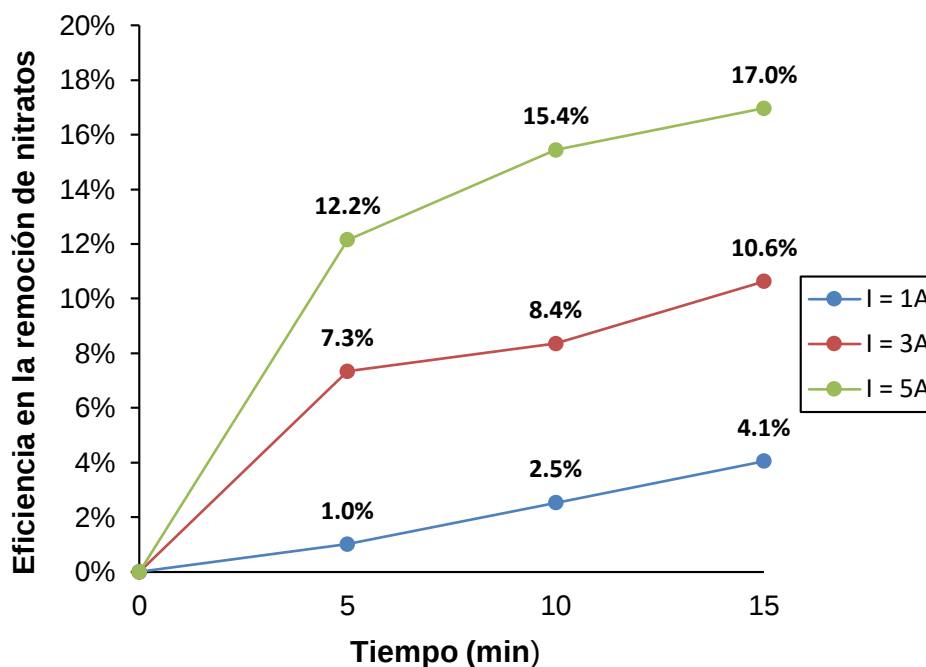


Figura 10. Eficiencia de la EC en la remoción de nitratos a 25 °C.

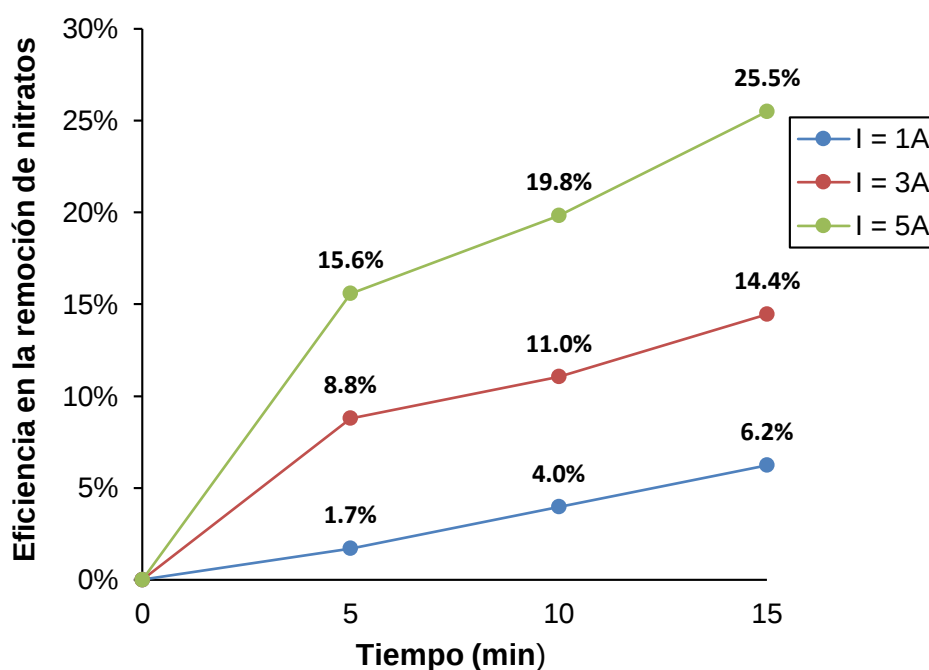


Figura 11. Eficiencia de la EC remoción de nitratos a 45 °C.

En la figura 12 y 13, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de fosfatos, a temperatura de calentamiento previo de 60 °C y 75 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

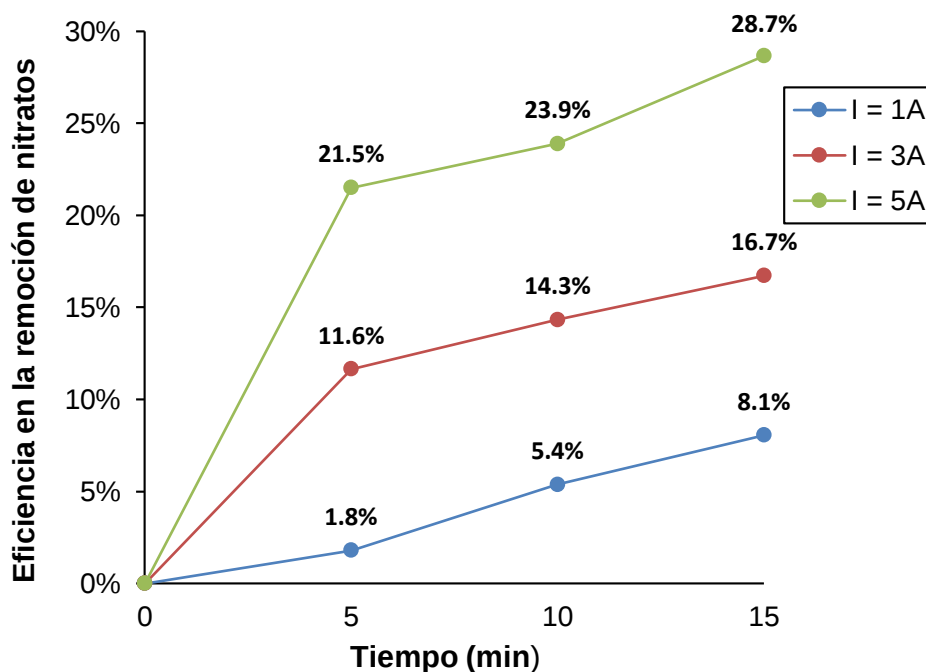


Figura 12. Eficiencia de la EC en la remoción de nitratos a 60 °C.

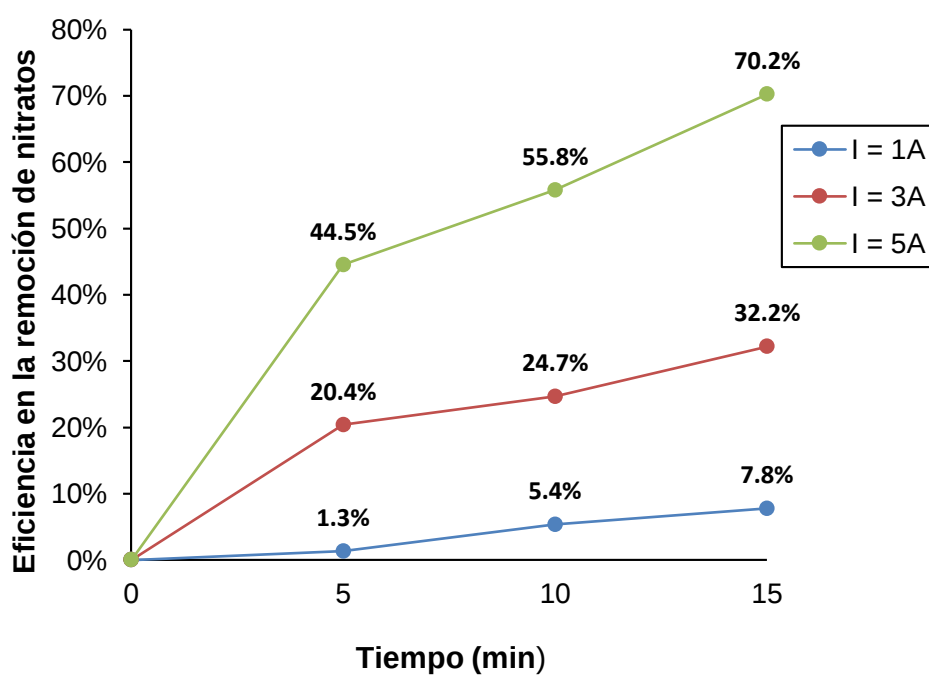


Figura 13. Eficiencia de la EC en la remoción de nitratos a 75 °C.

4.3.1. ANVA para nitratos

Se realizó el análisis de los datos que se observan en el cuadro 24, en donde se encontró la significatividad de factores y en sus interacciones; se obtuvieron valores para $p < 0.05$ en todos los factores y en la interacción (AxB), lo cual indica que estos son significativos sobre la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de nitratos; Mientras que las interacciones (AxC y BxC) no son significativos.

Se encontró un coeficiente de correlación r^2 de 0.978, lo que significa que el modelo estadístico propuesto explica el 97.8% de la variabilidad de la proporción de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de nitratos, indicando un buen ajuste del modelo a los datos recolectados.

Cuadro 24. ANVA para nitratos.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
Temperatura* (A)	2196.504	3	732.168	146.482	<0.001**
Intensidad de corriente (B)	3790.497	2	1895.248	379.174	<0.001**
Tiempo (C)	366.941	2	183.470	36.706	<0.001**
A x B	1525.286	6	254.214	50.860	<0.001**
A x C	53.944	4	13.486	2.698	0.082
B x C	102.195	6	17.032	3.408	0.034
Error experimental	59.980	12	4.998		
Total corregido	8095.347	35			

*temperatura de calentamiento previo.

** Significativo al 99 %

4.3.2. Tukey para nitratos por efecto principal de la temperatura

En el cuadro 25, se hacen comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey; se han identificado que todas las temperaturas estadísticamente tienen diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada temperatura de calentamiento previo es diferente sobre la eficiencia de la EC en la remoción de nitratos. Además se obtiene el mejor resultado de eficiencia para efecto principal de la temperatura a 75 °C, el cual reportó una media de eficiencia de 29.13 %.

Cuadro 25. Prueba Tukey para nitratos por efecto principal de la temperatura

Mérito	Temperatura (°C)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	75	29.13	a
2	60	14.66	b
3	45	11.90	c
4	25	8.72	d

4.3.3. Tukey para nitratos por efecto principal de la intensidad de corriente

Se han identificado que todas las intensidades de corriente estadísticamente tienen diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada intensidad de corriente es diferente sobre la eficiencia de la EC en la remoción de nitratos (cuadro 26).

Cuadro 26. Prueba Tukey para nitratos por efecto principal de la intensidad de corriente.

Mérito	Intensidad de corriente (A)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	5	29.17	a
2	3	15.04	b
3	1	4.10	c

4.3.4. Tukey para de nitratos por efecto principal del tiempo

Se han identificado que todos los tiempos estadísticamente tienen diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada tiempo es diferente sobre la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de nitratos (cuadro 27).

Cuadro 27. Prueba Tukey para de nitratos por efecto principal del tiempo.

Mérito	Tiempo (min)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	15	20.12	a
2	10	15.88	b
3	5	12.31	c

4.3.5. ANVA para nitratos por efecto simple A en B y B en A

Al realizar el análisis de los datos se observa que solo para la interacción A en b1 se obtuvo valor para $p > 0.05$, el cual indica que no existe diferencia significativa; pero en las demás interacciones se encontró diferencias

estadísticas significativas, el cual indica que al menos una de las interacciones de cada factor fue diferente el efecto simple respecto a la eficiencia de la EC en la remoción de nitratos (Cuadro 28).

Cuadro 28. ANVA para nitratos por efecto simple A en B y B en A

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A en b1	11.86	3	3.95	0.57	0.652
Error experimental	55.80	8	6.98		
A en b2	502.15	3	167.38	12.62	0.002**
Error experimental	106.14	8	13.27		
A en b3	3207.77	3	1069.26	20.31	<0.001**
Error experimental	421.12	8	52.64		
B en a1	227.71	2	113.86	30.51	<0.001**
Error experimental	22.39	6	3.73		
B en a2	401.31	2	200.65	15.84	0.004**
Error experimental	76.02	6	12.67		
B en a3	577.19	2	288.60	29.21	<0.001**
Error experimental	59.29	6	9.88		
B en a4	4109.57	2	2054.78	28.98	<0.001**
Error experimental	425.36	6	70.89		
Total	10203.70	65			

** Significativo al 99 %

4.3.6. Tukey para nitratos por efecto simple de A en B y B en A

La mayor eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos se observó en la combinación de emplear una temperatura de 75 ° C (a4) con una intensidad de corriente de 5 A (b3), el cual reportó una media de eficiencia de 56.84 % (Cuadro 29).

Cuadro 29. Prueba Tukey para nitratos por efecto simple de A en B y B en A

Interacción	Mérito	Variable	Eficiencia (%)	Significancia
A en b2	1	75 °C	25.74	a
	2	60 °C	14.23	b
	3	45 °C	11.43	b
	4	25 °C	8.78	b
A en b3	1	75 °C	56.84	a
	2	60 °C	24.68	b
	3	45 °C	20.3	b
	4	25 °C	14.85	b
B en a1	1	5 A	14.85	a
	2	3 A	8.78	b
	3	1 A	2.53	c
B en a2	1	5 A	20.3	a
	2	3 A	11.43	b
	3	1 A	3.97	b
B en a3	1	5 A	24.68	a
	2	3 A	14.23	b
	3	1 A	5.07	c
B en a4	1	5 A	56.84	a
	2	3 A	25.74	b
	3	1 A	4.83	c

4.4. Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos

En la figura 14 y 15, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de fosfatos, a temperatura de calentamiento previo de 25 °C y 45°C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

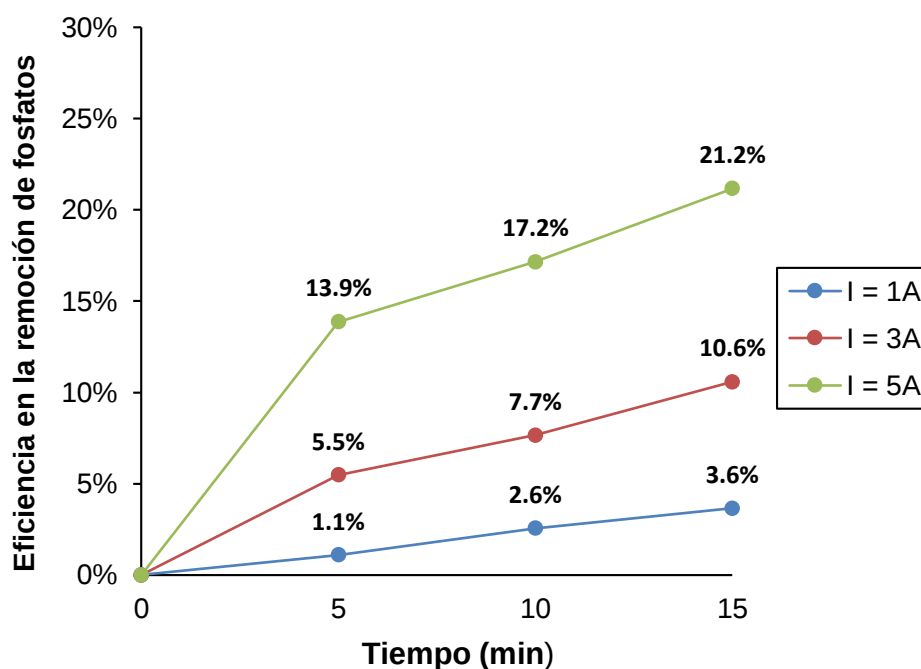


Figura 14. Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos a 25 °C.

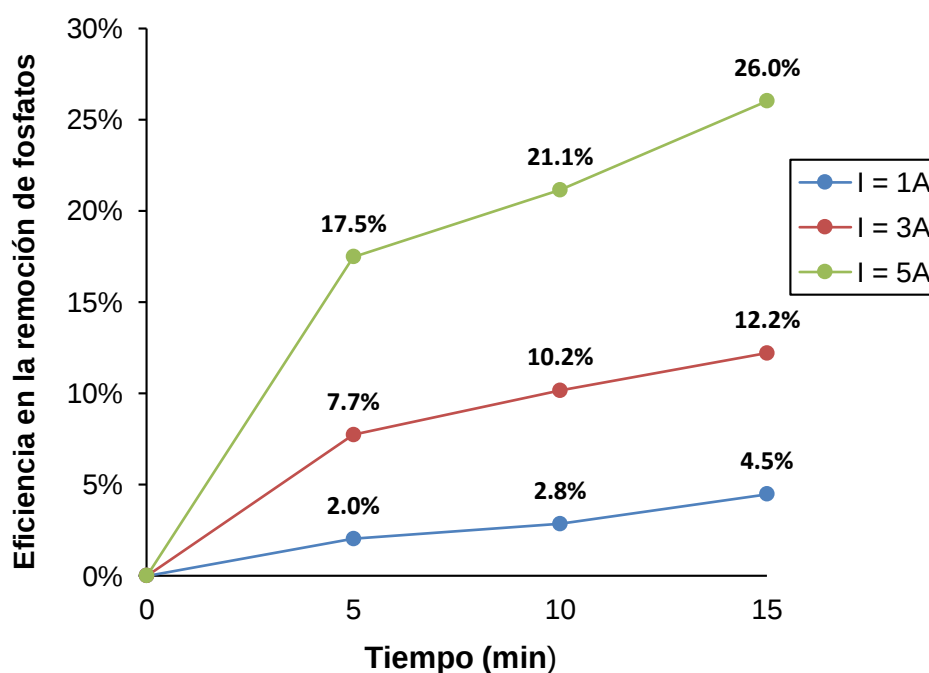


Figura 15. Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos a 45 °C.

En la figura 16 y 17, se muestra resultados de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de fosfatos, a temperatura de calentamiento previo de 60 °C y 75 °C, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente.

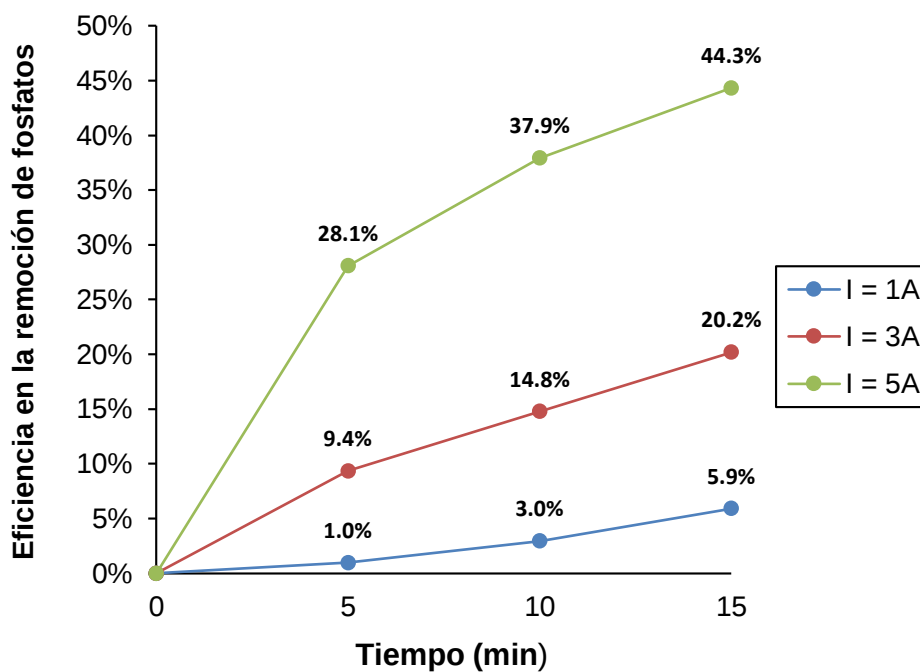


Figura 16. Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos a 60 °C.

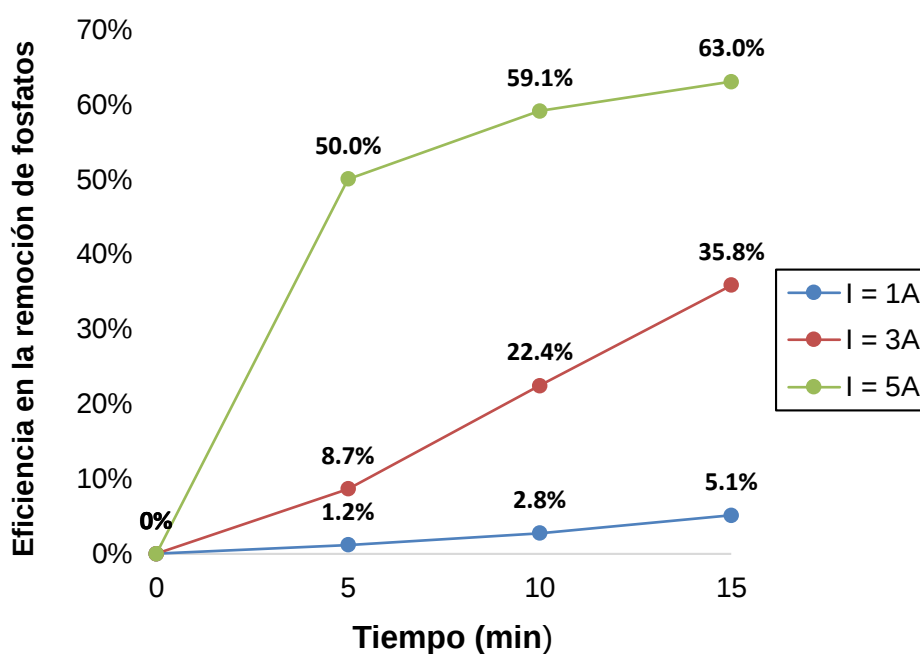


Figura 17. Eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos a 75°C.

4.4.1. ANVA para fosfatos.

Se realizó el análisis de los datos que se observan en el cuadro 30, donde se encontró la significancia de factores y en sus interacciones; se obtuvieron valores para $p < 0.05$ en todos los factores y en la interacción (AxB), lo cual indica que estos son estadísticamente significativos sobre la eficiencia de remoción de fosfatos; Mientras que las interacciones (AxC y BxC) no son significativos.

Se encontró un coeficiente de correlación r^2 de 0.970, lo que significa que el modelo estadístico propuesto explica el 97.0% de la variabilidad de la proporción de eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de fosfatos, indicando un buen ajuste del modelo a los datos recolectados.

Cuadro 30. ANVA para fosfatos.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
Temperatura* (A)	1821.339	3	607.113	72.959	<0.001**
Intensidad de corriente (B)	5662.418	2	2831.209	340.236	<0.001**
Tiempo (C)	473.091	2	236.546	28.426	<0.001**
A x B	1491.596	6	248.599	29.875	<0.001**
A x C	100.717	6	16.786	2.017	0.142
B x C	90.040	4	22.510	2.705	0.081
Error experimental	99.856	12	8.321		
Total corregido	9739.057	35			

*temperatura de calentamiento previo.

** Significativo al 99 %

4.4.2. Tukey para fosfatos por efecto principal de la temperatura

En el cuadro 31, se hacen comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey; se han identificado que todas las temperaturas estadísticamente tienen diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada temperatura de calentamiento previo es diferente sobre la eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos. Además se obtiene el mejor resultado de eficiencia para efecto principal de la temperatura a 75 °C, el cual reportó una media de eficiencia de 27,56 %.

Cuadro 31. Prueba Tukey para fosfatos por efecto principal de la temperatura

Mérito	Temperatura (°C)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	75	27.5591	a
2	60	18.2813	b
3	45	11.5628	c
4	25	9.2457	c

4.4.3. Tukey para fosfatos por efecto principal de la intensidad de corriente

Se han identificado que todas las intensidades de corriente estadísticamente tienen diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada intensidad de corriente es diferente sobre la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de fosfatos (cuadro 32).

Cuadro 32. Prueba Tukey para fosfatos por efecto principal de la intensidad de corriente.

Mérito	Intensidad de corriente (A)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	5	33.2680	a
2	3	13.7557	b
3	1	2.9630	c

4.4.4. Tukey para fosfatos por efecto del tiempo

Se han identificado que todos los tiempos estadísticamente tienen diferente significancia, esto quiere decir que el efecto principal de cada tiempo es diferente sobre la eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos (cuadro 33).

Cuadro 33. Prueba Tukey para fosfatos por efecto principal del tiempo.

Mérito	Tiempo de reacción (min)	Media de la eficiencia (%)	Significancia
1	15	21.0387	a
2	10	16.7863	b
3	5	12.1617	c

4.4.5. ANVA para fosfatos por efecto simple A en B y B en A

Al realizar el análisis de los datos se observa que para la interacción A en b1 y A con b2 se obtuvo valor para $p > 0.05$, el cual indica que no existe diferencia significativa; pero en las demás interacciones se encontró diferencias estadísticas significativas, el cual indica que al menos una de las interacciones

de cada factor fue diferente el efecto simple respecto a la eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos (Cuadro 34).

Cuadro 34. ANVA para fosfatos por efecto simple A en B y B en A

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A en b1	1.23	3	0.41	0.12	0.943
Error experimental	26.52	8	3.32		
A en b2	366.96	3	122.32	2.17	0.169
Error experimental	450.90	8	56.36		
A en b3	2944.74	3	981.58	27.43	<0.001**
Error experimental	286.29	8	35.79		
B en a1	343.92	2	171.96	23.91	<0.001**
Error experimental	43.16	6	7.19		
B en a2	520.01	2	260.01	31.33	<0.001**
Error experimental	49.79	6	8.30		
B en a3	1738.35	2	869.17	25.42	<0.001**
Error experimental	205.13	6	34.19		
B en a4	4551.74	2	2275.87	29.33	<0.001**
Error experimental	465.62	6	77.60		
Total	11994.36	65			

** Significativo al 99 %

4.4.6. Tukey para fosfatos por efecto simple de A en B y B en A

La mayor eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos se observó en la combinación de emplear una temperatura de 75 ° C (a4) con una intensidad

de corriente de 5 A (b3), el cual reportó una media de eficiencia de 57.35 % (Cuadro 35).

Cuadro 35. Prueba Tukey para fosfatos por efecto simple de A en B y B en A

interacción	Mérito	Variable	Eficiencia (%)	Significancia
A en b3	1	75 °C	57.35	a
	2	60 °C	36.78	b
	3	45 °C	21.54	c
	4	25 °C	17.40	c
B en a1	1	5 A	17.40	a
	2	3 A	7.91	b
	3	1 A	2.43	b
B en a2	1	5 A	21.54	a
	2	3 A	10.03	b
	3	1 A	3.12	c
B en a3	1	5 A	36.78	a
	2	3 A	14.78	b
	3	1 A	3.28	b
B en a4	1	5 A	57.35	a
	2	3 A	22.31	b
	3	1 A	3.02	b

V. DISCUSIÓN

Sobre la eficiencia de la EC en la remoción de la DBO₅; el uso de 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y con tiempos de 10 y 15 min, presentaron eficiencia de remoción de DBO₅ del 96.28% y 93.85% respectivamente, siendo estos resultados estadísticamente similares; valores inferiores reporta BARBOZA (2011) al tratar las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá empleando la misma técnica considerado en el estudio, donde concluyó que la aplicación de 25 minutos, con densidad de corriente de 125 A/m² y a 45 min de tratamiento logro disminuir hasta 89.5% de DBO₅. Los resultados obtenidos posiblemente debido altas densidades de corriente, aumenta el tamaño de las burbujas producidas en los electrodos, por lo tanto CHEN (2004) recomienda el empleo de densidades de corriente inferiores a 20-25 A/m² para el buen funcionamiento del proceso de electrocoagulación.

JARAMILLO (2012) diseño y construyo un reactor de electrocoagulación para el estudio del tratamiento del agua residual de tintura y acabado textil, logrando 64.8% de remoción en la DBO₅, en ensayos tipo bath, en un tiempo de 3 min y a una intensidad de corriente de 3 A. también, KIRZHNER, ZIMMELS y SHRAIBER (2012) trataron aguas residuales de bodegas altamente contaminadas, al utilizar electrodos de aluminio y 2.5 A de intensidad de corriente, demostraron que a mayores periodos de tratamiento existe mejor eficiencia en la remoción de contaminantes, a 10 minutos se produjo

entre 16.4 – 27.9% de reducción de DBO_5 y los 40 minutos se obtuvo 52.4%. Por otro lado, FARRERAS (1992) en su libro Medicina Interna, menciona que las proteínas, debido al gran tamaño de sus moléculas, forman con el agua soluciones coloidales. Estas soluciones pueden precipitar con formación de coágulos al ser calentadas a temperaturas superiores a los 70 °C.

De acuerdo los análisis de varianza y a las pruebas Tukey, la intensidad de corriente, tiempo y la temperatura de calentamiento previo ejercen fuerte influencia en la remoción de la DBO_5 , estos resultados concuerdan con los autores señalados anteriormente. Las temperaturas de 60 y 75 °C reportan una media de 44.85% y 44.2% respectivamente, es decir a mayor temperatura presentan mayor efecto en la remoción. Por otro lado, a mayor intensidad de corriente y tiempo se reporta mayor media de remoción de 67.2% y 45.12% respectivamente.

Al analizar la temperatura con intensidad de corriente, se determinó que el mayor efecto simple de remoción con una media de 89.95% se da al emplear 75 °C y 5 A. Por otro lado, no existe efecto simple significativo al combinar la temperatura con tiempo. Finalmente, al combinar intensidad de corriente con el tiempo, se determinó que mayores efectos simples y estadísticamente iguales al utilizar 5 A en tiempos de 5, 10 y 15 min, las cuales reportaron una media de 61.92%, 67.69% y 72.00% de remoción.

Sobre la eficiencia de la EC en la remoción de ST; el uso de 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo, presentaron eficiencia de remoción de 97.8%, valores inferiores reporta DAVILA *et al.* (2009), al investigar la reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico

total y sólidos totales en vinazas mediante electro-flotación/oxidación, con electrodos acero galvanizado y a 400 A/m^2 presentó el mejor desempeño 59% remoción de solidos totales. Esto se podría atribuir a que, con altas densidades de corriente, aumenta el tamaño de las burbujas producidas en los electrodos, lo que genera una alteración en el proceso de remoción de sólidos por flotación (CHEN, 2004); en esta investigación se trabajó con 50 A/m^2 de intensidad de corriente.

CUEVA y HUAROC (2015), al emplear dos electrodos uno de hierro y aluminio con un espesor de 1 cm, con una separación de 2 cm, para el tratamiento de los efluentes de origen lácteo, en un reactor con un volumen de 2 L; obteniendo como el máximo porcentaje de remoción de solidos totales 83.11%, a una densidad de corriente 44.2 A/m^2 y un tiempo de 25 minutos. Así mismo, RICCIO (2015), utilizó electrodos de aluminio y fierro con una separación de 1 cm, una densidad de corriente de 32.72 A/m^2 y un tiempo de 20 min, obteniendo a estas condiciones la remoción 52.91% de sólidos totales.

De acuerdo los análisis de varianza y a las pruebas Tukey, la intensidad de corriente, tiempo y la temperatura de calentamiento previo ejercen fuerte influencia en la remoción de ST, estos resultados concuerdan con los autores señalados anteriormente. Todas las temperaturas, intensidades de corriente y tiempos por separado, estadísticamente tienen diferente significancia y además el efecto principal es creciente, por lo tanto al trabajar a mayor factor presentan mejores resultados, reportando una media de 48.52% a 75°C , 58.66% a 5 A y 39.76% a 15 min.

Al analizar la temperatura con intensidad de corriente, se determinó que el mayor efecto simple de remoción con una media de 89.22% se da al emplear 75 °C y 5 A. Por otro lado, no existe efecto simple significativo al combinar la intensidad de corriente con tiempo. Finalmente, al combinar temperatura con tiempo, se determinó mayor efecto simple de remoción con una media de 58.13% se da al emplear 75 °C y 15 min.

Sobre la eficiencia de la EC en la remoción de nitratos; el uso de 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo, presentaron eficiencia de remoción de 70.2%, valores similares reporta CABRERA (2017), al evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes de las aguas residuales porcinas mediante el uso de coagulantes y consorcios microbianos en la granja porcina, obteniendo resultados de remoción de nitratos 68.6 %. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en esta investigación, ya que este tipo de efluente presenta similares características a las de un matadero.

De acuerdo los análisis de varianza y a las pruebas Tukey, la intensidad de corriente, tiempo y la temperatura de calentamiento previo ejercen influencia en la remoción de nitratos. Además, todas las temperaturas, intensidades de corriente y tiempos por separado, estadísticamente tienen diferente significancia y por lo que el efecto principal es creciente, por lo tanto al trabajar a mayor factor presentan mejores resultados, reportando una media de 29.13% a 75 °C, 29.17% a 5 A y 20.12% a 15 min.

Al analizar la temperatura con intensidad de corriente, se determinó que el mayor efecto simple de remoción con una media de 56.84% se da al emplear 75 °C y 5 A. Por otro lado, no existe efecto simple significativo al

combinar la temperatura con tiempo y finalmente, al combinar intensidad de corriente con el tiempo, no existe efecto simple significativo.

Sobre la eficiencia de la EC en la remoción de fosfatos; el uso de 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo, presentaron eficiencia de remoción de 63%, valores mayores reporta CAMARGO (2015), al investigar la remoción de fósforo del lactosuero ácido residual mediante el proceso de electrocoagulación a nivel de laboratorio, en función del tiempo y en las diferentes soluciones de pH, obtiene así un 83.3% de remoción de fosfato en 3 horas y un 84.24 % en 4 Horas. Esto se podría atribuir al tiempo de residencia tal como indica PRIETO *et al* (2012), determina que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación.

De acuerdo los análisis de varianza y a las pruebas Tukey, la intensidad de corriente, tiempo y la temperatura de calentamiento previo ejercen influencia en la remoción de nitratos. Además, todas las temperaturas, intensidades de corriente y tiempos por separado, estadísticamente tienen diferente significancia y por lo que el efecto principal es creciente, por lo tanto al trabajar a mayor factor presentan mejores resultados, reportando una media de 27.56% a 75 °C, 32.27% a 5 A y 21.04% a 15 min.

Al analizar la temperatura con intensidad de corriente, se determinó que el mayor efecto simple de remoción con una media de 57.35% se da al emplear 75 °C y 5 A. Por otro lado, no existe efecto simple significativo al

combinar la temperatura con tiempo y finalmente, al combinar intensidad de corriente con el tiempo, no existe efecto simple significativo.

VI. CONCLUSIONES

1. La electrocoagulación al usar 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y con tiempos de 10 y 15 min, logra una eficiencia en la remoción de la DBO₅ en 96.28% y 93.85% respectivamente.
2. La electrocoagulación logra una eficiencia en la remoción de ST en un 97.8%, al usar 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo.
3. La electrocoagulación logra una eficiencia en la remoción de nitratos en un 70.2%, al usar 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo.
4. La electrocoagulación logra una eficiencia en la remoción de fosfatos en un 63%, al usar 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo.

VII. RECOMENDACIONES

1. Caracterizar parámetros físicos y químicos del efluente del matadero en estudios posteriores.
2. En este estudio no se probó con configuraciones bipolares en serie y según algunos artículos pueden disminuir el consumo de energía, por lo cual se sugiere hacer pruebas para su verificación.
3. En las pruebas de laboratorio se utilizó como material para los electrodos el hierro y el aluminio, por lo cual se recomienda realizar pruebas con otros materiales como acero inoxidable, cobre, etc.
4. Analizar de la cantidad de aluminio residual que puede contener el agua tratada, y algún tratamiento posterior a la electrocoagulación, que permita su remoción.
5. Determinar el costo de operación por m³ de agua residual tratada.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, E. 2015. Evaluación de la Eficiencia de una Celda de Electrocoagulación a Escala Laboratorio Para el Tratamiento de Agua. Tesis Mg. Ciencias Ambientales. Lima, Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. p. 40-48.
- APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Ed. Washington, D.C., American Public Health Association.
- ARANGO, A. 2005. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Rev. Lasallista de Investigación. Antioquia, Colombia. Vol. 2, N° 1. p. 48-60.
- ARANGO, A. y GARCES, F. 2007. Diseño de una celda de electrocoagulación. Rev. Universidad EAFIT. Antioquia, Colombia. Vol. 43, N° 147. p. 147-67.
- ARBOLEDA, V. 1992. Teoría y práctica de la purificación del agua. Santafé, Bogotá. Tercera edición. Tomo 1. 43 p.
- ARBOLEDA, J y HERRERA, P. 2015. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio. Bogotá, Colombia. Universidad Santo Tomás. 107p.

- BARRENECHEA, A. 2004. Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida. Manual I, Capítulo 1-4, CEPIS, Lima.
- BARAJAS, M. 2002, Tesis Doctoral: Eliminación Biológica de nutrientes en un reactor biológico secuencial. Caracterización y estimulación de las fuentes de carbono del agua residual urbana. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 325p.
- BARBOZA, G. 2011. Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá – Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación. Tesis MSc. Ciencias con mención en química. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. 131p.
- CABRERA, A. 2017. Tratamiento de las aguas residuales porcinas mediante la electrocoagulación y consorcios microbianos, en la Granja Porcina Municipales. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- CAMARGO, C. 2015. Remoción de Fósforo del Lactosuero Ácido Residual Mediante el Proceso de Electrocoagulación a Nivel de Laboratorio. Tesis. Ing. Ambiental. Junín, Perú.
- CHAVEZ, A., CRISTANCHO, D., OSPINA, E. 2009. Una alternativa limpia para el tratamiento de aguas residuales galvanizadas: Rev. Vol. 5 N° 14. Ingenierías. Medellín, Colombia. p. 40 – 50.
- CHEN, G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology 38. p. 11-41.

- COLLADO, R. 1993. Depuración de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades. Colección Señor N° 12. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- COLLAZOS, C. 2008. Tratamiento de Aguas Residuales - Generalidades. Recuperado el 1 de Julio de 2012, de Universidad Nacional de Colombia: (http://www.ing.unal.edu.co/catedra/drs_diaz_collazos).
- CORTADA, A. 2003. Aplicación de microorganismos de acción dirigida al tratamiento de aguas residuales industriales. La Habana, Cuba.
- CUEVA, R., HUAROC. A. 2015. Remoción de los Contaminantes de Aguas Residuales de la Planta Lechera “Mantaro” por el Método de Electrocoagulación Mediante Energía Eólica, a Nivel de Laboratorio. Tesis. Ing. Químico. Huancayo, Perú.
- DAVILA, J. MACHUCA, F. MARRIANGA, N. 2009. Reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico y sólidos totales en vianzas mediante electroflotación/oxidación. Rev. Ingeniería e investigación. Bogotá, Colombia. Vol. 29 N° 1. p. 35-38.
- FARRERAS, P. 1992. Medicina Interna 1° ed. Editorial Doyma S.A. Madrid, España.
- GILPAVAS, E., DARIO, E., SIERRA, L., WHITE, C., OVIEDO, C., RESTREPO, P. 2008. Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. GIPAB. Medellin, Colombia. Universidad EAFIT. 74p.
- JARAMILLO, E. 2012. Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio de tratamiento de agua residual de tintura y acabado

- textil. Tesis Ing. Textil. Ibarra, Ecuador. Universidad Técnica del Norte. 136p.
- KIRZHNER, F, ZIMMELS, Y. SHRAIBER, Y. 2012. Combined treatment of highly contaminated winery wastewater. Rev. ELSEVIER. Haifa, Israel. 38-44.
- MARA, 1976. Incorporating all amendments up to 1 January 2006. PUBLISHED BY. THE COMMISSIONER OF LAW REVISION, MALAYSIA.
- MARTINEZ, F. 2007. Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. Tesis Dr. Ing. Química. Ciudad Real, España. Universidad de Castilla la Mancha. 259p.
- METCALF y EDDY. 1996. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. México. Vol. 3. p. 22 -34.
- MOLLAH, M., SCHENNACH, R., PARGA, J., COCKE, D. 2001. Electrocoagulation (EC) - Science and applications. Gill Chair of Chemistry & Chemical Engineering, Lamar University. Rev. ELSEVIER, USA, p. 29 - 41.
- MORENO, J. 1907. Tratamiento de aguas residuales y su reutilización en el riego de los cultivos agrícolas de Ciudad de la Habana. I Seminario Aguas Residuales.
- MIRANDA, J. 2006. Tratamiento analítico de las aguas servidas, Universidad de Chile. Disponible en <http://cabierta.uchile.cl/revista/6/aguas.htm>.
- OROZCO, A. 2005. Bioingeniería de aguas residuales; teoría y diseño. Acodal. 3ra ed. Bogotá, Colombia. 412 p.

- PRIETO, F., CALLEJAS, J., REYES, V., MARMOLEJO, Y. 2012. Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lacto suero residual. Rev. AIDIS. Hidalgo, México. Vol. 5, N° 3. p. 51-77.
- RESTREPO, A., ARANGO, A., GARCÉS, L. 2006. La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Vol. 1 N° 2. Antioquia, Colombia. p. 58-77.
- RAJESHWAR, K. 1997. Environmental electrochemistry: Fundamentals and Applications in pollution abatement. San Diego, California: Academic Press limited, 776p.
- RAMALHO, R. 1996. Tratamiento de aguas residuales. 2da ed. Barcelona. Editorial reverté, S.A. p. 707-715.
- RAMIREZ, S. 2013. Remoción de cromo hexavalente por medio de la electrocoagulación. Tesis Ing. Ambiental. Querétaro, España. Universidad Tecnológica de Querétaro. 52p.
- RICCIO, L. 2015. Remoción de Contaminantes de Aguas Residuales Urbanas del Colector Agua de las Vírgenes por Electrocoagulación, a Nivel de Laboratorio, Utilizando como Fuente Energética un Panel Fotovoltaico. Tesis. Dr. Ing. Química y Ambiental. Huancayo, Perú.
- SARALA, C. 2012. Domestic wastewater treatment by electrocoagulation with Fe-Fe electrodes. Journal of engineering trends and technology. Vol. 8 N° 4. Hyderabad, India. p. 530-533.
- SIGNORINI, M., CIVIT, S., BONILLA, M., CERVANTES, M., CALDERON, M., PEREZ, A., DEL PILAR, M., ALMANZA, C. 2006. Evaluación de

riesgos de los rastros y mataderos municipales. México D.F, México.

Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios. 62p.

TAKE, M., SHAIKH, T., MANE, N., MAJUNDER, D. 2002. Biorremediacion of xenobioticos: Use of dead fundal biomass as biosorbent. India. 5p.

OCKERMAN, H. 1994. Industrialización de Subproductos de Origen Animal 1° ed. Editorial Acribia S.A. Zaragoza, España.

IX. ANEXOS

Anexo A. Resultados de análisis

Cuadro 36. Eficiencia de remoción de la DBO₅ (%).

Temperatura* (°C)	Intensidad de corriente eléctrica (A)								
	1			3			5		
	Tiempo (min)								
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
25	1.3	1.6	8.3	14.0	43.1	46.2	48.1	49.5	52.1
45	3.4	4.4	6.5	21.6	23.5	50.1	51.4	52.4	56.7
60	1.8	10.0	20.0	36.9	46.0	62.5	68.4	75.0	83.0
75	3.3	9.3	13.7	25.0	30.7	46.1	79.7	93.8	96.3

*temperatura de calentamiento previo.

Cuadro 37. Eficiencia de remoción de ST (%)

Temperatura* (°C)	Intensidad de corriente eléctrica (A)								
	1			3			5		
	Tiempo (min)								
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
25	1.3	4.8	10.9	15.6	19.2	23.8	31.4	34.9	39.8
45	2.3	7.0	10.9	15.4	23.0	29.3	35.7	43.2	49.0
60	1.5	5.6	16.6	23.2	30.2	44.8	56.9	67.6	77.7
75	2.7	14.0	21.1	31.7	43.9	55.6	79.3	90.7	97.8

*temperatura de calentamiento previo.

Cuadro 38. Eficiencia de la remoción de nitratos (%).

Temperatura* (°C)	Intensidad de corriente eléctrica (A)								
	1			3			5		
	Tiempo (min)								
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
25	1.0	2.5	4.1	7.3	8.4	10.6	12.2	15.4	17.0
45	1.7	4.0	6.2	8.8	11.0	14.4	15.6	19.8	25.5
60	1.8	5.4	8.1	11.6	14.3	16.7	21.5	23.9	28.7
75	1.3	5.4	7.8	20.4	24.7	32.2	44.5	55.8	70.2

*temperatura de calentamiento previo.

Cuadro 39. Eficiencia de la remoción de fosfatos (%).

Temperatura* (°C)	Intensidad de corriente eléctrica (A)								
	1			3			5		
	Tiempo (min)								
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
25	1.1	2.6	3.6	5.5	7.7	10.6	13.9	17.2	21.2
45	2.0	2.8	4.5	7.7	10.2	12.2	17.5	21.1	26.0
60	1.0	3.0	5.9	9.4	14.8	20.2	28.1	37.9	44.3
75	1.2	2.8	5.1	8.7	22.4	35.8	50.0	59.1	63.0

*temperatura de calentamiento previo.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos
Celular 941531359 - 982047050
analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:		YAYDER Y. ALVINO ALBORNOZ		PROCEDENCIA		TINGO MARIA	
Cod. Lab	Tipo	Temperatura de calentamiento previo (°C)	Corriente Eléctrica (A)	Tiempo (min)	Nitratos (NO ₃ -) mg/L	Fosfatos (PO ₄ -3) mg/L	
M0640	SOLUCION ACUOSA	Ta1	0	0	39.5	27.4	
M0641	SOLUCION ACUOSA		1	5	39.1	27.1	
M0642	SOLUCION ACUOSA			10	38.5	26.7	
M0643	SOLUCION ACUOSA			15	37.9	26.4	
M0644	SOLUCION ACUOSA		3	5	36.6	25.9	
M0645	SOLUCION ACUOSA			10	36.2	25.3	
M0646	SOLUCION ACUOSA			15	35.3	24.5	
M0647	SOLUCION ACUOSA		5	5	34.7	23.6	
M0648	SOLUCION ACUOSA			10	33.4	22.7	
M0649	SOLUCION ACUOSA			15	32.8	21.6	
M0650	SOLUCION ACUOSA	45	0	0	35.3	24.6	
M0651	SOLUCION ACUOSA		1	5	34.7	24.1	
M0652	SOLUCION ACUOSA			10	33.9	23.9	
M0653	SOLUCION ACUOSA			15	33.1	23.5	
M0654	SOLUCION ACUOSA		3	5	32.2	22.7	
M0655	SOLUCION ACUOSA			10	31.4	22.1	
M0656	SOLUCION ACUOSA			15	30.2	21.6	
M0657	SOLUCION ACUOSA		5	5	29.8	20.3	
M0658	SOLUCION ACUOSA			10	28.3	19.4	
M0659	SOLUCION ACUOSA			15	26.3	18.2	

TINGO MARIA 18 DE ENERO 2018
 RECIBO N° 0467792
 MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

Ing. Luis C. Mensilla Minaya
 JEFE

Figura 18. Resultados de análisis especial de nitratos y fosfatos.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos
Celular 941531359 - 982047050
analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:		YAYDER Y. ALVINO ALBORNOZ		PROCEDENCIA		TINGO MARIA	
Cod. Lab	Tipo	Temperatura de calentamiento previo (°C)	Corriente Eléctrica (A)	Tiempo (min)	Nitratos (NO ₃ -) mg/L	Fosfatos (PO ₄ -3) mg/L	
M0660	SOLUCION ACUOSA	60	0	0	33.5	20.3	
M0661	SOLUCION ACUOSA		1	5	32.9	20.1	
M0662	SOLUCION ACUOSA			10	31.7	19.7	
M0663	SOLUCION ACUOSA			15	30.8	19.1	
M0664	SOLUCION ACUOSA			3	5	29.6	18.4
M0665	SOLUCION ACUOSA		10		28.7	17.3	
M0666	SOLUCION ACUOSA		15		27.9	16.2	
M0667	SOLUCION ACUOSA		5		26.3	14.6	
M0668	SOLUCION ACUOSA		5	10	25.5	12.6	
M0669	SOLUCION ACUOSA			15	23.9	11.3	
M0670	SOLUCION ACUOSA			0	37.3	25.4	
M0671	SOLUCION ACUOSA		75	1	5	36.8	25.1
M0672	SOLUCION ACUOSA	10			35.3	24.7	
M0673	SOLUCION ACUOSA	15			34.4	24.1	
M0674	SOLUCION ACUOSA	3			5	29.7	23.2
M0675	SOLUCION ACUOSA			10	28.1	19.7	
M0676	SOLUCION ACUOSA			15	25.3	16.3	
M0677	SOLUCION ACUOSA			5	5	20.7	12.7
M0678	SOLUCION ACUOSA	10			16.5	10.4	
M0679	SOLUCION ACUOSA	15			11.1	9.4	

TINGO MARIA 18 DE ENERO 2018
RECIBO N° 0467792
MUESTREO POR EL SOLICITANTE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LAB. ANALISIS DE SUELOS
Ing° Luis G. Mansilla Minaya
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMIA
Laboratorio de Análisis de Suelos
Tingo Maria

Figura 19. Resultados de análisis especial de nitratos y fosfatos.

ANEXO B. Fotos



Figura 20. Fuente de energía de 0-18V y 0-5A en el laboratorio de física.

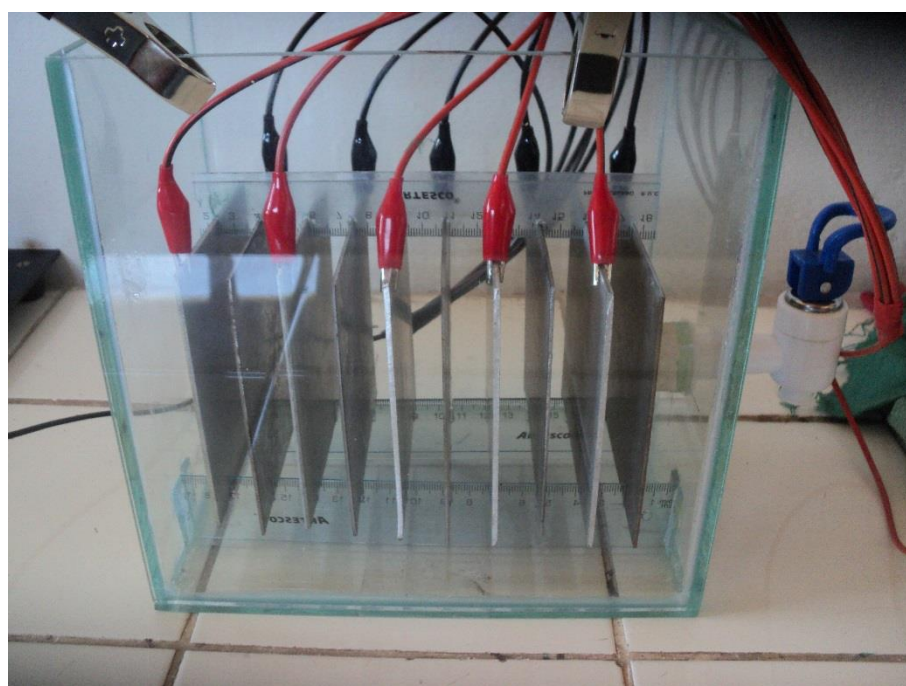


Figura 21. Montaje de la celda de electrocoagulación en el laboratorio de física.

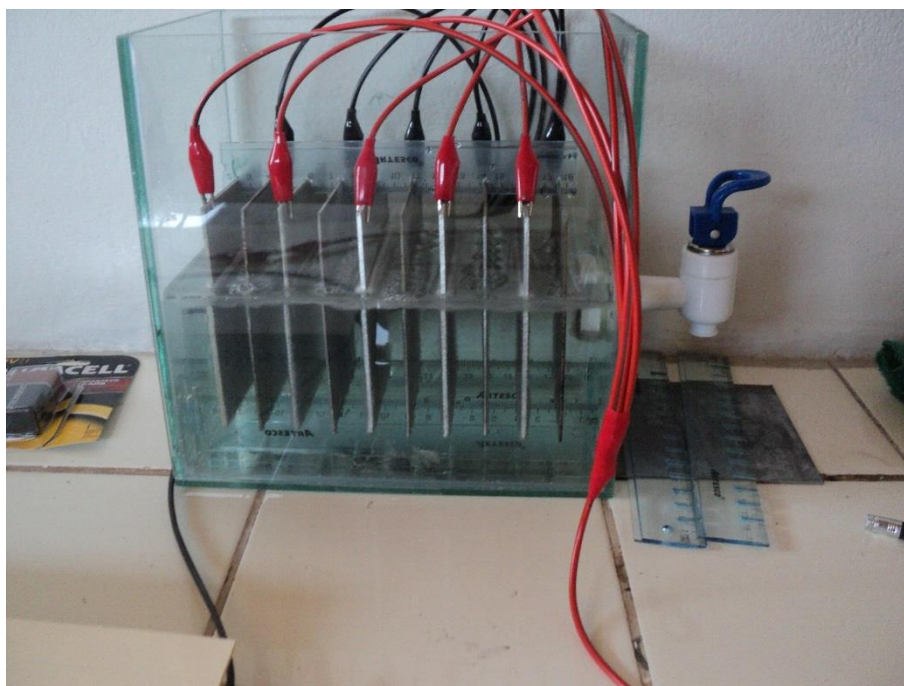


Figura 22. Pruebas preliminares con agua de grifo.



Figura 23. Recolección de agua residual de matadero municipal de Tingo María.



Figura 24. Calentamiento previo.

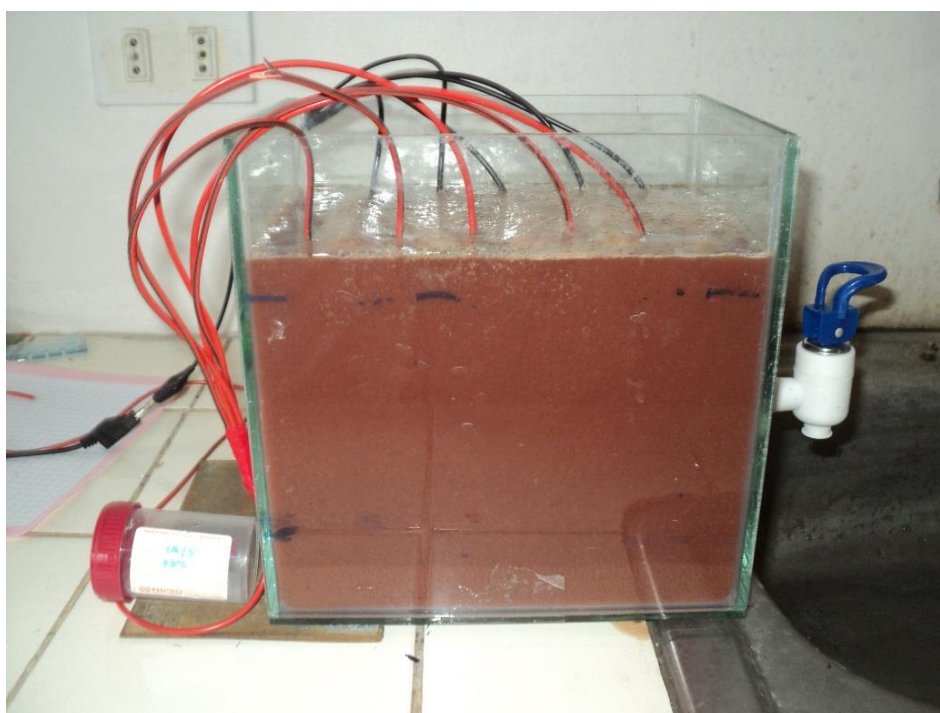


Figura 25. Etapa experimental a 75 °C de calentamiento previo, 5A y 0 min.



Figura 26. Etapa experimental a 75 °C de calentamiento previo, 5A y 5 min.



Figura 27. Etapa experimental a 75 °C de calentamiento previo, 5A y 10 min.



Figura 28. Etapa experimental a 75 °C de calentamiento previo, 5A y 15 min.



Figura 29. Toma de muestras para determinar la DBO₅, ST, nitratos y fosfatos.



Figura 30. Midiendo la cantidad de oxígeno disuelto de las muestras.