e-ISSN: 2007-4026 / ISSN print: 2007-3925

Scientific article https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2025.08.045

Optimization of an electrochemical reactor for the treatment of coffee processing wastewater

Optimización de un reactor electroquímico para el tratamiento de agua residual del beneficio de café

Raúl Alejandro Limón-Hernández*; Verónica López-Hernández; Iriana Hernández-Martínez

[1]Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora. Carretera Gutiérrez Zamora-Boca de lima km 2.5, Gutiérrez Zamora, Veracruz, C. P. 93554, México.

*Corresponding author: raul.limon@utgz.edu.mx, tel. 784 123 6145.

Abstract

Introduction: In coffee production, wastewater generated during the pulping process show a high organic load, which represents an environmental risk to receiving water bodies when discharged without prior treatment

Objective: To optimize the treatment of wastewater from the wet processing of coffee through a batch electrocoagulation process using aluminum electrodes.

Methodology: A Plackett-Burman design was applied to identify the operational variables with the greatest influence (pH, temperature, salt concentration, electric current, stirring speed, and reaction time). Subsequently, the significant variables were optimized using a Box-Behnken design and response surface methodology.

Results: Under optimal conditions, a quadratic model was developed to describe biochemical oxygen demand (BOD_5). The estimated treatment cost was 24.02 MXN·m^{-3}, considering both energy consumption and electrode wear. The BOD_5 removal efficiency reached 98.5 %, a value consistent with the model prediction (97.49 %), which showed a good fit to the data (R^2 = 0.911).

Limitation of the study: The study did not include variability among different coffee harvests.

Originality: The proposed treatment represents an innovative alternative in the study region, with high efficiency in the removal of organic load.

Conclusions: The treated wastewater presented BOD_5 concentrations below 20 mg·L^{-1}, which complies with the criteria established by NOM-003-SEMARNAT-1997 and allows its potential reuse for irrigation of coffee plantations.

Keywords: water pollution, ecology, operating parameters, coffee plantations, $Al(OH)_3$.

Resumen

Introducción: En la producción de café, el agua residual generada durante el despulpado presenta una elevada carga orgánica, lo que constituye un riesgo ambiental para los cuerpos de agua receptores cuando se descarga sin tratamiento previo.

Objetivo: Optimizar el tratamiento del agua residual del beneficio húmedo del café mediante un proceso de electrocoagulación en modo discontinuo con electrodos de aluminio.

Metodología: Se aplicó un diseño Plackett-Burman para identificar las variables operativas con mayor influencia (pH, temperatura, concentración de sal, intensidad de corriente, velocidad de agitación y tiempo de reacción). Posteriormente, las variables significativas se optimizaron mediante un diseño Box-Behnken y la metodología de superficies de respuesta.

Resultados: Bajo las condiciones óptimas, se desarrolló un modelo cuadrático para describir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5). El costo estimado del tratamiento fue de 24.02 MXN·m^{-3}, al considerar tanto el consumo energético como el desgaste de electrodos. La eficiencia de eliminación de DBO_5 alcanzó el 98.5 %, valor consistente con la predicción del modelo (97.49 %), el cual presentó un buen ajuste a los datos (R^2 = 0.911).

Limitaciones del estudio: La investigación no contempló la variabilidad entre diferentes cosechas de café.

Originalidad: El tratamiento propuesto representa una alternativa innovadora en la región de estudio, con una elevada eficiencia en la remoción de carga orgánica.

Conclusiones: El agua residual tratada presentó concentraciones de DBO_5 inferiores a 20 mg·L^{-1}, lo cual cumple con los criterios establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1997 y permite su posible reutilización en el riego de cafetales.

Palabras clave: contaminación del agua, ecología, parámetros de operación, cafetales, $Al(OH)_3$.

Please cite this article as follows (APA 7): Limón-Hernández, R. A., López-Hernández, V., & Hernández-Martínez, I. (2026). Optimization of an electrochemical reactor for the treatment of coffee processing wastewater. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, *18*, e25045. https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2025.08.045

Ingeniería Agrícola y Biosistemas

Received: August 1, 2025 | Accepted: December 12, 2025 | Published online: April 9, 2026

https://revistas.chapingo.mx/inagbi/

Introduction

In coffee processing, water is mainly used for irrigation coffee plants and for washing the fruit to remove the pulp and obtain the seed (Samuel, 2021). The volume of water used varies depending on the type of processing applied, with consumption ranging from 5 000 to 45 000 $L \cdot t^{-1}$ of processed coffee cherries. As a result, and effluent is generated that is characterized by high concentrations of biochemical oxygen demand (BOD_5), chemical oxygen demand (COD), and total suspended solids (TSS) (Sánchez-Hernández et al., 2024), as well as high turbidity, low dissolved oxygen concentration, and a dark brown color with an unpleasant odor, attributed to the decomposition of the organic fraction (Morales-Rojas et al., 2020).

In Mexico, the management of wastewater generated in coffee processing facilities is limited, as most production units do not have treatment systems and their effluents are reused for irrigation, discharged into water bodies, or released into municipal drainage systems (Hernández-Martínez et al., 2021). These practices represent significant environmental risks, such as surface water contamination from direct discharges, infiltration of contaminants into groundwater, and soil degradation when wastewater is used for irrigation (Ibarra-Taquez et al., 2018).

To mitigate these impacts, several technologies have been evaluated for the treatments of coffee-processing wastewater, including chemical coagulation, constructed wetlands, bioreactors, upflow bed reactors, oxidation pond, and filtration systems. However, their high investment and operating costs limit their implementation by affecting their feasibility and profitability (Limón-Hernández et al., 2023).

Given this context, the development and optimization of treatment technologies to reduce the discharge of coffee-processing wastewater into surface water bodies has become a priority. In this regard, electrocoagulation is a nonconventional process that uses electric current to generate coagulants *in situ* through the oxidation of metal electrodes, unlike conventional methods that require the addition of external chemical reagents (Medina-Collana et al., 2024). Its application has demonstrated favorable results in a variety of industrial effluents and is notable for its versatility in removing contaminants, as well as for its technical and economic advantages over conventional processes (González-Pérez et al., 2025).

Among the main advantages of electrocoagulation are its high efficiency in removing suspended solids, colloids, fats, oils, and heavy metals, as well

Introducción

En los procesos de beneficio de café, el agua se utiliza principalmente para el riego de los cafetos y para el lavado del fruto, con el fin de remover la pulpa y obtener la semilla (Samuel, 2021). El volumen de agua empleado varía según el tipo de beneficio aplicado, con consumos que van desde 5 000 hasta 45 000 $L \cdot t^{-1}$ de café cereza procesado. Como consecuencia, se genera un efluente caracterizado por elevadas concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST) (Sánchez-Hernández et al., 2024), además de alta turbidez, baja concentración de oxígeno disuelto y un color café oscuro con olor desagradable, atribuibles a la descomposición de la fracción orgánica (Morales-Rojas et al., 2020).

En México, la gestión del agua residual generada en los beneficios de café es limitada, ya que la mayoría de las unidades productivas no cuentan con sistemas de tratamiento y sus efluentes se reutilizan para riego, se vierten en cuerpos de agua o se descargan en drenajes municipales (Hernández-Martínez et al., 2021). Estas prácticas representan riesgos ambientales significativos, como la contaminación del agua superficial por vertidos directos, la infiltración de contaminantes en mantos freáticos y la degradación de suelos cuando el agua residual se emplea para riego (Ibarra-Taquez et al., 2018).

Con el fin de mitigar estos impactos, se han evaluado diversas tecnologías para el tratamiento del agua residual del beneficio de café, como la coagulación química, humedales artificiales, biorreactores, reactores de lecho ascendente, lagunas de oxidación y sistemas de filtración. Sin embargo, sus elevados costos de inversión y operación limitan su implementación, al afectar su viabilidad y rentabilidad (Limón-Hernández et al., 2023).

Ante este panorama, resulta prioritario desarrollar y optimizar tecnologías de tratamiento que reduzcan la descarga de aguas residuales del beneficio de café en cuerpos de agua superficiales. En este contexto, la electrocoagulación es un proceso no convencional que utiliza corriente eléctrica para generar coagulantes *in situ* a partir de la oxidación de electrodos metálicos, a diferencia de los métodos convencionales que requieren la adición de productos químicos externos (Medina-Collana et al., 2024). Su aplicación ha mostrado resultados favorables en diversos efluentes industriales y destaca por su versatilidad en la remoción de contaminantes, así como por sus ventajas técnicas y económicas frente a procesos convencionales (González-Pérez et al., 2025).

as its lower sludge production and reduced need for chemical additives compared with conventional chemical coagulation (Elnenay et al., 2017). Compared with biological treatments, this process offers greater operational simplicity, shorter processing times, and higher stability under variations in organic load concentration. In contrast to advanced oxidation processes, it represents a more economical and energy-efficient alternative, as it does not require the use of catalysts or ultraviolet radiation (Abdel-Rahman et al., 2025).

Several studies have documented the feasibility of electrocoagulation for wastewater treatment. Asefaw et al. (2024) evaluated this process for treating wastewater from the wet processing of coffee. The study considered variables such as pH (3–11), reaction time (15–75 min), applied current (0.150–0.75 A) and NaCl concentration as the electrolyte (250–1 250 ppm) in a laboratory-scale reactor. The authors reported reductions of 98.5 % in organic load, 99.5 % in color, 99 % in turbidity, 99 % in phosphates and 98.83 % in nitrates within 45 min, indicating the high efficiency of the process.

Dobrosz-Gómez et al. (2024) evaluated electrocoagulation in effluents from the soluble coffee industry and examined operating parameters such as electrode type (iron, stainless steel, and aluminum), current (50–150 $A \cdot m^{-2}$), NaCl concentration as the electrolyte (400–4000 ppm), and stirring speed (350–700 rpm), with a reaction time set at 180 min in a laboratory-scale reactor. The results showed removals of 97 % of color, 72 % of COD and 69 % of total organic carbon (TOC), supporting the viability of this technology in the industry.

Muleta et al. (2025) evaluated the efficiency of electrocoagulation with aluminum electrodes enhanced with natural coagulants (eggshell) for the removal of heavy metals. The authors modified operating conditions such as chromium concentration (225–475 ppm), pH (5–9), current density (0.35–0.45 $A \cdot m^{-2}$) and relation time (30–40 min), obtaining removal efficiencies of up to 99.9 % in 36.84 min. These results demonstrate that electrocoagulation is not only effective for the removal of organic load but also for a wide range of contaminants, including heavy metals.

The efficiency of the electrocoagulation process depends on several factors associated with the electrochemical reactions occurring within the reactor, which determine the rate and amount of coagulant species generated. Among the most relevant parameters are the type of electrode material, pH, current density, electrical conductivity (EC), temperature, reaction time,

Entre las principales ventajas de la electrocoagulación se encuentran su elevada eficiencia para la remoción de materia suspendida, coloides, grasas, aceites y metales pesados, además de una menor generación de lodos y una reducción en el uso de aditivos químicos en comparación con la coagulación química convencional (Elnenay et al., 2017). Frente a los tratamientos biológicos, este proceso ofrece mayor simplicidad operativa, menores tiempos de trabajo y mayor estabilidad ante variaciones en la concentración de la carga orgánica. En contraste con los procesos de oxidación avanzada, representa una alternativa más económica y energéticamente eficiente, debido a que prescinde del uso de catalizadores y radiación ultravioleta (Abdel-Rahman et al., 2025).

Diversos estudios han documentado la viabilidad de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales. Asefaw et al. (2024) evaluaron este proceso para el tratamiento del agua residual del beneficio húmedo del café. El análisis consideró variables como pH (3–11), tiempo de reacción (15–75 min), corriente aplicada (0.150–0.75 A) y concentración de NaCl como electrolito (250–1 250 ppm) en un reactor a escala de laboratorio. Los autores reportaron disminuciones de 98.5 % de la carga orgánica, 99.5 % de color, 99 % de turbidez, 99 % de fosfatos y 98.83 % de nitratos en 45 min, lo cual confirma la alta eficiencia del proceso.

De manera similar, Dobrosz-Gómez et al. (2024) evaluaron la electrocoagulación en efluentes de la industria del café soluble y estudiaron parámetros de operación como tipo de electrodo (hierro, acero inoxidable y aluminio), corriente (50–150 $A \cdot m^{-2}$), concentración de NaCl como electrolito (400–4000 ppm) y velocidad de agitación (350–700 rpm), con un tiempo establecido en 180 min en un reactor a escala de laboratorio. Los resultados mostraron remociones del 97 % de color, 72 % de DQO y 69 % de carbono orgánico total (COT), lo que respalda la viabilidad de esta tecnología en la industria.

Asimismo, Muleta et al. (2025) evaluaron la eficiencia de la electrocoagulación con electrodos de aluminio potenciada con coagulantes naturales (cascarón de huevo) para la remoción de metales pesados. Estos autores modificaron condiciones de operación como la concentración de cromo (225–475 ppm), pH (5–9), densidad de corriente (0.35–0.45 $A \cdot m^{-2}$) y tiempo de reacción (30–40 min), y obtuvieron eficiencias de remoción de hasta 99.9 % en 36.84 min. Estos resultados evidencian que la electrocoagulación no solo es eficaz para la eliminación de carga orgánica, sino también para una amplia gama de contaminantes, incluidos metales pesados.

as well as the distance and geometry of the electrodes (Veli et al., 2019).

In this context, the aim of the present study was to optimize the treatment of wastewater from the wet coffee processing using a batch electrocoagulation process with aluminum electrodes to improve the removal efficiency of organic load and contribute to the sustainable development of the coffee sector.

Materials and methods

Wastewater sampling

Wastewater sampling was conducted between October 2023 and March 2024, corresponding to the coffee processing season. Samples were collected from the discharge outlet associated with the fermentation and washing stages of a coffee processing facility located in Huatusco, Veracruz, in accordance with the guidelines of NMX-AA-003-1980 (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1980). For sample collection, 10 L high-density polyethylene containers were used. The samples were stored at 4 °C until analysis.

Wastewater characterization

A total of 100 mL of wastewater was placed in a 250 mL beaker, and the electrode of a previously calibrated portable multiparameter meter (HI98129, Hanna Instruments, USA) was immersed to record pH, EC, temperature, and total dissolved solids (TDS). Total suspended solids (TSS) were determined according to the NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía [SE], 2016) using a drying oven (9023A, Ecoshel, China). BOD_5 was quantified following the NMX-AA-028-SCFI-2001 (SE, 2021) by incubating the samples enriched with mineral salts, without inoculum and with an appropriate dilution factor, for 5 days. COD was determined using the Hach DQO8000 colorimetric method in a digestion reactor (DRB200, Hach®, USA) and a colorimeter (DR900, Hach®, USA) with the preloaded program.

Electrocoagulation system configuration

An electrocoagulation unit form the Chemistry Laboratory of the Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora was used (Figure 1). The reactor consisted of a high-density polypropylene container measuring 15 cm in length, 10 cm in width, and 10 cm in height, with a total capacity of 1.5 L and an effective working volume of 1 L. The system incorporated 10 square aluminum plates, each measuring 10 cm per side, arranged in parallel with a spacing of 1.2 cm between them.

The electrodes were configured in a monopolar series mode (MP-S), in which only the outer electrodes were

La eficiencia del proceso de electrocoagulación depende de diversos factores asociados a las reacciones electroquímicas que ocurren dentro del reactor y determinan la velocidad y la cantidad de especies coagulantes generadas. Entre los parámetros más relevantes se encuentran el tipo de material de los electrodos, el pH, la densidad de corriente, la conductividad eléctrica (CE), la temperatura, el tiempo de reacción, así como la distancia y la geometría de los electrodos (Veli et al., 2019).

En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue optimizar el tratamiento del agua residual del beneficio húmedo del café mediante un proceso de electrocoagulación en modo discontinuo con electrodos de aluminio, con la finalidad de mejorar la eficiencia de remoción de carga orgánica y contribuir al desarrollo sustentable del sector cafetalero.

Materiales y métodos

Muestreo de agua residual

El muestreo del agua residual se realizó entre octubre de 2023 y marzo de 2024, periodo correspondiente a la temporada de beneficio del café. Las muestras se recolectaron del dren de descarga correspondiente al proceso de fermentación y lavado de un beneficio ubicado en Huatusco, Veracruz, de acuerdo con los lineamientos de la NMX-AA-003-1980 (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1980). Para la recolección se utilizaron recipientes de polietileno de alta densidad de 10 L. Las muestras se conservaron a 4 °C hasta su análisis.

Caracterización del agua residual

Se colocaron 100 mL de agua residual en un vaso de precipitado de 250 mL, se sumergió el electrodo de un potenciómetro portátil previamente calibrado (HI98129, Hanna Instruments, EUA) y se registraron los valores de pH, CE, temperatura y sólidos totales disueltos (TDS). La determinación de los SST se realizó conforme a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía [SE], 2016) en un horno de secado (9023A, Ecoshel, China). La DBO_5 se cuantificó según la NMX-AA-028-SCFI-2001 (SE, 2021) mediante la incubación de las muestras enriquecidas con sales minerales, sin inóculo y con factor de dilución durante 5 días. La DQO se determinó a partir del método colorimétrico Hach DQO8000 en un reactor de digestión (DRB200, Hach®, EUA) y un colorímetro (DR900, Hach®, EUA) con el programa precargado.

Configuración del sistema de electrocoagulación

Se utilizó un equipo de electrocoagulación del Laboratorio de Química de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora (Figura 1). El reactor consistió

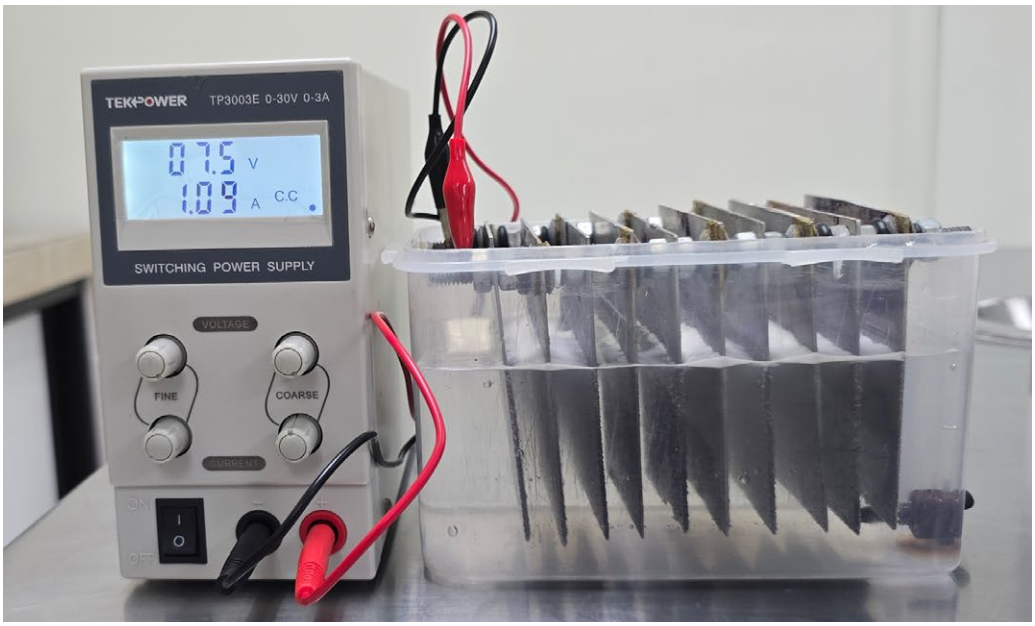

Figure 1. Scheme of the electrocoagulation unit used in the experiment.
Figura 1. Esquema del equipo de electrocoagulación utilizado en el experimento.

directly connected to the power supply, while the intermediate plates were sequentially polarized by means of two threaded rods secure with nuts and plastic insulation washers to ensure the correct polarity of each electrode. This configuration was selected based on preliminary tests, in which stable current flow, low sludge generation, and efficient removal of color and organic load were observed, in addition to a simpler assembly compared with other configurations evaluated.

Prior to the experiments, the plates were cleaned by immersion in 15 % hydrochloric acid for 5 min to remove oxides. Subsequently, they were rinsed with distilled water and dried at 105 °C for 1 h. The electric current was supplied using a regulated voltage and current power supply (TP3003E, Tekpower, China).

Plackett-Burman experimental design

A Plackett-Burman experimental design was established with six factors and two evaluation levels (Table 1) using Minitab software version 19. In the case of the salt concentration variable, the adjustment was carried out using NaCl (Sigma-Aldrich, USA) as the supporting electrolyte due to its high solubility, its ability to increase electrical conductivity, its low cost, and its widespread use in recent electrocoagulation studies (Abdel-Rahman et al., 2025; Asefaw et al., 2024).

At the end of each treatment, the percentage removal of organic matter (response variable) was calculated using the following equation:

en un recipiente de polipropileno de alta densidad de 15 cm de largo, 10 cm de ancho y 10 cm de alto, con capacidad de 1.5 L y volumen útil de trabajo de 1 L. El sistema incorporó 10 placas de aluminio cuadradas de 10 cm por lado, dispuestas de forma paralela con 1.2 cm de separación entre cada una.

Los electrodos se configuraron en modo monopolar en serie (MP-S), en el cual únicamente los electrodos externos se conectaron directamente a la fuente de poder, mientras que las placas intermedias se polarizaron de manera secuencial mediante dos varillas roscadas, fijadas con tuercas y arandelas de polímero aislante para asegurar la correcta polaridad de cada electrodo. Esta configuración se seleccionó a partir de pruebas preliminares, en las que se observó estabilidad en el flujo de corriente, baja generación de lodos y remoción eficiente de color y carga orgánica, además de un montaje más simple en comparación con otras configuraciones evaluadas.

Previo a la experimentación, las placas se limpiaron mediante inmersión en ácido clorhídrico al 15 % durante 5 min, con el fin de eliminar óxidos. Posteriormente, se enjuagaron con agua destilada y se secaron a 105 °C durante 1 h. La corriente eléctrica se suministró mediante una fuente de poder de voltaje y corriente regulables (TP3003E, Tekpower, China).

Diseño experimental Plackett-Burman

El diseño experimental Plackett-Burman se estableció con seis factores y dos niveles de evaluación (Cuadro 1) en el programa Minitab versión 19. En el caso de la

Table 1. Variables evaluated in the electrocoagulation process using a Plackett-Burman experimental design.
Cuadro 1. Variables analizadas del proceso de electrocoagulación mediante el diseño experimental Plackett-Burman.

Variable	Description / Descripción	Minimum value (-) / Valor mínimo (-)	Maximum value (+) / Valor máximo (+)	Unit / Unidad
A	pH	5	9	-----
B	Temperature / Temperatura	15	30	°C
C	Salt concentration / Concentración de sal	0	1000	ppm
D	Current intensity / Intensidad de corriente	1	3	A
E	Reactor agitation / Agitación del reactor	0	60	rpm
F	Reaction time / Tiempo de reacción	10	20	min

$$Removal\ (\%) = \frac{BOD - BOD_{5t}}{BOD_{5i}} \times 100 \quad (1)$$

where BOD_{5i} corresponds to the initial BOD_{5t} and BOD_{5t} represents the BOD_5 at the end of the treatment at time *t*.

Subsequently, an ANOVA was performed to identify the variables with a significant effect on the electrocoagulation process ($p < 0.05$). A Pareto chart was then constructed to visualize the magnitude of the effect of each variable and facilitate their selection (Ibarra-Taquez et al., 2017).

Box-Behnken experimental design

Once the significant variables were identified, a Box-Behnken experimental design with three factors and three levels (Table 2) was implemented to perform a more comprehensive statistical analysis and determine the optimal conditions of the electrocoagulation process. The design included 15 experimental runs, consisting of twelve factorial points and three central points, which allowed the estimation of experimental error and the evaluation of model reproducibility. Each run was carried out in triplicate, resulting in a total of 45 experimental assays. Meanwhile, the non-significant variables were kept constant: temperature at 25 °C, reaction time of 15 min, and absence of agitation. As in the previous design, the response variable was the percentage removal of BOD_5, and a Pareto chart was constructed to visualize the magnitude of the effect of each variable. The results were analyzed using Minitab software version 19.

Optimization analysis

The response surface methodology was applied to analyze the interaction between current intensity and pH, while maintaining the salt concentration constant

variable concentración de sal, el ajuste se realizó con NaCl (Sigma-Aldrich, EUA) como electrolito de soporte debido a su alta solubilidad, su capacidad para incrementar la conductividad eléctrica, su bajo costo y su uso ampliamente reportado en estudios recientes de electrocoagulación (Abdel-Rahman et al., 2025; Asefaw et al., 2024).

Al finalizar cada tratamiento, se calculó el porcentaje de remoción de materia orgánica (variable de respuesta), mediante la siguiente ecuación:

$$Remoción\ (\%) = \frac{DBO_{5i} - DBO_{5t}}{DBO_{5i}} \times 100 \quad (1)$$

donde DBO_{5i} corresponde a la DBO_{5t} inicial y DBO_{5t} es la DBO_5 al final del tratamiento en el tiempo *t*.

Posteriormente, se efectuó un análisis de varianza para identificar las variables con efecto significativo en el proceso de electrocoagulación ($p < 0.05$), y se elaboró un diagrama de Pareto para visualizar la magnitud del efecto de cada variable y facilitar su selección (Ibarra-Taquez et al., 2017).

Diseño experimental Box-Behnken

Una vez identificadas las variables significativas, se implementó un diseño experimental Box-Behnken de tres factores y tres niveles (Cuadro 2), con el objetivo de realizar un análisis estadístico más robusto y determinar las condiciones óptimas del proceso de electrocoagulación. El diseño incluyó 15 corridas experimentales, conformadas por doce puntos factoriales y tres puntos centrales, los cuales permitieron estimar el error experimental y evaluar la reproducibilidad del modelo. Cada corrida se ejecutó por triplicado, lo que dio un total de 45 ensayos experimentales. Por su parte, las variables no significativas se mantuvieron constantes: temperatura de 25 °C, tiempo de reacción de 15 min y

Table 2. Variables evaluated in the electrocoagulation process using Box-Behnken experimental design.
Cuadro 2. Variables analizadas del proceso de electrocoagulación mediante el diseño experimental Box-Behnken.

Variable	Description / Descripción	Minimum value (-) / Valor mínimo (-)	Mean value (0) / Valor medio (0)	Maximum value (+) / Valor máximo (+)	Unit / Unidad
A	Current intensity / Intensidad de corriente	1	2	3	A
B	pH	5	7	9	-----
C	Salt concentration / Concentración de sal	0	500	1 000	ppm

at 1 000 ppm, a value that showed the highest removal efficiency in the preliminary test. The purpose of the response surface plot is to visualize the trend of the variables and define the optimal operating conditions for the electrocoagulation process (Veli et al., 2019).

Characterization of treated water

The pH of wastewater was adjusted to 7 using a 0.1 M NaOH solution. Subsequently, the electrocoagulation process was carried out under optimized conditions. Samples of untreated wastewater and treated water were collected and analyzed according to the protocol described in the characterization selection. The results were compared with the initial values of wastewater and with the permissible limits established in NOM-003-SEMARNAT-1997 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 1998).

Cost analysis

The cost of electrical consumption ($C_{electric}$) of the process (MXN·m^{-3}) was estimated using Equation 2.

$$C_{electric} = \frac{U \times I \times t_1}{1000 \times V} \times P_1 \quad (2)$$

where U is the applied voltage (V), I is the current intensity (A), t_1 is the electrocoagulation time (h), V is the volume of treated wastewater (m^3) and P_1 is the price of kWh under the commercial electricity tariff in Mexico for August 2025 (MXN·kW^{-1}·h^{-1}).

On the other hand, the cost associated with electrode consumption was estimated using Equation 3:

$$C_{electrode} = \frac{I \times t_2 \times M \times 3.6}{z \times F \times V} \times P_2 \quad (3)$$

where I is the current intensity (A), t_2 is the electrocoagulation time (h), M is the molecular mass of aluminum, z is the number of electrons transferred, F is the Faraday constant (96487 C·mol^{-1}), V is the volume of treated wastewater (m^3) and P_2 is the price of aluminum plates in Mexico in August 2025 (MXN).

ausencia de agitación. Al igual que con el diseño anterior, la variable de respuesta fue el porcentaje de remoción de DBO_5 y se elaboró un diagrama de Pareto para visualizar la magnitud del efecto de cada variable. El análisis de los resultados se realizó en el programa Minitab versión 19.

Análisis de optimización

Se aplicó la metodología de superficie de respuesta para analizar la interacción entre la intensidad de corriente y el pH, manteniendo constante la concentración de sal en 1 000 ppm, valor que mostró la mayor eficiencia de remoción en las pruebas preliminares. La finalidad de las gráficas de superficie de respuesta es visualizar la tendencia de las variables y definir las condiciones de operación óptimas para el proceso de electrocoagulación (Veli et al., 2019).

Caracterización del agua tratada

El pH del agua residual se ajustó a 7 con una solución de NaOH (0.1 M). Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de electrocoagulación bajo las condiciones optimizadas. Se recolectaron muestras de agua residual sin tratar y de agua tratada, y se analizaron conforme al protocolo descrito en la sección de caracterización. Los resultados obtenidos se compararon con los valores iniciales del agua residual y con los límites permisibles establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 1998).

Análisis de costos

El costo del consumo eléctrico ($C_{eléctrico}$) del proceso (MXN·m^{-3}) se estimó a partir de la ecuación 2.

$$C_{eléctrico} = \frac{U \times I \times t_1}{1000 \times V} \times P_1 \quad (2)$$

donde U el voltaje aplicado (V), I es la intensidad de corriente (A), t_1 es tiempo de la electrocoagulación (h), V es volumen del agua residual tratada (m^3) y P_1 es el precio del kWh en tarifa de consumo comercial para México en el mes de agosto de 2025 (MXN·kW^{-1}·h^{-1}).

Finally, the operating cost ($C_{operation}$) of the electrocoagulation process was estimated by summing both components, according to Equation 4 proposed by González-Pérez et al. (2025):

$$C_{operation} = C_{electric} + C_{electrode} \quad (4)$$

Results and discussion

Wastewater characterization

The analyzed wastewater showed a dark brown color, attributed to the presence of pectins, tannins, and their derivatives formed during the coffee depulping process (Samuel, 2021). The results of the physicochemical characterization (Table 3) were consistent with the values reported for the 2019-2020 harvest season, in which a pH of 4.08 ± 0.01, EC of 580.00 ± 1.93 µS·cm^{-1} and TSS of 337.00 ± 1.15 mg·L^{-1} were recorded (Hernández-Martínez et al., 2021). This similarity suggests stability in the characteristics of coffee processing wastewater in the region.

The pH value of 4.83 ± 0.21 confirms the acidic nature of the effluent, primarily associated with the formation of organic acids during mucilage fermentation, a process mediated by microbial activity acting on reducing sugars (Morales-Rojas et al., 2020). This value falls within the range of 4.6 to 5.3 reported for coffee processing wastewater (Bui, 2017; Dobrosz-Gómez et al., 2020). The initial pH is a critical operational parameter in electrocoagulation, because it directly influences EC and the efficiency of the electrochemical process.

Regarding inorganic parameters, the EC (580.84 ± 3.84 µS·cm^{-1}) and TDS (323.75 ± 4.91 ppm) values indicate a moderate salt content, attributed to the use of clean water without contamination. These values are consistent with those reported by Asha and Manoj-Kumar (2015), who noted that the EC of wastewater can be experimentally modified

Por otro lado, el costo asociado al consumo del electrodo se estimó con la ecuación 3:

$$C_{electrode} = \frac{I \times t_2 \times M \times 3.6}{z \times F \times V} \times P_2 \quad (3)$$

donde I es la intensidad de corriente (A), t_2 es tiempo de la electrocoagulación (h), M es la masa molecular del aluminio, z es el número de electrones de transferencia, F es la constante de Faraday (96487 C·mol^{-1}), V es el volumen del agua residual tratada (m^3) y P_2 es el precio de las láminas de aluminio vigente en México en agosto de 2025 (MXN).

Finalmente, el costo de operación ($C_{operación}$) del proceso de electrocoagulación se estimó mediante la suma de ambos componentes, de acuerdo con la ecuación 4 propuesta por González-Pérez et al. (2025):

$$C_{operación} = C_{eléctrico} + C_{electrodo} \quad (4)$$

Resultados y discusión

Caracterización del agua residual

El agua residual analizada presentó un color café oscuro, atribuible a la presencia de pectinas, taninos y sus derivados formados durante el proceso de despulpado del café (Samuel, 2021). Los resultados de la caracterización fisicoquímica (Cuadro 3) mostraron concordancia con los valores reportados en la cosecha 2019-2020, en la que se registró un pH de 4.08 ± 0.01, CE de 580.00 ± 1.93 µS·cm^{-1} y SST de 337.00 ± 1.15 mg·L^{-1} (Hernández-Martínez et al., 2021). Esta similitud sugiere estabilidad en las características del agua residual del beneficio de café en la región.

El pH de 4.83 ± 0.21 confirma la naturaleza ácida del efluente, asociada principalmente a la formación de ácidos orgánicos durante la fermentación del mucílago, proceso mediado por la actividad microbiana sobre los azúcares reductores (Morales-Rojas et al., 2020).

Table 3. Physicochemical characteristics of coffee processing wastewater.
Cuadro 3. Características fisicoquímicas del agua residual del beneficio de café.

Parameter/Parámetro	Value/Valor	Unit/Unidad
Temperature/Temperatura	12.30 ± 0.33	°C
pH	4.83 ± 0.21	-----
EC/CE	580.84 ± 3.84	µS·cm^{-1}
TDS	323.75 ± 4.91	ppm
TSS/SST	731.33 ± 10.60	mg·L^{-1}
BOD_5/DBO_5	888.43 ± 16.74	mg·L^{-1}
COD/DQO	1 428.95 ± 41.27	mg·L^{-1}

EC: electrical conductivity; TDS: total dissolved solids; TSS: total suspended solids; BOD_5: biochemical oxygen demand; COD: chemical oxygen demand.

CE: conductividad eléctrica; TDS: sólidos totales disueltos; SST: sólidos suspendidos totales; DBO_5: demanda bioquímica de oxígeno; DQO: demanda química de oxígeno.

through the addition of NaCl and NaOH to optimize electrocoagulation. However, excessively high conductivity levels may promote electrode scaling and the formation of salt layers that hinder ion generation.

Regarding organic parameters, the measured TSS (731.33 ± 10.60 mg·L^{-1}), BOD_5 (888.43 ± 16.74 mg·L^{-1}) and COD (1 428.95 ± 41.27 mg·L^{-1}) values were considerably lower than those reported by Asha et al. (2021) and Dobrosz-Gómez et al. (2020), who documented TSS ranges of 2 300 to 2 500 mg·L^{-1}, COD of 3 465 to 16 684 mg·L^{-1} and BOD_5 of 1 267 to 13 500 mg·L^{-1}. This difference may be attributed to greater dilution of the effluent during wet coffee processing, indicating that the operational conditions of the processing stage directly influence the organic load of wastewater. In this regard, this aspect should be considered when designing treatment systems.

Results of the Plackett-Burman experimental design

The Pareto chart of standardized effects (Figure 2) allowed the identification of variables with a significant effect ($p < 0.05$) on BOD_5 removal. Salt concentration was the most influential factor, as it enhanced electron transport and promoted electrocoagulation. The second most important factor was current intensity, which is associated with the amount of coagulant generated. pH ranked third in importance, as it influences the formation of ionic coagulating species (Aguilar-Ascón, 2015).

Este valor se encuentra dentro del rango de 4.6 a 5.3 reportado para aguas residuales del beneficio de café (Bui, 2017; Dobrosz-Gómez et al., 2020). El pH inicial es un parámetro operativo crítico en electrocoagulación, ya que influye directamente en la CE y en la eficiencia del proceso electroquímico.

En relación con los parámetros inorgánicos, los valores de CE (580.84 ± 3.84 µS·cm^{-1}) y TDS (323.75 ± 4.91 ppm) evidencian un contenido moderado de sales, atribuible al uso de agua limpia sin contaminación. Estos valores coinciden con lo reportado por Asha y Manoj-Kumar (2015), quienes señalan que la CE del agua residual se modifica experimentalmente mediante la adición de NaCl y NaOH para optimizar la electrocoagulación. No obstante, conductividades excesivamente elevadas pueden favorecer la formación de incrustaciones en los electrodos y la generación de capas de sales que dificultan la generación de iones.

Respecto a los parámetros orgánicos, los valores obtenidos de SST (731.33 ± 10.60 mg·L^{-1}), DBO_5 (888.43 ± 16.74 mg·L^{-1}) y DQO (1 428.95 ± 41.27 mg·L^{-1}) fueron considerablemente menores en comparación con los reportados por Asha et al. (2021) y Dobrosz-Gómez et al. (2020), quienes documentaron rangos de SST de 2 300 a 2 500 mg·L^{-1}, DQO de 3 465 a 16 684 mg·L^{-1} y DBO_5 de 1 267 a 13 500 mg·L^{-1}. Esta diferencia se podría atribuir a una mayor dilución del efluente durante el beneficio húmedo, lo cual evidencia que las condiciones operativas del beneficio influyen directamente en la carga orgánica del agua residual. En

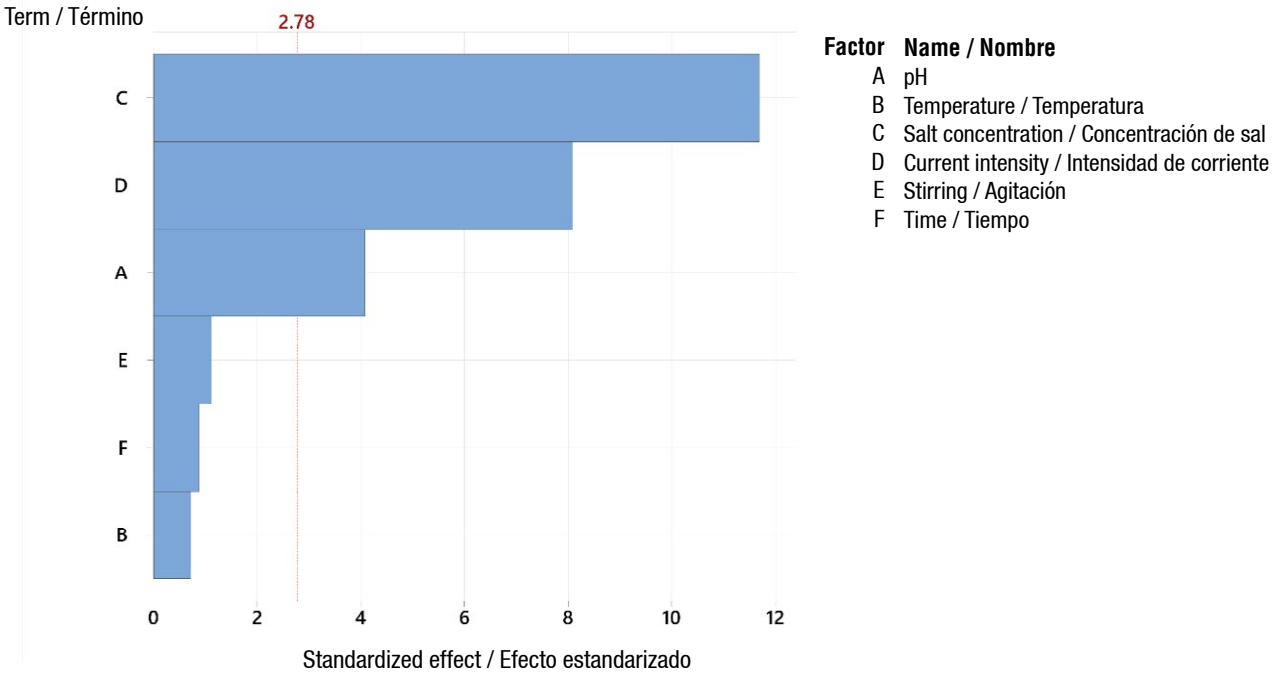

Figure 2. Pareto chart of the analyzed variables in the electrocoagulation process using the Plackett-Burman experimental design.

Figura 2. Diagrama de Pareto de las variables analizadas del proceso de electrocoagulación mediante el diseño experimental Plackett-Burman.

The Plackett-Burman design did not reveal two-factor interactions among the variables, as it is intended to discriminate between significant and non- significant factors. Based on these results, salt concentration, current intensity, and pH were selected for the Box-Behnken design, incorporating central points to analyze factor interactions and determine the optimal operating conditions.

Results of the Box-Behnken experimental design

The results revealed that salt concentrations and pH were the parameters with the greatest influence, which is consistent with the findings reported by Ibarra-Taquez et al. (2018). However, Dobrosz-Gómez et al. (2020) observed a lower influence of current intensity, which may be attributed to the narrower range evaluated in the present study, focused on minimizing operating costs without compromising removal efficiency. The results are consistent with studies on the electrocoagulation of effluents from the soluble coffee processing industry, in which key variables such as initial pH, electrolyte concentration, current intensity, and operating time have been identified (Bui, 2017).

The standardized Pareto chart (Figure 3) shows the factors and their two-way interactions, ordered according to their standard error, and highlights those with the greatest effect on the response variable. Considering the significance level ($\alpha = 0.05$) and the error degrees of freedom (30), a Student's distribution was applied with $t_{0.25,35} = 2.03$. The factors with significant effects ($p < 0.05$) were A, AA, B, BB, AB, CC and BC, where A corresponds to pH, B to current intensity, and C to salt concentration.

The fitted model showed an R^2 de 91.21 %, indicating a high agreement between the experimental and predicted values. The quadratic model described the process as the two-way interactions exerted a stronger effect than the single factors. The high *F* value and the statistical significance ($p < 0.05$) confirm that most of the observed variability is explained by the fitted equations, which validates the selection of the variables included in the Box-Behnken design.

Optimization of the electrocoagulation process

The BOD_5 removal percentage was represented in relation to pH and current intensity. The plot showed a well-defined maximum within the experimental region, which allowed the identification of the optimal operating conditions of the electrocoagulation reactor to achieve maximum BOD_5 removal (Figure 4). Although current intensity (1–3 A) had a positive effect, its influence was lower compared with that of pH (5–9).

este sentido, resulta relevante considerar este aspecto en el diseño de sistemas de tratamiento.

Resultados del diseño experimental Plackett-Burman

El diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 2) permitió identificar las variables con efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la remoción de la DBO_5. La concentración de sal resultó ser el factor más influyente, ya que favorece el transporte de electrones y la electrocoagulación. En segundo lugar, se ubicó la intensidad de corriente, la cual se asocia a la cantidad de coagulante generado. El pH ocupó el tercer lugar en importancia, ya que incide en la formación de especies iónicas coagulantes (Aguilar-Ascón, 2015).

El diseño Plackett-Burman no evidenció interacciones dobles entre los factores, ya que está orientado a discriminar entre variables significativas y no significativas. Con base en estos resultados, se seleccionaron las variables concentración de sal, intensidad de corriente y pH para el diseño Box-Behnken, incorporando puntos centrales para analizar la interacción de los factores y establecer los valores óptimos.

Resultados del diseño experimental Box-Behnken

Los resultados revelaron que la concentración de sal y el pH fueron los parámetros que más influyeron, lo cual concuerda con lo reportado por Ibarra-Taquez et al. (2018). Sin embargo, Dobrosz-Gómez et al. (2020) observaron una menor influencia de la intensidad de corriente, lo cual se podría deber al menor rango evaluado en el presente estudio, enfocado en minimizar los costos operativos sin comprometer la eficiencia de remoción. Los resultados obtenidos son congruentes con investigaciones sobre la electrocoagulación de efluentes del proceso de café soluble, en las que se identifican como variables clave el pH inicial, la concentración del electrolito, la intensidad de corriente y el tiempo de operación (Bui, 2017).

El diagrama de Pareto estandarizado (Figura 3) muestra los factores y sus interacciones dobles, ordenados según su error estándar, y evidencia los que tuvieron un mayor efecto sobre la variable de respuesta. Debido al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) y a los grados de libertad del error (30), se aplicó una distribución *t* de Student con $t_{0.25,35} = 2.03$. Los factores con efecto significativo ($p < 0.05$) fueron A, AA, B, BB, AB, CC y BC, donde A corresponde al pH, B a la intensidad de corriente y C a la concentración de sal.

El modelo ajustado presentó un R^2 de 91.21 %, lo que indica una alta correspondencia entre los valores experimentales y los predichos. El modelo cuadrático

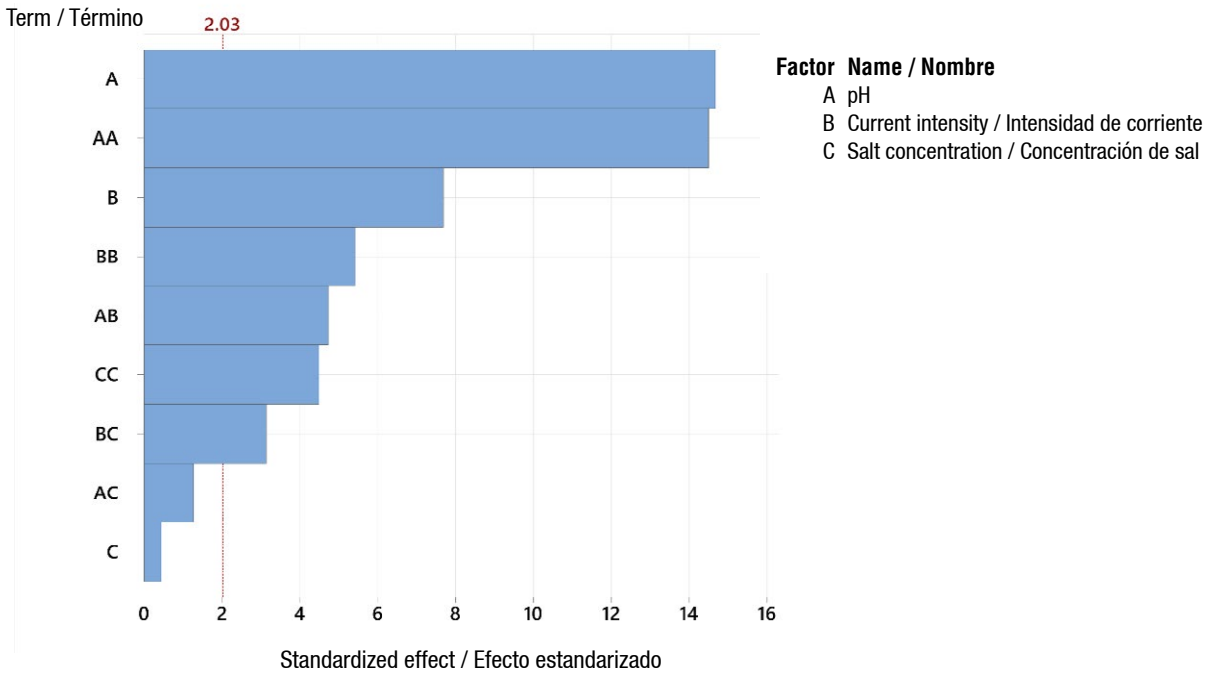

Figure 3. Pareto chart of the variables analyzed in the electrocoagulation process using the Box-Behnken experimental design.

Figura 3. Diagrama de Pareto de las variables analizadas del proceso de electrocoagulación mediante el diseño experimental Box-Behnken.

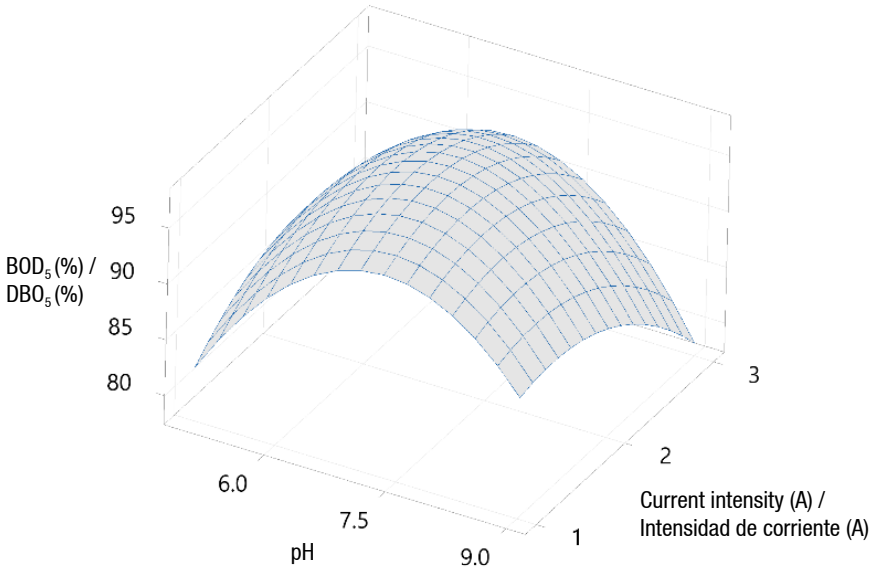

Figure 4. Response Surface plot showing the combined effect of pH and current intensity on the percentage removal of biochemical oxygen demand (BOD_5) during the electrocoagulation process.

Figura 4. Gráfica de superficie de respuesta del efecto combinado del pH y la intensidad de corriente sobre el porcentaje de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) en el proceso de electrocoagulación.

The pH showed two distinct effects on the process. Lower removal efficiencies were observed at the extreme values (5 and 9), while the highest removal occurred at pH 7. This trend suggests that increasing the pH improves the coagulation capacity up to an optimal point, after which further increases reduce the efficiency of the process. This behavior is consistent with the optimal pH range commonly reported for wastewater treatment (6-8) (Merma et al., 2020).

The current intensity showed a trend similar to that observed for pH, although with a less pronounced curvature. The optimal point was located before the central value, suggesting that high current intensities may induce adverse effects, such as the formation of hydroxides or ionic aluminum species with lower coagulating capacity and the excessive production of hydrogen bubbles, which negatively affect the floc aggregation (Merma et al., 2020).

Regarding waste generation, the amount of solids accumulated in the foam increased linearly in accordance with Faraday's law. When 1, 2, and 3 A were applied to 1 L of wastewater, 0.798 ± 0.098, 0.811 ± 0.056 and 0.855 ± 0.023 g of solids were generated, respectively. These values represented less than 1 % by weight, which is consistent with what is expected in electrocoagulation. The observed increase is explained by the direct relationship between current intensity and the electrochemical reactions occurring at the electrodes, since an increase in current can reduce the operating time of the process (Dobrosz-Gómez et al., 2020). However, from an operational and efficiency perspective, the use of low and constant current intensities combined with longer reaction times is recommended to maximize treatment efficiency and minimize undesirable effects on the treated effluent and the generated residues.

The contour plot (Figure 5) showed that the lowest removal efficiencies were associated with the extreme values of the operational variables, whereas the central region presented removal percentages above 95 %. The optimal region was defined between pH values of 6 and 8 and current intensities of 1 to 2.5 A, with a constant salt concentration of 1 000 ppm.

The optimum point that maximizes the removal percentage was located at the center of the highest efficiency region, identified by the dark blue shading (Figure 5), with pH values of 7.06, a current intensity of 1.77 A, and a salt concentration of 1 000 ppm (Figure 6). Analysis of the variable behavior reveals that pH shows a curvature with a defined maximum point, indicating that deviations from this value significantly affect process efficiency. Because the optimal pH is close to the neutral point, a value of 7 was established as

describió de manera adecuada el proceso, ya que las interacciones dobles ejercieron un efecto más marcado que los factores simples. El elevado valor de F y la significancia estadística ($p < 0.05$) confirman que la mayor parte de la variabilidad observada se explica por las ecuaciones ajustadas, lo que valida la selección de las variables incluidas en el diseño Box-Behnken.

Optimización del proceso de electrocoagulación

El porcentaje de remoción de la DBO_5 se representó en función del pH y la intensidad de corriente. La gráfica mostró un máximo bien definido dentro de la región experimental, lo que permitió identificar las condiciones óptimas de operación del reactor de electrocoagulación para alcanzar la máxima remoción de la DBO_5 (Figura 4). Aunque la intensidad de corriente (1–3 A) tuvo un efecto positivo, su influencia fue menor en comparación con la del pH (5–9).

El pH presentó un comportamiento con dos efectos diferenciados; con los valores extremos (5 y 9) se obtuvieron menores eficiencias de remoción, mientras que el máximo valor se alcanzó con el pH de 7. Este patrón indica que el incremento del pH favorece la capacidad coagulante, hasta alcanzar un punto óptimo, a partir del cual un aumento adicional reduce la eficiencia del proceso. Este comportamiento coincide con los rangos óptimos reportados para el tratamiento de aguas residuales (entre 6 y 8) (Merma et al., 2020).

La intensidad de corriente presentó una tendencia similar a la del pH, aunque con una curvatura menos pronunciada. El punto óptimo se localizó antes del valor central, lo cual sugiere que intensidades elevadas pueden inducir efectos adversos, como la formación de hidróxidos o especies iónicas de aluminio con menor capacidad coagulante y una producción excesiva de burbujas de hidrógeno, lo que afecta negativamente la agregación de los flóculos (Merma et al., 2020).

En cuanto a la generación de residuos, la cantidad de sólidos acumulados en la espuma aumentó de manera lineal conforme a la Ley de Faraday. Al usar 1, 2 y 3 A en 1 L de agua residual, se generaron 0.798 ± 0.098, 0.811 ± 0.056 y 0.855 ± 0.023 g de sólidos, respectivamente. Estos valores representan menos del 1 % en peso, que corresponde a lo esperado en electrocoagulación. El incremento observado se explica por la relación directa entre la intensidad de corriente y las reacciones electroquímicas que ocurren en los electrodos, ya que un aumento de corriente permite reducir el tiempo de operación del proceso (Dobrosz-Gómez et al., 2020). Sin embargo, desde una perspectiva operativa y de eficiencia, se recomienda usar intensidades de corriente bajas y constantes, combinadas con tiempos de reacción prolongados. Lo anterior con el fin de

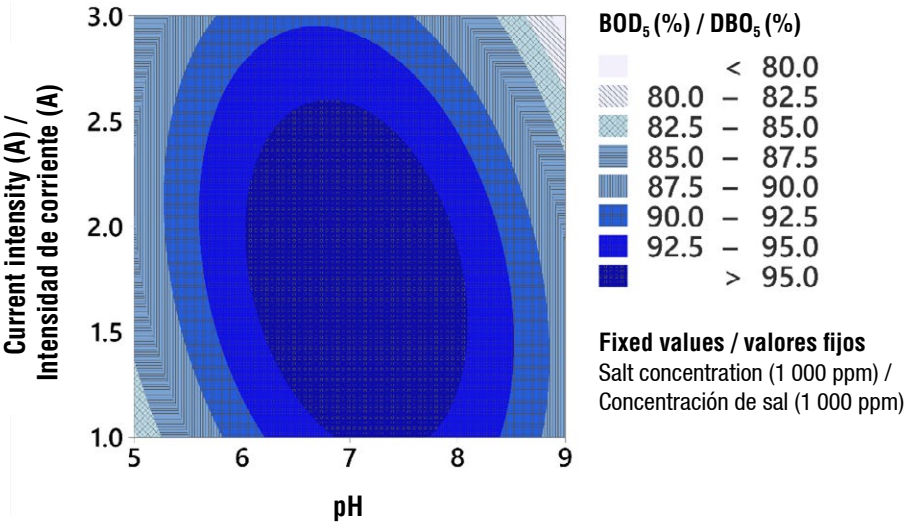

Figure 5. Contour plot of the combined effect of pH and current intensity on the percentage removal of biochemical oxygen demand (BOD_5) in the electrocoagulation process.

Figura 5. Gráfica de contorno del efecto combinado del pH y la intensidad de corriente sobre el porcentaje de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) en el proceso de electrocoagulación.

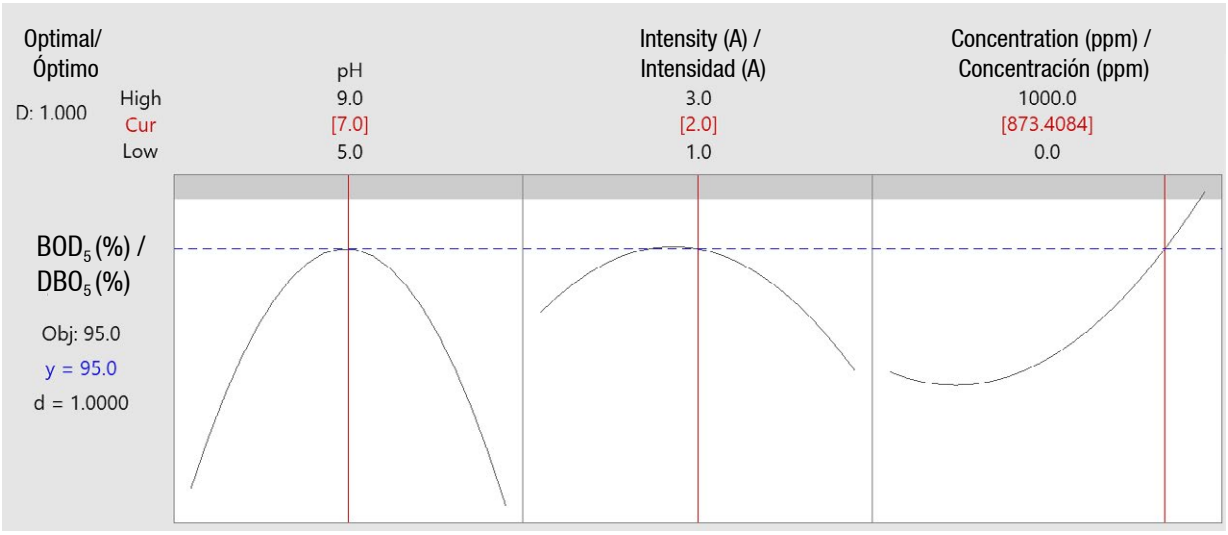

Figure 6. Optimization curves of the analyzed variables to enhance the removal of biochemical oxygen demand (BOD_5) in the electrocoagulation process.

Figura 6. Curvas de optimización de las variables analizadas para eficientar la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) en el proceso de electrocoagulación.

optimal, in agreement with the ranges reported in other studies for the treatment of coffee-processing wastewater (Ibarra-Taquez et al., 2018).

Characterization of the treated water

Once the optimal conditions were established, the corresponding experimental assays were performed, and the treated water was characterized. The results

maximizar la eficiencia del tratamiento y minimizar efectos indeseables sobre el efluente tratado y los residuos generados.

La gráfica de contorno (Figura 5) confirmó que las menores eficiencias de remoción se asociaron con los valores extremos de las variables operativas, mientras que la región central presentó porcentajes de remoción superiores al 95 %. La zona óptima se delimitó entre

were compared with the initial values of wastewater (with pH adjusted to 7) and with the maximum permissible limits (MLP) established in NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT, 1998) (Table 4)

Table 4 shows a moderate increase in pH of 7.14 %, attributable to the formation of $Al(OH)_3$ and $Al(OH)_4^-$ during the electrocoagulation process (Chezeau et al., 2020). It is important to highlight that the use of low current intensities limited variations in the final pH, allowing the direct use of the treated wastewater. Although the reference standard does not establish a specific pH value, the neutral or slightly basic character of the treated effluent reduces the risk of negative environmental impacts when used for agricultural irrigation.

In the case of electrical conductivity, its value decreased by 9.8 % compared with the wastewater value, despite the use of NaCl. The EC value of the treated water (542.50 ± 37.48 $\mu S \cdot cm^{-1}$) falls within the range reported by Escalona-Domenech et al. (2025), who indicate that the medium salinity of water ranges from 250 and 750 $\mu S \cdot cm^{-1}$ and does not represent a risk. Avelar-Roblero et al. (2023) mention that EC values in water below 700 $\mu S \cdot cm^{-1}$ are considered safe for agricultural use, whereas values between 700 and 3 000 $\mu S \cdot cm^{-1}$ are considered to pose a slight to moderate risk, and values above 3 000 $\mu S \cdot cm^{-1}$ are considered to represent a severe risk.

The visual evolution of the wastewater treatment (Figure 7) showed a progressive decrease in color and turbidity, consistent with the quantitative reduction of the parameters that define the organic load. The treated

valores de pH de 6 a 8 e intensidad de corriente de 1 a 2.5 A, con una concentración de sal constante de 1 000 ppm.

El punto óptimo que maximiza el porcentaje de remoción se localizó en el centro de la zona de mayor eficiencia, identificada por la tonalidad azul oscura (Figura 5), con valores de pH de 7.06, intensidad de corriente de 1.77 A y concentración de sal de 1 000 ppm (Figura 6). El análisis del comportamiento de las variables revela que el pH exhibe una curvatura con un punto máximo definido, lo que indica que las variaciones respecto a este valor afectan de manera significativa la eficiencia del proceso. Debido a que el pH óptimo se sitúa en un valor cercano al punto neutro, se establece el valor de 7 como óptimo, en concordancia con los rangos reportados en otros trabajos para el tratamiento de agua residual del beneficio de café (Ibarra-Taquez et al., 2018).

Caracterización del agua tratada

Una vez establecidas las condiciones óptimas, se realizaron los ensayos experimentales correspondientes y se caracterizó el agua tratada. Los resultados obtenidos se compararon con los valores iniciales del agua residual (con el pH ajustado a 7) y con los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT, 1998) (Cuadro 4).

En el Cuadro 4 se observa un incremento moderado del pH de 7.14 %, atribuible a la formación de $Al(OH)_3$ y $Al(OH)_4^-$ durante el proceso de electrocoagulación (Chezeau et al., 2020). Es importante resaltar que la aplicación de intensidades de corriente bajas limitó

Table 4. Comparison of the physicochemical parameters of wastewater and treated effluent with the maximum permissible limits (MPL) established in NOM-003-SEMARNAT-1997.

Cuadro 4. Comparación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual y del efluente tratado respecto a los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Parameter / Parámetro	Wastewater values / Valores del agua residual	Treated water values / Valores del agua tratada	MPL / LMP	Unit / Unidad	Difference (%) / Diferencia (%)
Temperature / Temperatura	20.00 ± 0.55	22.55 ± 0.49	NR	°C	+10.00
pH	7.00 ± 0.00	7.51 ± 0.22	NR	NA	+7.14
EC / CE	601.40 ± 4.27	542.50 ± 37.48	NR	$\mu S \cdot cm^{-1}$	-9.81
TDS	348.41 ± 5.29	312.50 ± 9.19	NR	ppm	-10.31
TSS / SST	741.56 ± 8.42	8.89 ± 2.13	20	$mg \cdot L^{-1}$	-98.94
BOD5 / DBO5	901.38 ± 8.21	13.56 ± 0.60	20	$mg \cdot L^{-1}$	-98.51
COD / DQO	1 558.41 ± 12.31	47.31 ± 7.51	NR	$mg \cdot L^{-1}$	-96.96

EC: electrical conductivity; TDS: total dissolved solids; TSS: total suspended solids; BOD_5: biochemical oxygen demand; COD: chemical oxygen demand; NR: value not reported in NOM-003-SEMARNAT-1997; NA: not applicable.

CE: conductividad eléctrica; TDS: sólidos totales disueltos; SST: sólidos suspendidos totales; DBO_5: demanda bioquímica de oxígeno; DQO: demanda química de oxígeno; ND: valor no reportado en la NOM-003-SEMARNAT-1997; NA: no aplica.

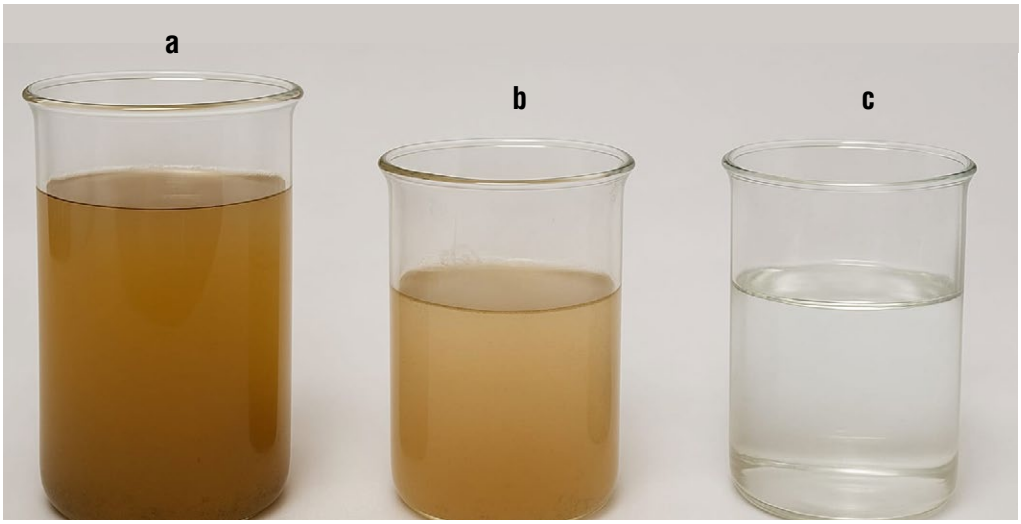

Figure 7. Wastewater samples from coffee processing: a) initial wastewater, b) water treated by electrocoagulation for 7.5 min, and c) water treated by electrocoagulation for 15 min.

Figura 7. Muestras del agua residual del beneficio de café: a) agua residual inicial, b) agua tratada mediante electrocoagulación durante 7.5 min y c) agua tratada mediante electrocoagulación durante 15 min.

water showed reductions of 98.94 % in TSS, 98.51 in BOD_5, and 96.96 % in COD, values higher than those reported by Chezeau et al. (2020), who documented BOD_5 removals of 85 %. These results confirm the high efficiency of the operating conditions established in the present study, as well as compliance with regulatory criteria for water reuse in irrigation without posing an environmental risk.

Electrocoagulation process costs

The estimated cost of electrical energy consumption was 11.58 MXN·m^{-3}, while the cost associated with electrode consumption was 12.44 MXN·m^{-3}. Overall, the total operating cost of the electrocoagulation process was estimated at 24.02 MXN·m^{-3} (1.33 USD·m^{-3}) under optimal conditions. This value is lower than that reported by Kobya et al. (2016), who estimated a cost of 35.00 MXN·m^{-3} attributed exclusively to electricity consumption under a monopolar parallel arrangement (MP-P). Similarly, González-Pérez et al. (2025) reported a total operating cost (electricity plus electrodes) of 24.56 MXN·m^{-3} under an MP-S arrangement for the tequila vinasse treatment.

The lower operating cost observed in this study is attributed to the use of low current intensities, the appropriate selection of the electrolyte (NaCl), and the use of aluminum electrodes, which present lower operating cost compared with iron electrodes (Chezeau et al., 2020). Several studies have estimated the total cost of the electrocoagulation process and highlight its economic competitiveness compared with chemical coagulation, which shows removal values close to

las variaciones del pH final, lo que permite el uso directo del agua residual tratada. Aunque la norma de referencia no establece un valor específico de pH, el carácter neutro o ligeramente básico del efluente tratado reduce el riesgo de impactos ambientales negativos al emplearse en riego agrícola.

En el caso de la CE, se logró disminuir su valor en un 9.8 % con respecto al valor del agua residual, pese al uso de NaCl. El valor de CE del agua tratada (542.50 ± 37.48 µS·cm^{-1}) se encuentra dentro del rango reportado por Escalona-Domenech et al. (2025), quienes señalan que la salinidad media del agua se encuentra entre 250 y 750 µS·cm^{-1} y no representa un riesgo. Avelar-Roblero et al. (2023) mencionan que valores de CE en agua menores de 700 µS·cm^{-1} se consideran sin riesgo para uso agrícola, mientras que valores entre 700 y 3 000 µS·cm^{-1} se consideran con riesgo de ligero a moderado y mayores de 3 000 µS·cm^{-1} se consideran con riesgo severo.

La evolución visual del tratamiento del agua residual (Figura 7) evidenció una disminución progresiva del color y la turbidez, en concordancia con la reducción cuantitativa de los parámetros que definen la carga orgánica. El agua tratada presentó una disminución de SST de 98.94 %, DBO_5 de 98.51 % y DQO de 96.96 %, valores superiores a los reportados por Chezeau et al. (2020), quienes documentaron remociones de DBO_5 de 85 %. Estos resultados confirman la alta eficiencia de las condiciones de operación establecidas en el presente trabajo, así como el cumplimiento de los criterios normativos para la reutilización del agua en riego sin implicar un riesgo ambiental.

50 % (Limón-Hernández et al., 2023). In the textile industry, a significant economic advantage has been documented, as treatment by electrocoagulation represents only 69.64 % of the cost associated with chemical coagulation (Sánchez-Hernández et al., 2024). Similarly, Ogedey and Oguz (2024) demonstrated in the tequila vinasse treatment that electrocoagulation reduces operating costs by decreasing the consumption of chemical additives used in conventional processes.

Conclusions

Coffee wet-processing wastewater showed a high organic load and an acidic pH, confirming the need for treatment prior to discharge or reuse. Batch electrocoagulation with aluminum electrodes, optimized through experimental design, achieved a removal of 98.5 % for BOD_5, 98.9 % for TSS, and 96.96 % for COD under optimal conditions (pH 7.06, electric current 1.77 A, and 1 000 ppm NaCl).

The treated effluent met the maximum permissible limits established in NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT, 1998) for reuse. From an economic perspective, the estimated energy cost of the treatment was 11.58 $MXN \cdot m^{-3}$, representing a reduction of up to 82 % compared with conventional processes. These results indicate that electrocoagulation is a technically and economically viable alternative for the sustainable treatment of coffee-processing wastewater.

Acknowledgments

The authors thank the Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora for providing access to the chemistry laboratory.

End of English version

Costos del proceso de electrocoagulación

El costo estimado del consumo eléctrico fue de 11.58 $MXN \cdot m^{-3}$, mientras que el costo asociado al consumo del electrodo fue de 12.44 $MXN \cdot m^{-3}$. En conjunto, el costo total de operación del proceso de electrocoagulación se estimó en 24.02 $MXN \cdot m^{-3}$ (1.33 $USD \cdot m^{-3}$) bajo las condiciones óptimas. Este valor resulta inferior al reportado por Kobya et al. (2016), quienes estimaron un costo de 35.00 $MXN \cdot m^{-3}$ únicamente por consumo eléctrico bajo un arreglo monopolar en paralelo (MP-P). Asimismo, González-Pérez et al. (2025) obtuvieron un costo total de operación (electricidad más electrodos) de 24.56 $MXN \cdot m^{-3}$ bajo un arreglo MP-S en el tratamiento de vinazas de la industria tequilera.

El menor costo de operación observado en este estudio se atribuye al uso de intensidades de corriente bajas, a la selección adecuada del electrolito (NaCl) y al empleo de electrodos de aluminio, los cuales presentan menores costos operativos en comparación con electrodos de hierro (Chezeau et al., 2020). Diversos estudios han estimado el costo total del proceso de electrocoagulación y resaltan su competitividad económica frente a la coagulación química, la cual presenta valores de remoción cercanos al 50 % (Limón-Hernández et al., 2023). En la industria textil, se ha documentado una ventaja económica significativa, ya que el tratamiento mediante electrocoagulación representa únicamente el 69.64 % del costo asociado a la coagulación química (Sánchez-Hernández et al., 2024). De manera similar, Ogedey y Oguz (2024) demostraron, en el tratamiento de vinazas de la industria tequilera, que la electrocoagulación reduce los costos operativos al disminuir el consumo de aditivos químicos empleados en los procesos convencionales.

Conclusiones

El agua residual del beneficio húmedo del café presentó alta carga orgánica y un pH ácido, lo que confirmó la necesidad de aplicar un tratamiento previo a su vertido o reutilización. La electrocoagulación discontinua con electrodos de aluminio, optimizada mediante diseños experimentales, exhibió remociones de 98.5 % de DBO_5, 98.9 % de SST y 96.96 % de DQO bajo las condiciones óptimas (pH de 7.06, intensidad de corriente de 1.77 A y 1 000 ppm de NaCl).

El efluente tratado cumplió con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT, 1998) para su reutilización. Desde un enfoque económico, el costo energético estimado del tratamiento fue de 11.58 $MXN \cdot m^{-3}$, lo cual representa una reducción de hasta 82 % respecto a procesos convencionales. Estos resultados posicionan la electrocoagulación como una alternativa técnica y

References / Referencias

Abdel-Rahman, A. S., Hegazey, B. E., Elshafai, M. M., & Hassanin, A. M. (2025). Using electrocoagulation as green and efficient technology for removing toxic heavy metals from industrial wastewater. *Engineering Research Journal*, *54*(1), 279-283. https://doi.org/10.21608/erjsh.2025.346762.1387

Aguilar-Ascón, E. (2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, *18*(35), 69-73. https://doi.org/10.15381/iigeo.v18i35.11843

Asefaw, K. T., Asaithambi, P., & Tegegn, M. (2024). Treatment of wet coffee processing wastewater using a pulsed-electrocoagulation process: optimization using response surface technique. *Applied Water Science*, *14*(3), 54. https://doi.org/10.1007/s13201-024-02118-1

económicamente viable para el tratamiento sostenible del agua residual del beneficio de café.

Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora por las facilidades otorgadas para el uso del laboratorio de química.

Fin de la versión en español

Asha, G., & Manoj-Kumar, B. (2015). Comparison of aluminum and iron electrodes for COD reduction from coffee processing wastewater by electrocoagulation process. *Journal of Scientific Research and Reports*, *9*(7), 1-10. https://doi.org/10.9734/JSRR/2016/22815

Asha, G., Manoj-Kumar, B., Achyuth, K. N., & Manoj, B. R. (2021). Coffee processing wastewater management: An overview. *Journal of Engineering Research and Reports*, *20*(11), 52-61. https://doi.org/10.9734/jerr/2021/v20i1117405

Avelar-Roblero, J. U., Ortega-Escobar, H. M., Mancilla-Villa, O. R., Ramírez-Ayala, C., Mendoza-Saldívar, I., & Khalil-Gardezi, A. (2023). Calidad agronómica de las aguas residuales en los distritos de riego Tula y Alfajayucan. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *39*, 487-499. https://doi.org/10.20937/RICA.54478

Bui, H. M. (2017). Optimization of electrocoagulation of instant coffee production wastewater using the response surface methodology. *Polish Journal of Chemical Technology*, *19*(2), 67-71. https://doi.org/10.1515/pjct-2017-0030

Chezeau, B., Boudriche, L., Vial, C., & Boudjemaa, A. (2020). Treatment of dairy wastewater by electrocoagulation process: Advantages of combined iron/aluminum electrodes. *Separation Science and Technology*, *55*(14), 2510-2527. https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1638935

Dobrosz-Gómez, I., Gómez-García, M. A., & Ibarra-Táquez, H. N. (2020). Tratamiento de aguas residuales de la industria del café soluble vía electrocoagulación – oxidación anódica. *Revista EIA*, *17*(34), 1-17. https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1328

Dobrosz-Gómez, I., Ibarra-Táquez, H. N., & Gómez-García, M.-Á. (2024). Evaluation of the environmental and economic scope of an electrocoagulation process for the treatment of wastewater from the instant coffee industry. *Journal of Solid State Electrochemistry*, *29*(10), 3441-3463. https://doi.org/10.1007/s10008-024-05940-4

Elnenay, A. M. H., Nassef, E., Malash, G. F., & Magid, M. H. (2017). Treatment of drilling fluids wastewater by electrocoagulation. *Egyptian Journal of Petroleum*, *26*(1), 203-208. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.03.005

Escalona-Domenech, R. Y., Villarreal-Fuentes, J. M., Infante-Mata, D. M., & Barrios-Calderón, R. J. (2025). Calidad del agua para uso agrícola y consumo humano en el río Huixtla, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *41*, 105-122. https://doi.org/10.20937/RICA.55101

González-Pérez, R., Fajardo-Montiel, A. L., Martínez-Orozco, E., Santiago-Olivares, N., Nápoles-Armenta, J., & García-Gómez, C. (2025). Electrocoagulation with Fe-SS electrodes as a fourth stage of tequila vinasses treatment for COD and color removal. *Processes*, *13*(6), 1637. https://doi.org/10.3390/pr13061637

Hernández-Martínez, I., Santiago-Segura, C. A., Limón-Hernández, R. A., López-Hernández, V., & Aguilar-Aguilar, F. A. (2021). Tratamiento de agua residual de beneficio de café mediante un biofiltro de bajo costo. *Revista Ingeniantes*, *8*(1), 60-66. https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes8no1vol1/8%20Biofitro%20cafe.pdf

Ibarra-Taquez, H. N., GilPavas, E., Blatchley, E. R., Gómez-García, M. A., & Dobrosz-Gómez, I. (2017). Integrated electrocoagulation-electrooxidation process for the treatment of soluble coffee effluent: optimization of COD degradation and operation time analysis. *Journal of Environmental Management*, *200*(1), 530-538. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.095

Ibarra-Taquez, H. N., Dobrosz-Gómez, I., y Gómez, M. Á. (2018). Multi-objective optimization of the Fenton process for the treatment of soluble coffee wastewater. *Información Tecnológica*, *29*(5), 111-122. https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000500111

Kobya, M., Gengec, E., & Demirbas, E. (2016). Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *101*, 87-100. https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.11.012

Limón-Hernández, R. A., Xochihua-Juan, J. L., López-Hernández, V., Hernández-Martínez, I., & Morales-Moguel, O. E. (2023). Aplicaciones de la electrocoagulación en el tratamiento de agua residual industrial. *Revista Multidisciplinaria de Ciencia, Innovación y Desarrollo*, *2*(1), 8-15. https://revistaremcid.utgz.edu.mx/Archivos/Vol2/Articulo%202.1-1.pdf

Medina-Collana, J. T., Ayllon-Ormeño, M., Julca-Meza, C., Moreyra-Cuadros, G., Carrasco-Venegas, L. A., Ancieta-Dextre, C. A., Rodríguez-Taranco, O. J., Avelino-Carhuaricra, C., Díaz-Bravo, P., & Montaño-Pisfil, J. A. (2024). Processes coupled to electrocoagulation for the treatment of distillery wastewaters. *Sustainability*, *16*(15), 6383. https://doi.org/10.3390/su16156383

Merma, A. G., Santos, B. F., Rego, A. S. C., Hacha, R. R., & Torem, M. L. (2020). Treatment of oily wastewater from mining industry using electrocoagulation: Fundamentals and process optimization. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(6), 15164-15176. https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.10.107

Morales-Rojas, E., Oliva-Cruz, S. M., Rascón-Barrios, J., Milla-Pino, M. E., Villegas-Rivas, D. A., & Chavez-Quintana, S. G. (2020). Coffee wastewater treatment system in the Province of Rodríguez de Mendoza, Peru. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, *7*(1), 84-90. https://doi.org/10.23850/24220582.2918

Muleta, W. S., Abdi, F. B., & Bekele, E. A. (2025). Removal of chromium from synthetic wastewater by electrocoagulation and using natural coagulant (blend of hen eggshell powder with lime): optimization of response surface methodology. *Applied Water Science*, *15*, 48. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02384-7

Ogedey, A., & Oguz, E. (2024). Application of electrocoagulation process for the disposal of COD, NH_3-N and turbidity from the intermediate sanitary landfill leachate. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*, 11243-11260. https://doi.org/10.1007/s11356-024-31937-7

Samuel, Z. A. (2021). Treatment of combined coffee processing wastewater using constructed wetland/*Cyperus-ustulatus* and *Typha-latifolia* plants process. *Global Nest Journal*, *23*(3), 429-433. https://doi.org/10.30955/gnj.003688

Sánchez-Hernández, S., Partida-Sedás, J. G., Cruz-Castillo, J. G., Cadena-Chamorro, E., Escamilla-Prado, E., & Valdez-Velarde, E. (2024). Coffee processing technologies and treatment of liquid effluents. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *27*(2), 63. https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/5099/2234

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1980, March 25). *Norma Mexicana NMXAA0031980: Aguas residuales - Muestreo*. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166762/NMX-AA-003-1980.pdf

Secretaría de Economía (SE). (2001, December 27). *Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) - Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación. https://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf

Secretaría de Economía (SE). (2016, April 18). *Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015: Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1998). *NOM-003-SEMARNAT-1997: Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público*. Diario Oficial de la Federación. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3297/1/nom-003-semarnat-1997.pdf

Veli, S., Arslan, A., Gülümser, Ç., Topkaya, E., Kurtkulak, H., Zeybek, S., Dimoglo, A., & İşgören, M. (2019). Advanced treatment of pre-treated commercial laundry wastewater by adsorption process: Experimental design and cost evaluation. *Journal of Ecological Engineering*, *20*(10), 172-182. https://doi.org/10.12911/22998993/113136