

Método de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Joya de los Sachas- Ecuador

Jennifer Alexandra Orejuela-Romero¹  Karla Viviana Torres Ibarra²  Luis Miguel Santillán-Quiroga³ 
Hugo Rolando Sánchez Quispe⁴  Marlon Moscoso-Martínez^{5,6} 

¹Grupo Yasuní-SDC, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Sede Orellana, Coca 220150, Ecuador.

² Investigador independiente.

³Grupo de Energías Alternativas y Ambiente-Espoch GEAA, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba 060155, Ecuador

⁴Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Sede Orellana, grupo de investigación Causana Yachay

⁵Instituto de Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España

⁶Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur km 1 1/2, 060106 Riobamba, Ecuador;

✉ Correspondencia: alexandra.orejuela@epoch.edu.ec  + 593 999417384

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj72150>

Resumen: El Camal Municipal del Cantón La Joya de Los Sachas procesa bovinos y porcinos, generando aguas residuales con alta carga orgánica contaminante. Este estudio evaluó la eficacia del método de electrocoagulación (EC) a escala de laboratorio para tratar estas aguas residuales. Utilizando un diseño experimental factorial 4X2 con un total de 8 pruebas experimentales, la investigación se dividió en tres fases. La fase I analizó los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua residual. En la fase II se evaluó la eficacia de la electrocoagulación, y en la fase III se compararon los resultados con los límites máximos permisibles de la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua (TULSMA, LIBRO VI ANEXO 1). Los resultados mostraron porcentajes de remoción destacables en Conductividad Eléctrica (54,82%), DQO (68,13%), DBO (68,45%), Sólidos Totales Suspendidos (63,64%) y Turbidez (73,80%). Análisis estadísticos de Wilcoxon confirmaron la significancia de las diferencias entre condiciones iniciales y post-tratamiento. Aunque la electrocoagulación mostró capacidad de reducir la carga contaminante, los resultados no cumplieron con los límites máximos permisibles establecidos por la norma vigente.

Palabras claves: <Eficacia>, <Electrocoagulación>, <Efluente>, <Wilcoxon>, <Parámetros>, <Tratamiento>

Electrocoagulation for wastewater treatment at the Joya de los Sachas municipal slaughterhouse - Ecuador.

Abstract: The Municipality of Camal, Cantón La Joya de Los Sachas, processes cattle and pigs, generating wastewater with a high organic



Cita: Orejuela-Romero, J. A., Ibarra, K. V. T., Santillán-Quiroga, L. M., Quispe, H. R. S., & Moscoso-Martínez, M. (2024). Método de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Joya de los Sachas- Ecuador. Green World Journal, 07(02), 150. <https://doi.org/10.53313/gwj72150>

Received: 21/May /2024

Accepted: 08/Aug /2024

Published: 09/Aug /2024

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2024 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license. Creative Commons Attribution (CC BY). <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

load. This study evaluated the efficacy of electrocoagulation at laboratory scale for the treatment of this wastewater. Using a 4X2 factorial design with a total of 8 experimental trials, the research was divided into three phases. Phase I analysed the physico-chemical and biological parameters of the wastewater. Phase II evaluated the efficacy of electrocoagulation and Phase III compared the results with the maximum permissible limits of the Environmental Quality Standard and Discharge of Effluent into Water Resources (TULSMA, BOOK VI ANNEX 1). The results showed remarkable removal percentages for electrical conductivity (54.82%), COD (68.13%), BOD (68.45%), total suspended solids (63.64%) and turbidity (73.80%). Wilcoxon statistical analyses confirmed the significance of the differences between baseline and post-treatment conditions. Although electrocoagulation showed the ability to reduce the pollutant load, the results did not meet the limits set by the current standard.

Keywords: <Effectiveness>, <Electrocoagulation>, <Effluent>, <Wilcoxon>, <Parameters>, <Treatment>.

1. Introducción

La población mundial ha experimentado un crecimiento acelerado generando mayor demanda de alimentos. Y para satisfacer las necesidades de la población las industrias alimentarias han intensificado su producción. Es así que, los centros de faenamiento de animales de consumo se han convertido en el principal mecanismo de obtención de esta materia prima [1]. Permitiendo asociar el aumento poblacional con la producción cárnica. Influyendo así, el proceso de faenamiento directamente en la generación de grandes volúmenes de aguas residuales, consideradas peligrosas y descargadas en cuerpos hídricos naturales. [2]

Ecuador cuenta con más de 200 mataderos que se distribuye en un 45% en la sierra, 38% en la costa y el 17% entre la Amazonía y Galápagos. Los bovinos son la especie animal faenada más contaminante, dado los productos líquidos residuales que se generan como: el contenido ruminal, sistema gastrointestinal, sangre, orina y agua del aseo del camal [3]. Esta sobreproducción de desechos incide directamente en la generación de volúmenes de aguas residuales considerables, que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente. [4]

En la amazonia del Ecuador la producción bovina se introdujo en la década de los sesenta como consecuencia de la migración y colonización de aquella época [5]. La ganadería se considera como una de las actividades agropecuarias que causa mayor impacto negativo sobre el entorno amazónico reduciendo la biodiversidad y provocando la contaminación del agua [6][7]. Con aproximadamente 46.911 cabezas de ganado vacuno distribuidas en sus distintos cantones. La provincia de Orellana cuenta con alrededor de 11 centros de faenamiento en operación tanto públicos como privados, destinados al procesamiento de animales bovinos, porcinos y aves [8][9].

Las aguas residuales resultantes del faenamiento deben ser tratadas previo a su disposición final [3]. En relación con la gestión de aguas residuales en estos centros, se han implementado diversas alternativas como el uso de plantas de tratamiento de aguas residuales y la reutilización del agua tratada en áreas específicas [1]. Sin embargo, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del Camal Municipal del Cantón La Joya de los Sachas presenta deficiencias. La infraestructura actual no abastece la demanda del servicio [10]. Además, la PTAR no está en funcionamiento por falta de reactivos y desengrasantes necesarios para el tratamiento.

Para el tratamiento de distintos tipos de aguas residuales incluidas las procedentes de mataderos, zonas urbanas e industrias textiles, la electrocoagulación ha surgido como un método eficaz. Los estudios han demostrado reducciones significativas de contaminantes como la DBO₅, la DQO, la turbidez y el color [11]; [12]; [13]. En esta técnica se emplea electrodos y corriente eléctrica para eliminar contaminantes, y factores como la densidad de corriente, el tiempo de retención, la configuración de los electrodos, así como los materiales empleados influyen en la eficiencia del tratamiento [11]. Las investigaciones han demostrado tasas de eliminación superiores al 90% para la DQO, el 94% para la turbidez y el 97% para el color en varios tipos de aguas residuales [14]. Sin

embargo, la electrocoagulación puede aumentar los niveles de conductividad y pH en el agua tratada[14]. De manera general, la electrocoagulación es una gran alternativa para el tratamiento de aguas residuales en diferentes entornos industriales y urbanos.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en evaluar la eficacia del método de electrocoagulación a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales del Camal Municipal del Cantón La Joya de los Sachas, proporcionando datos que sean de importancia para futuros proyectos a escala industrial y contribuyendo a la gestión ambiental y sostenible de los desechos de la industria ganadera en la región.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio comprendió el Camal Municipal del Cantón La Joya de los Sachas, perteneciente a la provincia de Orellana, situado en la región amazónica de Ecuador, con una población de aproximadamente 35.935 habitantes[15]

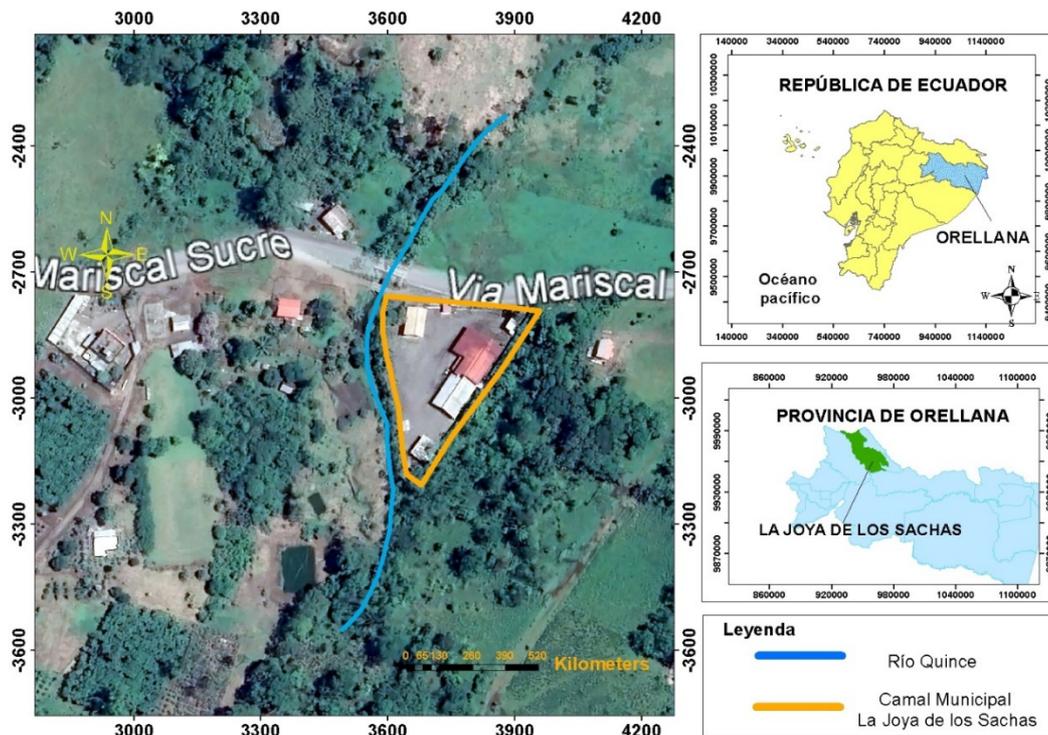


Figura 1. Mapa de ubicación del camal municipal del cantón de la Joya de los Sachas

1.2 Metodología

En esta investigación se evaluó la eficacia del método de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales provenientes del Camal Municipal La Joya de los Sachas. El estudio incluyó un análisis fisicoquímico y biológico para la caracterización de las aguas residuales generadas en el faenamiento. Se llevó a cabo la experimentación con un prototipo a escala de laboratorio empleando el método de electrocoagulación. La investigación buscó establecer la eficacia de este método en comparación con los estándares establecidos por la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua (TULSMA, LIBRO VI ANEXO 1). De esta manera se buscó obtener

conclusiones relevantes, generando datos que sean de importancia para futuros proyectos a escala industrial y contribuir a la gestión ambiental y sostenible de la región.

1.2.1 Análisis fisicoquímico y biológico del agua residual del Camal

Se recolectaron las muestras del agua residual a estudiar, aplicando las normas INEN 2176:98, "Agua: Calidad del agua, muestreo y técnicas de muestreo". Los análisis fisicoquímico y biológico se realizaron en el Laboratorio del Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Orellana (GADPO), donde se analizaron los siguientes parámetros: pH, DQO, DBO, Sólidos Totales Suspendidos, Coliformes Fecales y turbidez, aplicando el Estándar Methods 23rd Ed. Tras la recolección de las muestras, se etiquetaron los envases ámbar con la hora, fecha y ubicación correspondiente, siguiendo las pautas establecidas en la norma INEN 2176:98, "Agua: Calidad del agua, muestreo y técnicas de muestreo". Este proceso garantizó el registro preciso de la información, cumpliendo los estándares normativos y asegurando la integridad de las muestras durante su análisis en el laboratorio.

Para determinar la turbidez, se empleó el método SM 2130 B, 23rd Ed. Utilizando un espectrómetro UV-VIS, marca THERMO SCIENTIFIC. Se midió la absorbancia de la muestra de agua a una longitud de onda en el rango de 400-700 nanómetro y se calculó la turbidez en unidades NTU restando la absorbancia del blanco de referencia con la absorbancia de la muestra del agua residual. Para determinar el pH se empleó el método SM 4500-H+ B, 23rd Ed, Utilizando un multiparamétrico, marca HANNA INSTRUMENTS. En la Conductividad Eléctrica se aplicó el método SM 2510 B, 23rd Ed, utilizando un multiparamétrico, marca HANNA INSTRUMENTS. Se inició calibrando el equipo con un Material de Referencia Estándar (HI7031L -1,413 us/cm). Luego, se preparó 100 ml de la muestra del agua que se deseaba analizar en un vaso plástico. Después, se sumergió el electrodo del conductímetro en la muestra a la espera de la lectura del conductímetro. Por último, se lavó el electrodo con agua destilada y se secó con un paño absorbente.

Para determinar los Sólidos Suspendidos Totales se empleó el método SM 2540 D, 23rd Ed. Se utilizó una membrana de filtrado de 0.45 micrómetros de porosidad en una balanza analítica. Luego, se preparó el equipo de filtración al vacío. Una vez completada la filtración, se extrajo cuidadosamente la membrana con una pinza y se colocó en un horno de secado a 105°C durante una hora. Luego del secado, se enfrió en un desecador y se llevó a una balanza analítica para registrar su peso final. La diferencia del peso antes y después del secado proporciona la cantidad precisa de Sólidos Suspendidos Totales presentes en la muestra. Para determinar la DQO se aplicó el método SM 5220 D, 23rd Ed. Diluyendo 2 ml de la muestra con 24 ml de agua destilada y con la ayuda de una pipeta se midió 2ml de esta solución para introducir en un vial compuesto por reactivos de ácido sulfúrico (H₂SO₄) y dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇). Estos reactivos se combinan para oxidar los compuestos orgánicos presentes en la muestra de agua provocando un cambio de color en la solución.

Para la determinación de Coliformes Fecales se empleó el método SM 9222 D, 23rd Ed. Como primer paso se limpió y desinfectó el área de trabajo. Después, se colocó 10 ml de la muestra de agua a analizar en el dispositivo de filtración. Luego, con una bomba de filtración modelo DOA-P704-AA se succionó la muestra a través de una membrana de filtración de 0.45 µm. Después, se abrió el dispositivo de filtración y se colocó el medio de cultivo o detector de coliformes de 24 horas (ColiBlue24) en la membrana filtrante sin dejar burbujas que puedan alterar los resultados. Luego, se llevó la membrana a la incubadora a 35°C durante 24 horas. Para concluir, se observó las membranas y se contó las colonias características de coliformes.

Para determinar la DBO se utilizó el método ESTEQUIOMÉTRICO, donde se utiliza la relación empírica DQO/DBO, usando la siguiente fórmula:

$$\text{DBO estimada} = a \times \text{DQO} + b$$

Donde:

a y b don los coeficientes de la relación empírica.

Este método proporciona una estimación rápida de la DBO utilizando la DQO.

1.2.2 Eficacia del método de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales del Camal Municipal del Cantón La Joya de los Sachas.

En esta Fase se describen las características del equipo de electrocoagulación a escala de laboratorio, los pasos para ejecutar el tratamiento. Así como, el análisis estadístico de Wilcoxon utilizado para determinar las diferencias significativas por cada tratamiento.

12.2.1 Equipo a escala de laboratorio utilizado para el método de electrocoagulación

El equipo de electrocoagulación, desarrollado por Cumbicus y hurtado [16], fue diseñado para tratar 5.78 litros de efluente. Este equipo está compuesto por cinco placas, siendo tres de aluminio y dos de hierro. Además, se incorpora un reactor de vidrio acrílico que permite visualizar todos los procesos involucrados en la electrocoagulación. Las dimensiones del reactor son las siguientes: 21 cm de ancho x 28 cm de largo y 11cm de alto. Está diseñado para deshacer el material removido durante el tratamiento por medio de reboso. La fuente de poder utilizada para el funcionamiento del equipo de electrocoagulación tiene la capacidad de suministrar hasta 5 amperios y un voltaje de 0 a 30 voltios y se incorpora un cableado con conexiones positivas y negativas para la transferencia de electricidad al equipo.

Tabla 1. Características del equipo de electrocoagulación a escala de laboratorio

Características	Unidad/Material	Valor/cantidad
Dimensiones del reactor	Centímetros (cm)	21 x 28
Volumen del reactor	Litros (L)	5
Número de electrodos	-	5
Material del ánodo	Hierro	2
Material del cátodo	Aluminio	3
Dimensión de electrodos	cm	15 x 10
Espesor de electrodos	mm	2
Intensidad máxima de la fuente de poder	Amperios (A)	5
Tención máxima de la fuente de poder	Voltios (V)	30

1.2.2.2 Pasos para ejecutar el tratamiento de electrocoagulación

Se esterilizó la cámara de electrocoagulación utilizando ácido clorhídrico y agua destilada para eliminar cualquier sustancia que pudiera alterar los resultados del tratamiento. Posterior a esto, se llenó la celda de electrocoagulación con 5 litros de agua residual a tratar, empleando un tamiz de 600 µm para retener los sólidos de mayor tamaño. Una vez llena la cámara de electrocoagulación con el agua residual, se conectaron los electrodos, positivo (ánodo) y negativo (cátodo), con el cableado correspondiente. Con la ayuda de un multímetro, se verificó que la cantidad de voltaje establecida fuera la adecuada. Transcurrido el tiempo estimado para cada tratamiento, la espuma formada por la liberación de gases y los coágulos se depositaron en la parte superior mediante el proceso de flotación y se removieron por rebose. Se tomaron muestras del agua tratada utilizando vasos de precipitado, dejando reposar durante 3 a 5 minutos para la sedimentación de los coágulos y flóculos formados durante el tratamiento. Este método se empleó debido a la ausencia de un efluente en el equipo. Finalmente, tras la recolección de las muestras del agua tratada en botellas ámbar de 500 ml, se etiquetaron los envases con la información correspondiente, como la fecha, la hora y el tipo de muestra.

1.2.3 Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua (TULSMA, LIBRO VI ANEXO 1)

La normativa de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua, generalmente, establece estándares y regulaciones para controlar la calidad del agua y limitar la contaminación de los efluentes que se descargan en los cuerpos de agua (Tapia, 2019, p. 14). La normativa busca proteger la calidad del agua y preservar los recursos hídricos, estableciendo estándares para la descarga de efluentes y limitando la presencia de contaminantes en el agua. Establece prohibiciones y medidas correctivas para el cumplimiento de los estándares de calidad del agua para descarga de efluentes a los cuerpos receptores.

3. Resultados

3.1 Análisis fisicoquímico y biológico del agua residual del Camal

La Fase I se enfocó en el análisis fisicoquímico y biológico del agua residual con los siguientes parámetros: potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Totales Suspendidos, Coliformes Fecales y Turbidez. Los parámetros seleccionados para el análisis se eligieron con base en su relevancia en la evaluación integral de la calidad del agua, cada uno de estos parámetros se sustenta en su importancia para evaluar la contaminación, la presencia de agentes patógenos, la carga orgánica y aspectos fundamentales para determinar las condiciones iniciales del agua residual del Camal.

Tabla 2: Resultados de la muestra inicial del agua residual.

Parámetro	Expresado como	Unidad	Condiciones iniciales
Potencial de Hidrógeno	pH	-	6,64
Conductividad Eléctrica	-	ms/mc	3586

Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	7047,66
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	mg/L	3171,45
Sólidos suspendidos Totales	STS	mg/L	440,00
Coliformes fecales	NMP	NMP/ 100ml	410
Turbidez	Turbidez	NTU	579,25

Tabla 2 muestra los datos obtenidos del análisis físicoquímico y biológico de la muestra inicial del agua residual. El pH indica una ligera acidez de 6,64. La Conductividad Eléctrica de 3586 ms/mc, indicando la presencia de iones disueltos en el agua. La Demanda Química de oxígeno (DQO) con un valor de 7047,66 mg/L y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) con 3171,45 mg/L indicaron elevada carga orgánica en el agua residual. Los STS alcanzan los 440,00 mg/L mostrando una elevada concentración de partículas suspendidas. La presencia de Coliformes Fecales, con un valor de 300 NMP/100ml, evidencia una elevada concentración bacteriana. Por último, la turbidez con un valor de 579,25 NTU presentó alta concentración de partículas, contribuyendo a la falta de claridad del agua.

3.2 Eficacia del método de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales del Camal Municipal del Cantón La Joya de los Sachas.

Se evaluó la eficacia del método de electrocoagulación a escala de laboratorio, para este proceso se llevó a cabo diferentes intervalos de tiempo de (1 hora y 2 horas) y con variaciones de voltaje de (20 voltios y 30 voltios). Por lo tanto, se aplicó el diseño experimental factorial 4x2, es decir, 4 factores con 2 niveles de repeticiones con un total de 8 pruebas experimentales. Además, para cada prueba se realizó un análisis físicoquímico y biológico con el fin de evaluar sus características postratamiento. Así también, se promediaron los niveles de repeticiones para tener una representación general de los resultados. Luego, se aplicó la fórmula de eficacia con los valores de la muestra inicial y los promedios postratamiento. Por último, se realizaron análisis estadísticos para proporcionar información sobre significancia estadística donde se evaluó la distribución de los datos para definir el tipo de prueba estadística a utilizar.

Tabla 3: Resultados del análisis físicoquímico y biológico postratamiento

Parámetro	Unidad	Tiempo 1 hora				Tiempo 2 horas			
		Voltaje 20		Voltaje 30		Voltaje 20		Voltaje 30	
		P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
pH	-	8,10	7,73	7,42	6,68	8,63	7,52	7,99	7,17
C.E	ms/mc	187	1937	2130	1915	2508	1265	1381	1859
DQO	mg/L	386	3953,5	3834,3	4017,7	3454,2	3674,8	2919,8	1572,5
		0,51	3	5	4	9	7	0	4
DBO	mg/L	173	1779,0	1725,4	1848,4	1554,4	1653,6	1313,9	687,39
		7,23	9	6	8	3	9	1	
STS	mg/L	310,00	580,00	180,00	260,00	230,00	140,00	190,00	130,00
C.F	NMP/ 100 ml	600	220	820	100	180	640	500	290
Turbidez	NTU	165,67	270,36	257,85	177,89	170,39	368,78	195,53	207,98

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico y biológico del agua residual tratada con electrocoagulación. Se observaron variaciones en las pruebas 1 y pruebas 2 de cada combinación de tiempo y voltaje. El pH experimenta una respuesta sensible a las diferentes condiciones del método acercándose a la neutralidad en la prueba 2, voltaje 30-2 horas. La Conductividad Eléctrica (C.E) refleja variaciones constantes en la concentración de iones disueltos con un valor más bajo de 1265ms/mc en la prueba 2, voltaje 30-2 horas. La DQO exhibe una respuesta cambiante en todas las pruebas con un valor mínimo de 1572,54mg/L en la prueba 2, voltaje 30- 2 horas. La DBO refleja una variación gradual en las diferentes pruebas obteniendo el valor más bajo de 1313,91mg/L en la prueba 1, voltaje 30-2 horas. Los Sólidos Totales Suspendidos (STS) presentan una disminución de 130,00 mg/L en la prueba 2, voltaje 30- 2 horas. Los coliformes fecales también presentaron una destacada disminución de 100 NMP/100ml en la prueba 2, voltaje 30- 1 hora. Por último, la turbidez muestra variaciones en cada una de las pruebas con un valor mínimo de 165,57 NTU en la prueba 1, voltaje 20-1 horas.

Tabla 4: Eficacia de remoción del método de Electrocoagulación.

Parámetros	Eficacia de remoción			
	Tiempo 1 hora		Tiempo 2 horas	
	Voltaje 20	Voltaje 30	Voltaje 20	Voltaje 30
pH	-	-	-	-
C.E	46,92%	43,60%	47,39%	54,82%
DQO	44,56%	44,29%	49,42%	68,13%
DBO	44,56%	43,65%	49,42%	68,45%
STS	-1,14%	50,00%	57,95%	63,64%
Coliformes fecales	0,00%	-1,22%	0,00%	3,66%
Turbidez	62,36%	62,39%	53,46%	65,17%

En la Tabla 4 se evidencian los porcentajes de remoción para los diferentes parámetros analizados y condiciones de tiempo y voltaje. El análisis se centra en sustancias específicas que se espera sean reducidas por el tratamiento. Los siguientes parámetros se destacan por tener mayor reducción en condiciones de tiempo de 30 voltios y 2 horas: Conductividad Eléctrica (C.E) con 54,82%, DQO con 68,13%, DBO con 68,45%, turbidez con 65,17%. Con respecto a los Sólidos Totales Suspendidos (STS) se obtuvo un valor negativo ya que hubo un aumento con respecto a las condiciones iniciales por lo tanto se registra un valor de -1,14%. Sin embargo, en condiciones de 30 voltios-2 horas se registra un valor representativo de 63,64%. Por otra parte, los Coliformes Fecales también presenta un aumento obteniendo un valor negativo de -1,22% y en condiciones de 30 voltios- 1 hora y en condiciones de voltaje 20-con tiempos de 1 y 2 horas se obtuvo un 0,00% de eficacia, es decir, que se mantuvo su valor inicial. Sin embargo, en condiciones de 30 voltios- 2 horas se registró una eficacia de 3,66% indicando una baja efectividad del tratamiento.

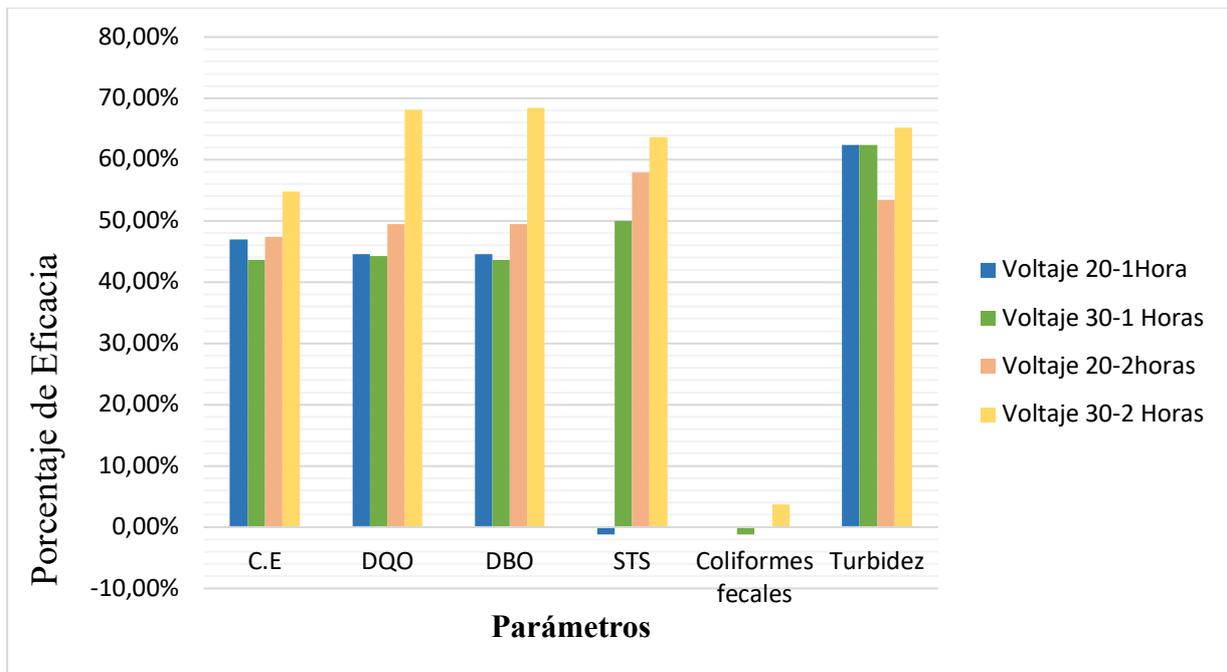


Figura 2: Eficacia de remoción de carga contaminante

Se realizó el análisis estadístico utilizando el software SPSS con los valores promediados registrados en la Tabla 4 y posterior se realizaron histogramas de frecuencia y curvas de normalidad para evaluar la distribución de los datos. Para evaluar la Curva Normal de la eficacia del método de electrocoagulación, se tomó los promedios resultantes de la Conductividad Eléctrica, DQO, DBO, STS, Coliformes Fecales y turbidez en las condiciones de Voltaje 20- 1hora, Voltaje 30- 1hora, Voltaje 20-2horas, Voltaje 30- 2horas. Al no seguir los datos una distribución normal se recurre a métodos estadísticos no paramétricos como la prueba de Wilcoxon, para determinar las diferencias significativas. Estas pruebas se utilizan cuando se tienen muestras pequeñas, no se cumplen ciertas suposiciones y se tiene una distribución de datos asimétrica, como ocurre en este caso.

Tabla 5: Pruebas de Wilcoxon

	Voltaje 20-1h_ Condiciones Iniciales	Voltaje 30-1h_ Condiciones Iniciales	Voltaje20-2h_ Condiciones Iniciales	Voltaje 30-1h_ Condiciones Iniciales
Z	-1,753	-1,992	-2,023	-2,201
Sig. Asintótica (bilateral)	0,080	0,046	0,043	0,028

Los resultados obtenidos de la prueba de Wilcoxon, evidencian diferencias significativas entre las condiciones iniciales y los tratamientos de voltaje 30- 1hora ($p=0,046$), voltaje 20- 2horas ($p=0,043$) y el voltaje 30-2horas ($p=0,028$). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la Hipótesis alterna. Por otro lado, para el tratamiento de voltaje20-1hora

($p=0,080$) no cumple con el umbral de significancia. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la Hipótesis alterna. Estos datos demuestran que el tratamiento de electrocoagulación tiene un efecto positivo en la reducción de contaminantes en comparación con las condiciones iniciales, especialmente con la aplicación de voltajes más altos en tiempos prolongados.

Se llevó a cabo una comparación detallada con los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímico y biológico, tanto antes como después del tratamiento de electrocoagulación, con los límites máximos permisibles establecidos por la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua (TULSTA, LIBRO VI ANEXO1) tabla 9.

Tabla 6: Resultados pretratamiento y postratamiento

Parámetro	Unidad	Límites máximos	Condiciones Iniciales	Caracterización post – tratamiento (promedios)			
				Tiempo 1 hora		Tiempo 2 horas	
				Voltaje 20	Voltaje 30	Voltaje 20	Voltaje 30
pH	-	6-9	6,64	7,92	7,05	8,08	7,58
C.E	uS/cm	-	3586	1903,50	2022,50	1886,50	1620,00
DQO	mg/L	200	7047,66	3907,02	3926,05	3564,58	2246,17
DBO	mg/L	100	3171,45	1758,16	1786,97	1604,06	1000,65
STS	mg/L	130	440,00	445,00	220,00	185,00	160,00
Coliformes F.	NMP/ 100ml	2000	410,00	410,00	460,00	410,00	395,00
Turbidez	NTU	100	579,25	218,02	217,87	269,59	151,76

La Tabla 6 presenta los resultados de la caracterización del agua residual antes y después del tratamiento y los valores del límite máximo permisibles según la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua (TULSMA, LIBRO VI ANEXO 1) Tabla 9. En términos de pH, los valores postratamiento se mantienen dentro del rango permisible de 6-9. La Conductividad Eléctrica presenta una disminución en las pruebas con 30 voltios y 2 horas con respecto a las condiciones iniciales. Si embargo, no logra estar dentro del límite permisible. La DQO y DBO experimentaron reducciones notables después del tratamiento acercándose a los valores permisibles. Esto indica una baja eficacia en la reducción en la eliminación de contaminantes orgánicos en el agua residual. De igual manera, los Sólidos Totales Suspendidos (STS) no cumplen con los estándares permisibles, señalando una baja remoción. Asimismo, los Coliformes Fecales y Turbidez experimentaron reducciones, pero sin alcanzar valores por debajo del límite máximo permisible.

4. Discusión

Se evaluaron 7 parámetros que permitieron conocer el estado del agua residual proveniente del camal municipal de Joya de los Sachas, de los cuales se obtuvieron valores elevados de carga contaminante como: Conductividad Eléctrica 3586 uS/cm, Demanda

Química de Oxígeno 7047,66 mg/L, Demanda Bioquímica de Oxígeno 3171,45 mg/L, Sólidos Totales Suspendidos 440, 00 mg/L, Coliformes Fecales 410,00 NMP/100ml y Turbidez 579,25 NTU. La electrocoagulación aplicada en el agua residual evidencia la mayor eficacia de remoción con un voltaje 30 - 2 horas en la DBO, reduciendo hasta el 68,45% de su valor inicial. Ayuque-Rojas et al. en su estudio señala la relevancia del método de EC al presentar una remoción eficaz de contaminantes, con tasas de eliminación superiores al 92,5% para la DBO₅ [11]. Los valores obtenidos en esta investigación están relacionados con los datos reportados por Rodríguez en su experimento con electrocoagulación en aguas residuales provenientes de una planta de lácteos y cárnicos, donde se removió DQO soluble y turbiedad con eficiencia máxima del 96% [17]. Zaleschi et al. a través de la revisión y comparación de varias investigaciones revelan como la electrocoagulación supera muy seguido la coagulación química en términos de eficiencia y calidad del agua [18]. Estos estudios ponen de manifiesto la eficacia de la EC en la reducción de materia orgánica en diversos tipos de aguas residuales, con eficacias de eliminación generalmente superiores al 60% tanto para la DBO₅ como para la DQO [19].

En cuanto a los Sólidos Totales Suspendidos (STS) la eficacia fue de 63,64% en voltaje 30 - 2 horas. Sin embargo, tuvo un descenso en condiciones de 20V y 1horas, se estima que la causa de esta inestabilidad se debe al tiempo de retención, la carga eléctrica y a la falta de un efluente en el equipo de electrocoagulación que facilite la recolecta del agua tratada. Así también, Tanatti & Sezer reportaron aumentos en la eliminación de DQO y Carbono Orgánico Total (COD) asociados a una mayor densidad de corriente y tiempo de electrólisis [20], con electrodos de aluminio y hierro similares a los empleados en esta investigación. En ambos casos la EC es el mejor método de tratamiento para aguas residuales de matadero. Por otro parte, la prueba de Wilcoxon respalda la efectividad de los tratamientos al demostrar diferencias significativas en la reducción de contaminantes. Estos datos destacan la importancia de una evaluación continua y ajustes en el proceso de electrocoagulación para maximizar su eficacia y minimizar posibles efectos adversos. Experimentos a escala de laboratorio han logrado resultados satisfactorios en el tratamiento de aguas residuales urbanas, con mejoras en parámetros como el pH, la turbidez y los sólidos totales. A pesar de su potencial, la tecnología EC aún requiere más investigación para optimizar sus procesos.

El porcentaje de eficacia de remoción de coliformes fecales del agua residual tratada fue de 3,66%. Sin embargo, en condiciones de voltaje 30-1hora se obtuvo un valor superior al punto de partida, registrando un porcentaje negativo de -1,22%. Se estima que esta variación se debe a la capacidad de los coliformes fecales de reproducirse en condiciones adecuadas. Por otra parte, se reporta una eficacia del 0,00% en el tratamiento de electrocoagulación en condiciones de voltaje 20 y tiempo 1 y 2 horas, lo que indica que el número de coliformes fecales se mantuvo en el agua residual luego del tratamiento. A pesar que otras investigaciones han reportado valores muy altos de remoción de coliformes, la densidad de corriente y tiempo de electrólisis han sido mayores y extensos [21]. Mientras que, Khennoussi et al emplearon tratamientos combinados (sistemas electroquímicos) para reducir los coliformes fecales en aguas residuales. Añadiendo el hierro como coagulante

obtuvieron valores entre 2 y 3 unidades menos y el cloruro férrico logró el 50% de eliminación de los coliformes. [22]

Así también se compararon los resultados de las condiciones iniciales del agua residual, los resultados promediados después de aplicar el tratamiento de electrocoagulación en las diferentes condiciones de voltaje - tiempo y la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua (TULSMA, LIBRO VI ANEXO 1). Los datos recopilados brindan una perspectiva detallada sobre como las variables de voltaje y tiempo afectan la eficacia del tratamiento, donde se observan disminuciones considerables en ciertos parámetros como la Conductividad Eléctrica, DQO, DBO, Sólidos Totales Suspendidos con respecto a las condiciones iniciales. Sin embargo, no alcanzan a estar por debajo del límite máximo permisibles. Según Cordero & Ramírez para llegar a un porcentaje de eficacia de remoción significativo o que cumplan con el límite máximo permisibles, se necesitan de una serie de procesos que incluyen el pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario permitiendo el saneamiento de las aguas para su disposición final a cuerpos de agua naturales[23][24]

El proceso de electrocoagulación ha mostrado resultados prometedores en el tratamiento de aguas residuales de diversas fuentes industriales. Gallegos manifiesta la importancia de la electrocoagulación en la reducción de materia orgánica y turbidez en aguas residuales urbanas [25]. Mientras que Rodríguez et al. resaltan el impacto positivo en la recuperación de efluentes mixtos de industrias lácteas y cárnicas empleando EC [17]. Jave et al. en su investigación de aguas residuales provenientes de mataderos tratadas con electrocoagulación disminuyeron significativamente la demanda bioquímica de oxígeno, la turbidez, la conductividad eléctrica y el total de sólidos en suspensión [26]. A través de esta investigación y en contraste con otros autores se evidencia la relevancia de la configuración de los electrodos, el tiempo de tratamiento, materiales empleados y la densidad de corriente. La electrocoagulación ha alcanzado eficiencias de eliminación superiores al 60% para diversos contaminantes, incluyendo la demanda química de oxígeno y la turbidez. Se destaca el potencial de este tipo de tratamiento como una opción viable para las aguas residuales industriales, ofreciendo altas eficiencias de eliminación y la posibilidad de reutilización del agua.

5. Conclusión

Se realizó el análisis físico químico y biológico del agua residual del Camal Municipal del Cantón La Joya de los Sachas, los resultados obtenidos revelan que la calidad inicial del agua residual se caracteriza por un pH ligeramente ácido de (6,64), la elevada DQO de (7047,66 mg/L) y DBO de (3171,45 mg/L) señalan la presencia de materia orgánica en el agua, una elevada conductividad eléctrica de (3586), una presencia considerable de Sólidos Totales Suspendidos de (440,00 mg/l) y una turbidez considerablemente alta de (218,02 NTU). Además, se registró una concentración de coliformes fecales de (410 NMP/100ml) indicando la presencia de contaminación fecal en el agua residual.

Se estableció la eficacia del método de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales provenientes del Camal Municipal del Cantón La Joya de los Sachas. En comparación con las condiciones iniciales los resultados obtenidos en cada prueba de estudio, se revela que este método de electrocoagulación ha demostrado cierta capacidad para modificar los parámetros estudiados, teniendo mayor porcentaje de eficacia con un voltaje de 30 y tiempo de 2 horas en Conductividad Eléctrica (54,82%), DQO (68,13%), DBO (68,45%), Sólidos Totales Suspendidos (63,64%), y Turbidez (65,17%) con respecto a las condiciones iniciales. La prueba de Wilcoxon utilizada confirma la efectividad del método de electrocoagulación y la capacidad significativa para reducir la carga contaminante, mostrando mejores resultados en el tratamiento con Voltaje 30 durante 2 horas.

Se compararon los resultados de los parámetros fisicoquímico y biológico de la muestra inicial y post- tratamiento con la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua (TULSMA, LIBRO VI ANEXO 1). Donde se muestra que los parámetros evaluados no cumplen con el límite máximo permisible. Sin embargo, se evidencia cierta capacidad del método de electrocoagulación de reducir la carga contaminante del agua residual proveniente del Camal Municipal del Cantón La Joya de Los Sachas.

Contribución de autores: Los autores participaron en todos los apartados del documento

Financiamiento: Los autores financiaron a integridad el estudio.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Soto-cabrera, A.I.; Panimboza-ojeda, Alexandra Paola; Ilibay-granda, Carlos Geovanni; Valverde-lara, Carlos Raúl; Diéguez-santana, K. Impacto Ambiental de La Operación Del Centro de Faenamiento de La Ciudad de Puyo , Pastaza , Ecuador Environmental Impact of the Operation of the Slaughterhouse of the City of Puyo , Pastaza , Ecuador. *Prospectiva* **2020**, *18*, 60–68, doi:<https://doi.org/10.15665/rp.v18i1.2101>.
2. Lobo, C. Tratamiento Biológico de Aguas Residuales Industriales, 2014.
3. Borja, D.; Salazar Llangarí, K.; Brito Moina, H. Cuantificación de Efluentes de Aguas Residuales Del Camal Frigorífico Riobamba. *Ciencia Digital* **2019**, *3*, 783–794, doi:10.33262/cienciadigital.v3i2.497.
4. Huarachi Núñez, Y.D.; Huanacuni Lupaca, C. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Del Matadero Municipal de Tacna. *Ingeniería Investiga* **2021**, *3*, 546–559, doi:10.47796/ing.v3i1.480.
5. Campaña, P. International Connections of the Ecuadorian Amazonian Forest Colonization Process 1960–1970. *Iconos* **2021**, *XXV*, 179–194, doi:10.17141/iconos.71.2021.4689.
6. Baleta-Agreda, D.C.; Meneses-González, R.F.; Imués-Figueroa, M.A. Impactos De Los Sistemas De Producción Ganadera En Colombia Alternativas De Solución Sostenibles: Una Revisión. *Revista Investigación Pecuaria* **2019**, *6*, 43–56, doi:10.22267/revip.1961.11.
7. Muñoz Monzón, D.G.; Figueroa Vázquez, V.S.; Tapia Frías, K.V.; Vallejo Ortiz, A.F.; Anda López, L.; Angel Hernández, A. Impacto Ambiental En Ganadería Bovina de Leche Mediante Filtración de Agua Contaminada En La Región Semiárida Del Norte de México. *JÓVENES EN LA CIENCIA* **2022**, *14*, 1–7, doi:10.15174/jc.2022.3475.
8. Zamora Mayorga, D.J.; Monge García, G.V.; Ubillus Chicaiza, S.C.; Moreno Paredes, M.A. Análisis No Paramétrico a Través de Kruskal-Wallis Para Evaluar a Distribución Sectorial y El Desarrollo de Las Empresas Dentro de La Provincia de Orellana. *Tesla Revista Científica* **2023**, *3*, e228, doi:10.55204/trc.v3i2.e228.
9. STCTEA Plan Integral Para La Amazonía. **2021**, 264.

10. GADMJS *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Del Cantón Joya de Los Sachas*; Ecuador, 2023;
11. Ayuque-Rojas, José; Esteban-Carhuapoma, Johnny; Huere, Jorge; Ayuque-Laurent, C.D.C.Y.R. *Tratamiento de Aguas Residuales Con Cámaras de Electrocoagulación a Escala de Laboratorio*; 2022;
12. López Mejía, J.; Ortega Zapata, Ó.J.; Vellojin Petro, T.S.; Carriazo De Hoyos, K.Y.; Mora Padilla, J.D. La Electrocoagulación Como Una Aplicación Al Tratamiento de Aguas Residuales de Zonas Urbanas. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería* **2023**, doi:10.26507/paper.2847.
13. Gutierrez, A.; Orden, L.; Postemsky, P.; Iocoli, G.A.; Mockel, G.; Marinangeli, P. *Agrowaste Compost as a Component of Substrates for Ornamental Plants= Compost de Agroresiduos Como Componente de Sustratos Para Plantas Ornamentales*; ASAO, 2022;
14. Rodríguez Díaz, Y.J.; Fuentes Guevara, M.D.; Beleño Díaz, Ó.D.; Montoya Armenta, L.H. Electrocoagulación Como Proceso de Tratabilidad de Aguas Residuales de Una Planta de Lácteos y Cárnicos. *Tecnura* **2021**, *25*, 26–39, doi:10.14483/22487638.15769.
15. Marcillo, R.L.G.; Carrasco, R.U.C.; Quinche, F.S.G. Caracterización Productiva de Los Sistemas Ganaderos y El Manejo Del Recurso Pastizal En El Cantón Joya de Los Sachas. *European Scientific Journal ESJ* **2019**, *15*, 355–361, doi:10.19044/esj.2019.v15n18p355.
16. Cumbicus Vicente, Cristian Patricio; Hurtado Cayambe, M.P. Determinación de La Eficacia Del Proceso de Electrocoagulación En El Tratamiento de Lixiviados Del Botadero Controlado Del Cantón Francisco de Orellana, ESPOCH, 2023.
17. Rodríguez Díaz, Y.J.; Fuentes Guevara, M.D.; Beleño Díaz, Ó.D.; Montoya Armenta, L.H. Electrocoagulación Como Proceso de Tratabilidad de Aguas Residuales de Una Planta de Lácteos y Cárnicos. *Tecnura* **2021**, *25*, 26–39, doi:10.14483/22487638.15769.
18. Zaleschi, L.; Teodosiu, C.; Cretescu, I.; Rodrigo, M.A. A Comparative Study of Electrocoagulation and Chemical Coagulation Processes Applied for Wastewater Treatment. *Environmental Engineering and Management Journal* **2012**, *11*, 1517–1525, doi:10.30638/eej.2012.190.
19. Loayza Morales, Cesar Augusto; Ochoa León, H. Evaluación de La Remoción de Materia Orgánica Del Lixiviado Mediante El Proceso de Electrocoagulación Del Botadero La Mejorada El Tambo. *Prospectiva Universitaria* **2022**, *17*, 109–114, doi:10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2020.17.1393.
20. Tanatti, N.P.; Sezer, M. Optimizing Electrocoagulation for Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment: A Fuzzy Axiomatic Design Approach. *Environmental Science and Pollution Research* **2024**, *31*, 31159–31173, doi:10.1007/s11356-024-33069-4.
21. Pantoja Cadillo, A.; Sánchez CCoylo, O.R. Reducción De La Dbo5 Y Coliformes Termotolerantes Mediante La Electroquímica En Aguas Servidas Domésticas Del Citrar-Uni-Perú. *Revista Científica: BIOTECH AND ENGINEERING* **2021**, *1*, doi:10.52248/eb.Vol1iss02.9.
22. Khenoussi, A.; Chaouch, M.; Chahlaoui, A. Electrocoagulation-Flottation Avec Des Électrodes En Fer Treatment of the Effluent from a Red Meat Slaughterhouse by Electrocoagulation Flotation with Iron Electrodes TRAITEMENT DES EFFLUENTS D ' ABATTOIR DE VIANDE ROUGE PAR ÉLECTROCOAGULATION-FLOTTATION . **2019**.
23. Cordero, E.A.C. Tratamiento de Aguas Residuales: Lagunas de Estabilización.; 1969.
24. Sánchez, O.R. Determinación de La Eficiencia de La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Carlos, Usac. *Agua, Saneamiento & Ambiente* **2013**.
25. Gallegos Gallegos, C.J. Estudio de Pertinencia Para La Creación de Una Maestría En Lingüística y Literatura. *Estudio de Pertinencia para la creación de una maestría en Lingüística y Literatura* **2017**, 1–122.
26. Jave Concepción, H.G.; Rascón, J.; Pinedo Gómez, K.J.L.; Guzmán Trujillo, F.Z.; Troya Paredes, D. Eficiencia de La Remoción de Materia Orgánica Mediante Electrocoagulación Para Tratar Aguas Residuales Procedentes de Mataderos. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable* **2021**, *5*, 1–8, doi:10.25127/aps.20212.763.



© 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>