

Electrocoagulación de aguas residuales domésticas: Revisión sistemática de efectos operacionales

Electrocoagulation of domestic wastewater: Systematic review of operational effects

Eletrocoagulação de águas residuais domésticas: Revisão sistemática dos efeitos operacionais

Recibido: 16/04/2025 | Revisado: 04/05/2025 | Aceptado: 05/05/2025 | Publicado: 08/05/2025

Jhon Castillo

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0214-3586>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”. Ingeniería Ambiental, Ecuador

E-mail: jhon.castillo@espam.edu.ec

Yordy Moreira

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3134-3936>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”. Ingeniería Ambiental, Ecuador

E-mail: yordy.moreira@espam.edu.ec

Carlos Banchón

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0388-1988>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”. Ingeniería Ambiental, Ecuador

E-mail: carlos.banchon@espam.edu.ec

Resumen

El objetivo de este trabajo de revisión es evaluar la efectividad de la CE como alternativa sustentable para el proceso de purificación de efluentes residuales domésticos, considerando su potencial para remover contaminantes, su viabilidad técnica y económica, y su impacto en la protección de la salud pública y los ecosistemas. Esta revisión sistemática evalúa la electrocoagulación (EC) como una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas, centrándose en la remoción de contaminantes. Se analizaron diseños de reactores, materiales de electrodos, parámetros operativos y desafíos económicos y tecnológicos en base a la literatura existente. Los resultados revelan que la EC logra eficiencias de remoción superiores al 90% para demanda química de oxígeno, turbidez y materia orgánica, especialmente con electrodos de aluminio o combinaciones aluminio-hierro. No obstante, el pH, la intensidad eléctrica y el diseño del reactor son factores críticos que determinan su desempeño. Aunque los costos operativos exceden a los de métodos convencionales, la EC destaca por su versatilidad y menor generación de lodos. El presente estudio concluye que la EC tiene un potencial para el proceso de purificación de efluentes residuales domésticos, aunque su viabilidad industrial exige optimizar el consumo energético y reducir costos.

Palabras clave: Electrocoagulación; Aguas residuales; Sostenibilidad; Contaminación; Intensidad eléctrica; Tecnología ambiental.

Abstract

The objective of this review is to assess the effectiveness of electrocoagulation (EC) as a sustainable alternative for the purification of domestic wastewater effluents, considering its potential for contaminant removal, technical and economic feasibility, and its impact on public health and ecosystem protection. This systematic review evaluates EC as a sustainable option for domestic wastewater treatment, with a focus on pollutant removal. Reactor designs, electrode materials, operational parameters, and economic and technological challenges were analyzed based on existing literature. The results show that EC achieves removal efficiencies above 90% for chemical oxygen demand, turbidity, and organic matter, especially when using aluminum electrodes or aluminum-iron combinations. However, pH, electrical intensity, and reactor design are critical factors influencing performance. Although operational costs are higher than those of conventional methods, EC stands out for its versatility and lower sludge generation. This study concludes that EC has significant potential for domestic wastewater purification, although industrial-scale implementation requires optimization of energy consumption and cost reduction.

Keywords: Electrocoagulation; Wastewater; Sustainability; Pollution; Electrical intensity; Environmental technology.

Resumo

O objetivo desta revisão é avaliar a eficácia da eletrocoagulação (EC) como uma alternativa sustentável para o processo de purificação de efluentes domésticos, considerando seu potencial na remoção de contaminantes, viabilidade técnica e econômica, e impacto na proteção da saúde pública e dos ecossistemas. Esta revisão sistemática avalia a EC como uma opção sustentável para o tratamento de águas residuais domésticas, com ênfase na remoção de poluentes. Foram analisados o design de reatores, materiais dos eletrodos, parâmetros operacionais e desafios econômicos e tecnológicos

com base na literatura existente. Os resultados revelam que a EC alcança eficiências de remoção superiores a 90% para demanda química de oxigênio, turbidez e matéria orgânica, especialmente com eletrodos de alumínio ou combinações de alumínio e ferro. No entanto, o pH, a intensidade elétrica e o design do reator são fatores críticos para o seu desempenho. Embora os custos operacionais sejam superiores aos dos métodos convencionais, a EC se destaca por sua versatilidade e menor geração de lodo. Este estudo conclui que a EC apresenta um potencial significativo para a purificação de efluentes domésticos, embora sua viabilidade industrial exija a otimização do consumo de energia e a redução de custos.

Palavras-chave: Eletrocoagulação; Águas residuais; Sustentabilidade; Poluição; Intensidade elétrica; Tecnologia ambiental.

1. Introducción

Entre los factores más relevantes que inciden en la contaminación ambiental se encuentra la disposición efluentes contaminados a receptores sin ningún tipo de tratamiento (Koyuncu & Arıman, 2020). Los efluentes contaminados domésticos grises, excluyendo los del inodoro, se generan en actividades domésticas como la limpieza de utensilios, el baño, las duchas y los residuos de cocina, representando un volumen muy elevado de producción (Tello et al., 2019). De hecho, su generación puede representar alrededor del 75% del total de efluentes contaminados producidos por los hogares y el volumen total de aguas grises equivale aproximadamente al 69% del consumo total de agua doméstica (Barışçı & Turkay, 2016).

Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre Recursos Hídricos, Europa trata el 71% de sus aguas residuales, Medio Oriente y el norte de África el 51%, y América Latina cerca del 20%. Además, en 32 de los 48 países de África no existen datos sobre generación (Lu et al., 2021). A nivel global, aproximadamente el 70% del recurso hídrico dulce disponible es utilizada por la agricultura, mientras que el 22% corresponde al sector industrial. Cabe destacar que la población mundial actual es cuatro veces mayor que hace un siglo. No obstante, el consumo total del recurso hídrico se ha incrementado nueve veces y la necesidad de agua industrial cuarenta (Mejía et al., 2006). El acceso básico al agua para garantizar la hidratación y la higiene mínima se estima en 20 litros por persona por día. Sin embargo, un acceso óptimo, que abarca necesidades como, la preparación de alimentos, la higienización de ropa y el baño, requiere al menos 100 litros por persona por día (Widyarani et al., 2022).

Tariq y Mushtaq (2024) menciona que los efluentes contaminados sin tratar generan enfermedades como cólera, fiebre tifoidea, diarrea y problemas renales, causando la muerte de 297,000 niños menores de cinco años al año, lo que equivale a 800 niños por día, especialmente en regiones pobres de países como Afganistán, India entre otros.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible urge a los gobiernos a tratar eficazmente los efluentes residuales y reducir su vertido sin tratamiento a la mitad para 2030, alineándose con el Objetivo de Desarrollo Sostenible para mejorar la calidad del agua (Qadir et al., 2024). El saneamiento de los efluentes contaminados es vital para prevenir enfermedades y proteger ecosistemas, pero los métodos convencionales son ineficientes ante contaminantes emergentes y costosos de mantener (Sushila y Kumar, 2024). Dentro de este escenario, la EC destaca por su alta eficacia en eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos. Este método supera a los tradicionales por su flexibilidad, simplicidad operativa, menores tiempos de retención, rápida sedimentación de flóculos, mínima necesidad de químicos, baja producción de lodos y mayor compatibilidad ambiental (Mousa Zadeh et al., 2023; Omwene et al., 2018), posicionándose como una solución prometedora para la gestión sostenible del agua.

Ante la necesidad de revisar tecnologías de alta eficiencia, el objetivo del presente trabajo de revisión es evaluar la eficacia de la EC como una alternativa sostenible para el saneamiento de los efluentes contaminados, considerando su capacidad para remover contaminantes, su viabilidad técnica, económica, y su impacto en la protección de la salud pública y los ecosistemas.

2. Metodología

La metodología de este estudio se basó en un estudio de naturaleza cuantitativa dependiendo de la cantidad de artículos

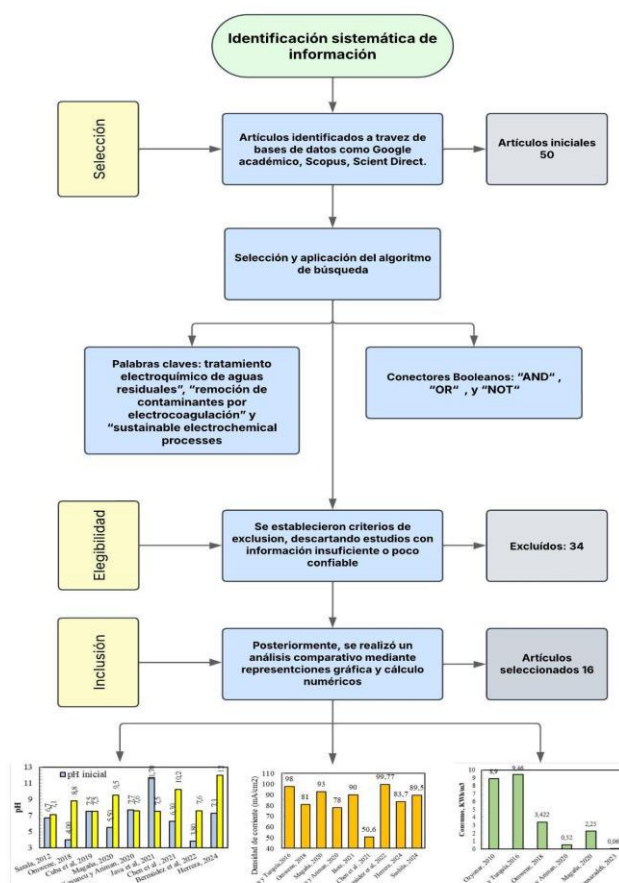
seleccionados y cualitativa en función del análisis realizado sobre los artículos (Pereira et al., 2018) en una revisión sistemática integrativa (Anima, 2014; Crossetti, 2012) de artículos científicos centrados en los factores que influyen en la eficiencia del saneamiento de los efluentes contaminados domésticos. Se recopilaron datos de bases como Google Académico y Scopus, y se implementaron las siguientes palabras claves de búsqueda: "Electrocoagulación; aguas residuales; sostenibilidad; contaminación; intensidad electrica; tecnología ambiental; water pollution; ", seleccionando estudios que proporcionaran información detallada sobre tipo de tratamiento, eficiencia reportada y porcentajes de remoción de materia orgánica.

Se establecieron criterios de exclusión, descartando estudios con información insuficiente o poco precisa. Se priorizaron aquellos que incluían múltiples parámetros de evaluación y datos confiables. Posteriormente, se realizó un análisis comparativo mediante representaciones gráficas y cálculos numéricos, lo que posibilitó identificar tendencias y relaciones entre los factores estudiados y el rendimiento optimizado de los tratamientos analizados.

La Figura 1 ilustra el proceso metodológico empleado, detallando desde la recopilación de información hasta el análisis final. Se destacan la identificación de bases de datos, la depuración de artículos y la clasificación de variables clave. Para la búsqueda de información, se usaron términos en español e inglés como "tratamiento electroquímico de efluentes contaminados", "remoción de contaminantes por electrocoagulación" y "sustainable electrochemical processes". Estos términos fueron combinados con operadores booleanos para optimizar la precisión en la restauración de artículos relevantes.

Este enfoque garantiza la rigurosidad del estudio, proporcionando una visión clara respecto a la influencia de diversos factores en la optimización de los saneamientos de los efluentes contaminados domésticos.

Figura 1 - Metodología sistemática empleada.



Fuente: Datos de Investigación (2025)

3. Resultados y Discusión

La Tabla 1 presenta los artículos científicos seleccionados para esta investigación, obtenidos tras una búsqueda sistemática en bases de datos especializadas, considerando publicaciones entre 2010 y 2024. Los estudios incluidos se enfocan en los factores que afectan el saneamiento de los efluentes contaminados domésticos mediante EC y fueron elegidos por aportar información sobre parámetros clave como la intensidad eléctrica, pH, conductividad eléctrica, tipos de electrodos utilizados, consumo energético, tiempo de remoción, así como la optimización de remoción de contaminantes expresada bajo el enfoque de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO). Esta selección garantiza un análisis actualizado y detallado de los factores que afectan la eficiencia del proceso.

Tabla 1 - Artículos seleccionados para la revisión sistemática sobre electrocoagulación en aguas residuales domésticas.

Nº	Autor	Título del artículo	Revista
1	Ozyonar (2010)	Operating Cost Analysis and Treatment of Domestic Wastewater by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes	Original Research
2	Sarala (2012)	Domestic Wastewater Treatment by Electrocoagulation with Fe-Fe Electrodes	International Journal of Engineering Trends and Technology
3	Barişçi y Turkay (2016)	Domestic greywater treatment by electrocoagulation using hybrid electrode combinations	ScienceDirect
4	Omwene (2018)	Phosphorus removal from domestic wastewater in electrocoagulation reactor using aluminium and iron plate hybrid anodes	ELSEVIER
5	Cuba et al.,(2019)	Tratamiento de agua residual procedente de lavadoras por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales	ResearchGate
6	Oktiawan (2020)	Effect of current strength on electrocoagulation using Al-Fe electrodes in COD and TSS removal of domestic wastewater	IOPSCIENCE
7	Magaña (2020)	Remoción de contaminantes del residual lacteo por electrocoagulación	Scielo
8	Koyuncu y Arıman (2020)	Domestic wastewater treatment by real-scale electrocoagulation process	Water Science and Technology
9	Java et al., (2021)	Eficiencia de la remoción de materia orgánica mediante electrocoagulación para tratar aguas residuales procedentes de mataderos	ResearchGate
10	Bote (2021)	Studies on electrode combination for COD removal from domestic wastewater using electrocoagulation	ScienceDirect
11	Chen et al., (2021)	Evaluation of electrocoagulation process for high-strength swine wastewater pretreatment	ScienceDirect
12	Rafique et al., (2022)	Application of copper and aluminium electrode in electro Coagulation process for municipal wastewater treatment: A case study at Karachi	Ecological Questions

13	Bermúdez et al., (2022)	Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia	ResearchGate
14	Mousazadeh (2023)	Domestic greywater treatment using electrocoagulation-electrooxidation process: optimisation and experimental approaches	Scientific Reports
15	Herrera (2024)	Boosting BOD/COD biodegradability of automobile service stations wastewater by electrocoagulation	Water Science and Technology
16	Sushila (2024)	Pollution Load Reduction from Domestic Wastewater with Electrocoagulation Process for Agricultural Reuse	Indian journal of science and technology

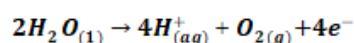
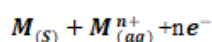
Fuente: Datos de investigación (2025).

3.1 Principios y fundamentos de la electrocoagulación

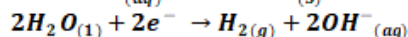
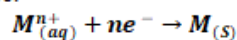
En el mecanismo de EC, un flujo de carga eléctrica atraviesa un medio acuoso por intermedio de electrodos metálicos, generalmente de Fe o Al, que actúan como ánodos y cátodos. Durante este proceso, los electrodos liberan iones metálicos al agua (Espitia et al., 2022), los cuales reaccionan para formar hidróxidos metálicos. Estos compuestos favorecen la desestabilización y posterior coagulación de contaminantes como partículas suspendidas, coloides y aceites, facilitando su eliminación del medio acuoso. Conforme los contaminantes experimentan desestabilización, se aglomeran bajo la forma de flóculos que son susceptibles de ser separados mediante sedimentación o flotación (Limón et al., 2023). Las interacciones químicas que ocurren en los electrodos, específicamente en el ánodo y el cátodo, han sido descritas como se detalla a continuación (Figura 2) (Javed & Mushtaq, 2023):

Figura 2 - Interacciones químicas.

En el ánodo:



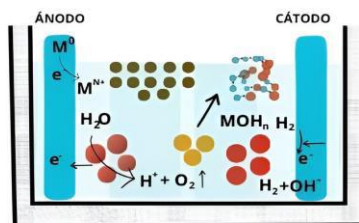
En el cátodo:



En donde M es el electrodo del metal. Fuente: Datos de investigación (2025).

La Figura 3 ilustra los cambios físicos y químicos en el transcurso del procedimiento de EC, ocurren reacciones químicas dentro del cuerpo de agua tratado así como también en los electrodos al aplicar un suministro eléctrico. En el electrodo positivo, se producen fenómenos de oxidación electroquímica que liberan iones metálicos (M^{n+}), por otro lado en el electrodo negativo tienen lugar reacciones de reducción que generan gas hidrógeno (H_2) y especies hidroxilo (OH^-). Simultáneamente, en el medio acuoso, se forman hidróxidos metálicos (MOH_n) y burbujas de oxígeno (O_2) e hidrógeno (H_2).

Figura 3 - Cambios físicos y químicos durante el mecanismo de EC.



Fuente: Elaborado por los Autores (2025).

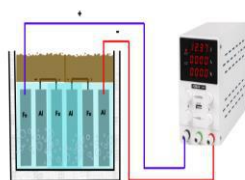
3.2 Estructuración del reactor

La estructuración de los reactores de la electrocoagulación (EC) depende del compartimiento electroactivo del sistema (laboratorio, piloto o industrial), los parámetros operacionales (como la disposición de los elementos electródicos, el suministro energético y la concentración de corriente eléctrica), la eficiencia en la remoción de contaminantes (determinada por la demanda eléctrica y la carga de contaminantes) y los aspectos económicos asociados (Oladipo et al., 2022).

En su configuración más simple, un reactor de EC está compuesto por un circuito electrolítico con un ánodo y un cátodo. Al ser conectados a una fuente de energía externa, el ánodo experimenta una secuencia de fenómenos de oxidación electroquímica que provoca su corrosión, por otro lado, en el electrodo negativo ocurren reacciones de reducción (Soberanis et al., 2011).

La Figura 4 ilustra los dos componentes esenciales del proceso de electrocoagulación: el reactor y el suministro energético. El suministro energético regula el voltaje y el amperaje según las demandas del proceso, garantizando una operación eficiente. En lo que respecta al reactor, cuyo desempeño depende de la estructuración la disposición de las placas de los elementos electroconductores (generalmente de Al o Fe), emplea configuraciones monopolares o bipolares para optimizar su funcionamiento

Figura 4 - Reactor de la electrocoagulación.

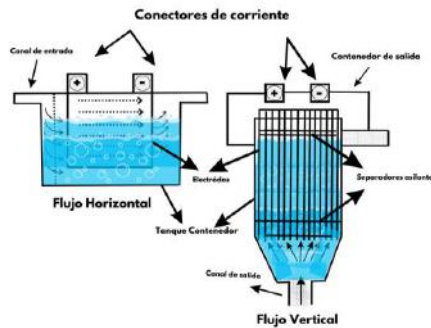


Fuente: Elaborado por los Autores (2025).

La eficiencia del reactor depende en gran parte de la geometría de la unidad electroquímica, la configuración de los elementos electroconductores y los implementos de mezcla. La orientación de las placas determina si el flujo será horizontal o vertical como se visualiza en la Figura 5, y la estructuración puede dividir el flujo en múltiples canales o concentrarlo en uno

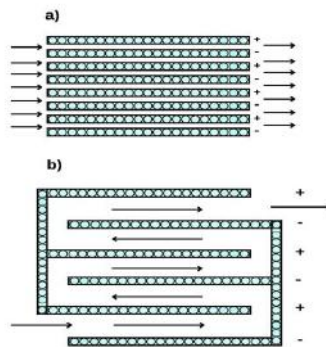
solo como se visualiza en la Figura 6 (López et al., 2021).

Figura 5 - Flujo del reactor Horizontal o vertical.



Fuente: López et al., (2021).

Figura 6 - Flujo multicanales (a) flujo de único canal (b).



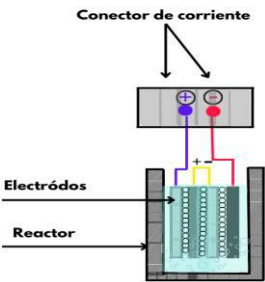
Fuente: López et al., (2021).

3.3 Conexión y configuración de los elementos electroconductores

Los métodos de conexión de electrodos no solo afectan la optimización de EC, sino también la demanda energética y la inversión total del proceso (Al-Raad et al., 2019). Las configuraciones de electrodos más comunes utilizados son: monopolares en conexiones paralelas (MP-P), monopolares en conexiones en serie (MP-S) y bipolares en conexiones en serie (BP-S) (Sridevi et al., 2020). En la estructura MP-S como se visualiza en la Figura 7, los electrodos externos están conectados a una fuente de energía, y la corriente fluye por medio de los elementos electroconductores intermedios, lo que genera su polarización (Lu et al., 2021).

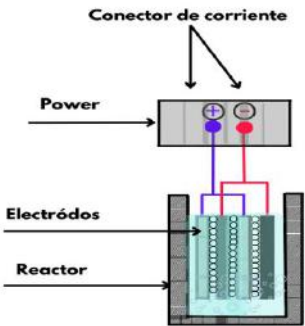
En la configuración MP-P todos los ánodos de sacrificio están conectados en paralelo, de manera similar a los cátodos como se aprecia en la Figura 8. Dentro de este sistema, la fuente energética se conecta directamente tanto a los ánodos como a los cátodos, permitiendo que el suministro eléctrico se distribuya entre los electrodos de acuerdo con la resistencia individual de cada celda (Boinpally et al., 2023). Desde otra perspectiva, en la configuración bipolar en serie BP-S como se aprecia en la Figura 9, los electrodos paralelos están conectados al suministro energético; esta configuración se caracteriza por su simplicidad estructural, lo que facilita el mantenimiento del sistema (Ibrahim et al., 2023).

Figura 7 - Conexión MP-S.



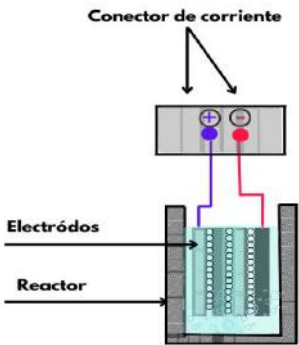
Fuente: Othmani et al. (2022).

Figura 8 - Conexión MP-P.



Fuente: Othmani et al. (2022).

Figura 9 - Conexión BP-S.



Fuente: Othmani et al. (2022),

3.4 Aplicaciones de la electrocoagulación en aguas residuales domésticas

Ritish y Savithiti (2024) en su investigación académica realiza un análisis comparativo de la eficiencia entre electrodos de hierro en estado sólido y en la figura de malla. Se midieron los sólidos totales disueltos (TDS) previo y posterior del tratamiento para analizar el rendimiento de cada tipo de electrodo. Los electrodos de malla de Fe demostraron ser significativamente efectivos en la desintegración de TDS que los electrodos en estado sólido. Después de 45 minutos de tratamiento, los electrodos de malla de Fe lograron separar el 75% de los TDS, en contraposición los electrodos sólidos solo alcanzaron un 58%.

3.5 Factores que afectan la eficiencia del tratamiento

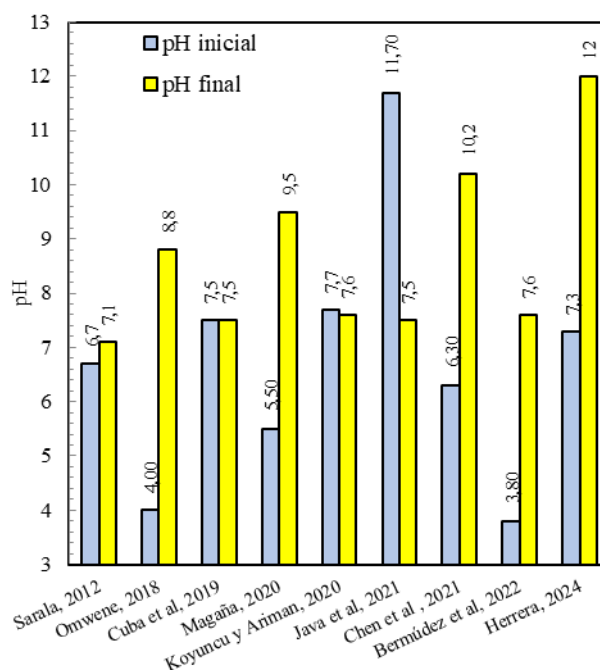
En el presente estudio se analizaron los factores que impactan la eficiencia del proceso de electrocoagulación, específicamente el pH inicial, la densidad de corriente, el tipo de electrodo, el período de tratamiento y la capacidad de conducción eléctrica. Los hallazgos destacan que cada uno de los siguientes parámetros ejerce una influencia determinante en la desintegración de contaminantes, alterando su eficiencia.

3.6 pH

El pH es crucial en la EC, puesto que en condiciones alcalinas se forman hidróxidos metálicos que mejoran significativamente la segmentación de coloides contaminantes, por tal motivo su optimización es clave para maximizar la eficacia del tratamiento (Shahedi et al., 2020).

La Figura 10 presenta los niveles de pH del agua residual al inicio y al final del proceso. En la gran parte de los casos, se observa un incremento del pH por arriba de 8,0, salvo en algunos estudios donde este se mantuvo constante.

Figura 10 - Valores promedio de pH previo y posterior del proceso de EC.



Fuente: Datos de investigación (2025)

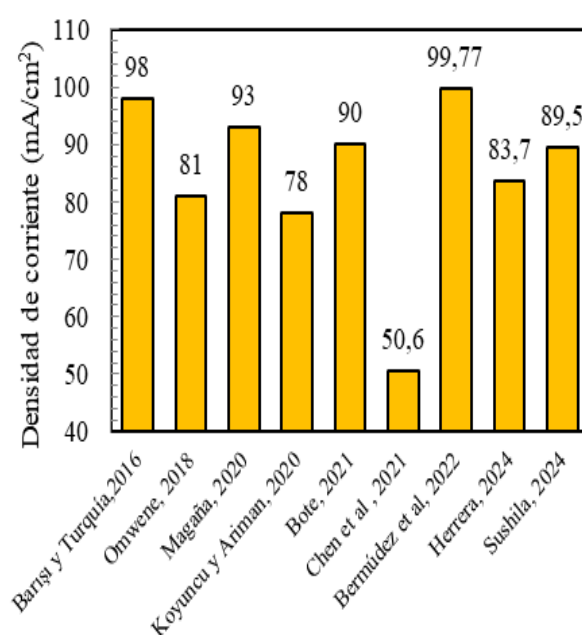
3.7 Intensidad de corriente por unidad de área

La intensidad de corriente por unidad de área es un parámetro clave en el mecanismo de electrocoagulación (EC), ya que controla la velocidad de las reacciones electroquímicas y la formación de coagulantes e hidróxidos. Además, influye en la producción de burbujas, afectando directamente el crecimiento de los flóculos durante el tratamiento (Armaignac y Cortón, 2010).

La Figura 11 muestra la intensidad de corriente por unidad de área (mA/cm^2) reportada en diversos estudios publicados entre el periodo 2016 y 2024. Se aprecia una amplia variabilidad en los parámetros empleados, con eficiencias de remoción superiores al 80 % en la gran parte de los casos. Sin embargo, no se identifica una relación directa entre el aumento de la intensidad de corriente por unidad de área y una mejora en la eficiencia del proceso.

Por ejemplo, Chen et al. (2021) aplicaron una intensidad de corriente por unidad de área elevada de $30 \text{ mA}/\text{cm}^2$, alcanzando una eficiencia limitada del 50,6 %. En contraste, Muñoz et al. (2022) lograron una eficiencia notablemente mayor del 99,77 % con una intensidad de corriente por unidad de área significativamente menor, de $7,20 \text{ mA}/\text{cm}^2$. Estos resultados sugieren que densidades inferiores a $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ tienden a proporcionar altos niveles de eficiencia, mientras que valores superiores pueden provocar una merma en el desempeño del proceso.

Figura 11 - Valores de intensidad de corriente por unidad de área utilizados en procesos de EC.

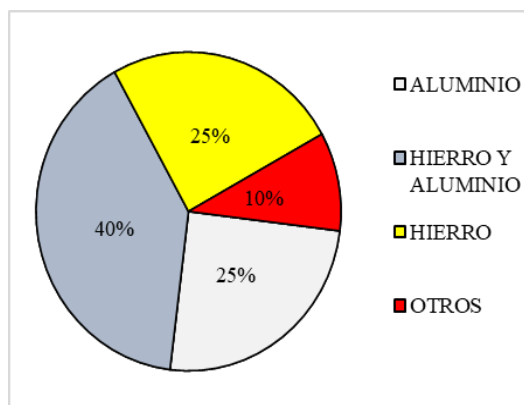


Fuente: Datos de investigación (2025).

3.8 Tipos de electrodos

La Figura 12 revela que el procedimiento de EC puede realizarse con diversos materiales como electrodos en el reactor. Según los datos analizados, los materiales más utilizados son el Al y Fe con tasas de uso del 50% y 40%, respectivamente mientras que materiales como el Cu y el acero inoxidable son menos comunes con solo un 10% de preferencia cada uno y el más utilizado es la combinación de hierro y aluminio, la cual presenta una mejora significativa en la eficiencia del proceso y alcanza un 60% de preferencia en su aplicación.

Figura 12 - Tipos de electrodos más utilizados.



Fuente: Datos de investigación (2025)

3.9 Consumo energético

La demanda energética en el mecanismo de EC se determina mediante la ecuación:

$$Ce = \frac{RT(h) \times U(V) \times I(A)}{V(m^3)} \left(\frac{(kW)(h)}{m^3} \right)$$

Donde:

Ce = Consumo energético

RT = Tiempo de reacción (Horas),

U = Voltaje aplicado (Voltios)

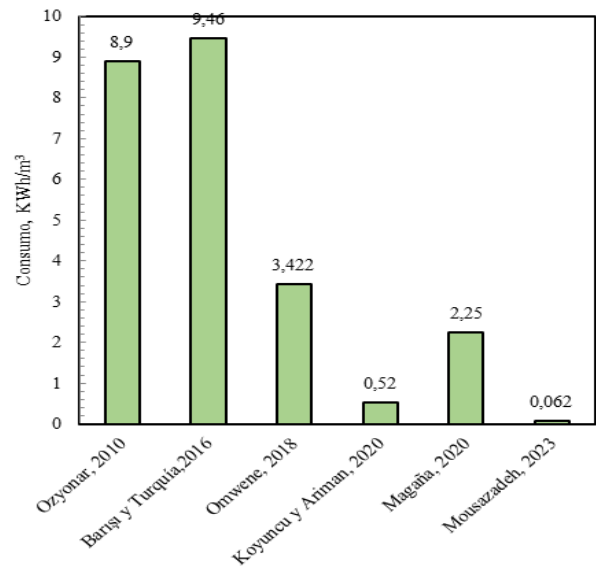
I = Corriente eléctrica (Amperios)

V = Volumen de agua procesada en m³ (Marlina et al., 2021)

La Figura 13 muestra la demanda energética reportada en cada estudio generalmente inferior a 10 kWh/m³. Sin embargo, destaca el estudio de Herrera et al., (2024), con un consumo excepcionalmente alto de 1080 kWh/m³. Este parámetro está influenciado por factores como el volumen de agua procesada, el alcance de contaminación y el periodo de tratamiento, estas variaciones subrayan la importancia de optimizar las condiciones operativas para minimizar la demanda energética sin comprometer la eficiencia del proceso.

No existe registro de una evaluación directa entre la demanda energética y la eficiencia del proceso, debido a que la demanda energética constituye un factor externo que no influye de manera determinante en las reacciones fundamentales de la electrocoagulación. Este aspecto depende de variables operativas como la intensidad de corriente por unidad de área, la estructuración de los electrodos y las características del agua porcesada como menciona Sushila (2024) en su investigación.

Figura 13 - Consumo energético de EC.

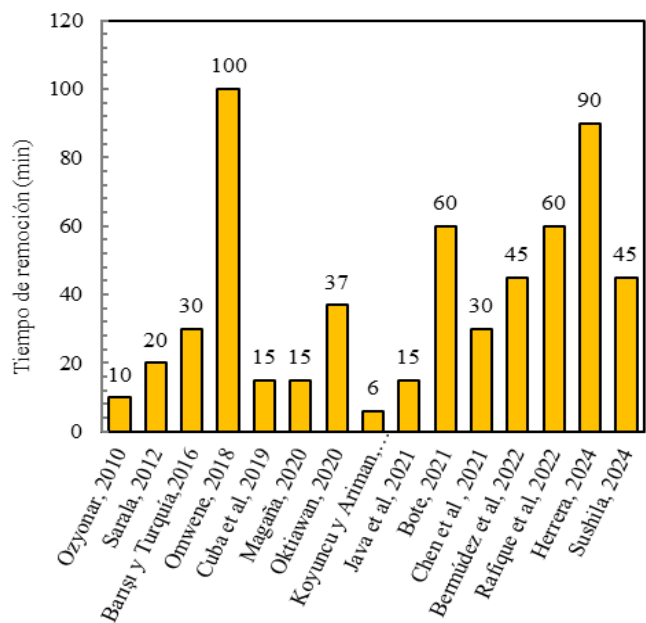


Fuente: Datos de investigación (2025).

3.10 Tiempo de retención

El periodo de retención es el necesario, con el propósito de que la electrólisis promueva la desestabilización coloidal y de este modo los sólidos suspendidos puedan formar floculos y así lograr la clarificación del agua (Ebba et al., 2022). En la Figura 14 se observa que, en la gran parte de los estudios analizados, el periodo de retención no excede los 50 minutos. Solo un pequeño número de estudios supera este tiempo, alcanzando en ciertos casos adicionales más de una hora, y en otras situaciones, hasta los 100 minutos (Omwene et al., 2018).

Figura 14 - Tiempo estimado de remoción.



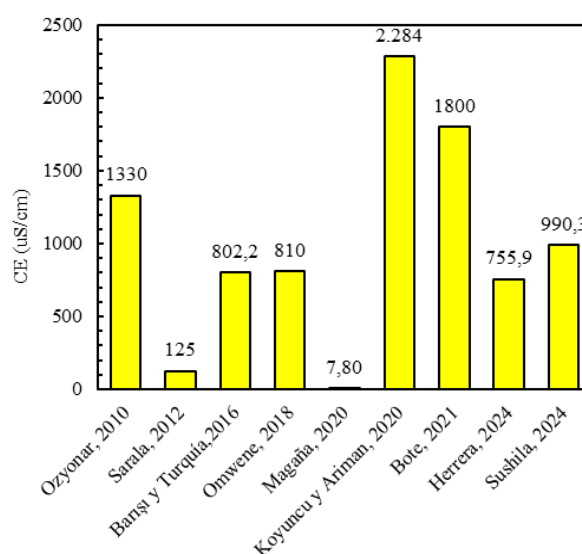
Fuente: Datos de investigación (2025).

3.11 Conductividad eléctrica

Espinoza et al. (2020) destacan la importancia de analizar las consecuencias de las variaciones temporales en la capacidad de conducción eléctrica sobre el rendimiento de la EC. Mantener este parámetro constante representa un desafío, debido a que las fluctuaciones dentro del reactor pueden generar condiciones subóptimas, disminuyendo tanto la eficiencia energética como el potencial de erradicación de contaminantes.

Como se ilustra en la Figura 15, los estudios analizados muestran una notable variabilidad en las magnitudes de conductividad eléctrica, que oscilan entre 7,8 y 2.284 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta amplia variación puede atribuirse a factores como las particularidades de los materiales tratados, los objetivos específicos de cada estudio y las condiciones operativas utilizadas.

Figura 15 - Conductividad eléctrica.



Fuente: Datos de investigación (2025).

3.12 Desafíos

Según Boinpally et al. (2023), la optimización de la efectividad de la EC enfrenta desafíos significativos, siendo uno de los componentes principales la estructura de los flóculos generados en el transcurso del procedimiento. Propiedades como la compactación, el índice de crecimiento, la resistencia estructural, el tamaño, el peso y el potencial de recrecimiento influyen directamente en la eficiencia del saneamiento de efluentes contaminados. Flóculos inestables o de baja densidad pueden afectar negativamente la sedimentación y la división de contaminantes, reduciendo la efectividad global del sistema.

Otro reto en la EC es la agrupación de cloruros en el agua procesada, derivada del uso de sales de aluminio y hierro para potenciar la eficiencia del proceso. Esta agrupación puede requerir procesos adicionales de eliminación mediante tecnologías secundarias, muchas de ellas no selectivas y con altos costos operativos (Alam et al., 2021).

Mao et al. (2023) señalan que los métodos electroquímicos pueden ser económicamente inviables en regiones con acceso limitado al recurso eléctrico, sumado a que la acumulación de lodos en los electrodos puede inhibir el proceso electrolítico en aplicaciones de operación continua. Asimismo, es posible que se requiera un postratamiento para remover las especies iónicas de Fe y Al presentes en los efluentes.

Aunque presente desafíos, la EC es una tecnología prometedora. No obstante, sus costos operativos, asociados al demanda energética y electrodos, limitan su implementación a escala industrial. Por ello, resulta crucial optimizar su eficiencia

energética para mejorar su viabilidad económica (Aryanti et al., 2024). Una de sus principales ventajas frente a los métodos convencionales es su alta eficacia en el saneamiento de efluentes aceitosos, ya que promueve la electrocoalescencia de las gotas de aceite, facilitando su separación (Mousazadeh et al., 2023).

3.13 Ventajas y desventajas de la EC

La EC se caracteriza por una estructuración simple y compacto que no requiere el uso de coagulantes químicos ni microorganismos, por lo que se convierte en una alternativa ecológica, versátil y energéticamente eficiente. Además, su automatización es viable, lo que facilita su integración en diversos mecanismos de purificación (Othmani et al., 2022).

Entre sus principales ventajas, la EC es altamente eficaz en la remoción de metales pesados, sólidos suspendidos, aceites y grasas, adaptándose a distintos tipos de efluentes residuales, como industriales, municipales y mineras. Sin embargo, su eficiencia puede verse afectada por factores como la conductividad eléctrica del agua (Rakhi, 2021).

A pesar de las ventajas que presenta, la EC presenta algunas limitaciones. Su operación puede implicar un alto consumo de electricidad, especialmente en regiones con costos energéticos elevados. Además, la formación de una película de óxido en los electrodos puede reducir la eficiencia del proceso, y en ciertas circunstancias se requiere un pretratamiento para optimizar la conductividad del agua (Othmani et al., 2022; Ndjomgouessa et al., 2022).

Otro aspecto a considerar es la producción de lodos metálicos, aunque en menor cantidad que otros métodos de coagulación química, estos deben ser gestionados adecuadamente para evitar impactos ambientales (Rithish, 2024). Asimismo, los electrodos requieren reemplazo periódico debido a su desgaste, lo que puede incrementar costos operativos (Ndjomgouessa et al., 2022).

La EC produce un efluente tratado incoloro, inodoro y claro, con baja generación de lodos. Además, las burbujas de gas generadas favorecen la flotación de los contaminantes, mejorando su separación. No obstante, la pasivación de los electrodos sigue siendo un desafío, ya que reduce la eficiencia del proceso con el tiempo (Jovanović et al., 2021).

3.14 Comparación con otros tratamientos

Cañizares et al. (2009) concluyen que la EC y la coagulación química presentan eficiencias similares. Sin embargo, desde una perspectiva económica, la EC es más rentable cuando se emplean dosis bajas o intermedias de Al, aunque su eficiencia puede verse afectada por el tipo y concentración del coagulante utilizado, especialmente en dosis elevadas.

Rabayah et al. (2016) compararon la capacidad de remoción de la demanda química de oxígeno en diferentes procesos de saneamiento de efluentes residuales, obteniendo valores de 83% para tratamientos biológicos, 87% para coagulación química (CQ) y 84% para EC. Aunque las eficiencias son comparables, los tiempos de tratamiento difieren significativamente: el proceso biológico requiere aproximadamente 4 horas, la CQ 45 minutos y la EC hasta 1 hora, lo que puede influir en la elección del método según las condiciones operativas y económicas.

Gasmi et al. (2022) realizaron un estudio comparativo entre EC y CQ, donde la EC mostró una mayor eficiencia en la remoción de DQO (63,05%), color (99,07%) y turbidez (96,31%), frente a la CQ, que alcanzó 54,02%, 96,21% y 93,7%, respectivamente. No obstante, el costo operativo de la EC fue sustancialmente mayor (0,47 USD/m³) en contraste con la CQ (0,2 USD/m³), lo que resalta la obligatoriedad de optimizar los gastos de operación para su implementación a gran escala.

3.15 Proyecciones a Futuro

La integración de la EC en sistemas híbridos representa una estrategia clave para incrementar la eficiencia y sostenibilidad del saneamiento de efluentes residuales a gran escala. Su combinación con otros procesos, como filtración avanzada o tratamientos biológicos, permite optimizar el rendimiento, reducir costos y minimizar impactos ambientales.

Actualmente, aproximadamente un 12% de instalaciones municipales e industriales de gran tamaño han implementado EC, evidenciando su potencial para transformar el sector del saneamiento de efluentes mediante soluciones más sostenibles y de menor requerimiento de espacio y supervisión (Liu et al., 2021).

4. Conclusión

La EC ha demostrado ser una tecnología altamente eficiente para remover contaminantes orgánicos e inorgánicos en aguas residuales domésticas, alcanzando eficiencias superiores al 90% en condiciones óptimas. Factores operativos como el pH, la densidad de corriente y la estructuración de electrodos son cruciales para su rendimiento, lo que destaca la importancia de regular estos parámetros para maximizar su eficacia y minimizar su impacto ambiental. Aunque la EC ofrece beneficios significativos, como menor generación de lodos y mayor flexibilidad operativa, los altos costos y la demanda energética limitan su adopción a gran escala. Superar estas barreras mediante la optimización de diseños de reactores y la integración con tecnologías complementarias es clave para promover su viabilidad industrial. Finalmente la incorporación de tecnologías avanzadas como la EC es esencial para cumplir los propósitos de la Agenda 2030, especialmente en el refinamiento de las características físico-químicas del agua y la preservación del bienestar publico. Este enfoque innovador ayuda a reducir la descarga de efluentes residuales sin tratar, contribuyendo a la prevención de enfermedades relacionadas con la contaminación hídrica y la preservación de ecosistemas vulnerables.

Referencias

- Al-Raad, A., Hanafiah, M., Samir, A., Ajeel, M., Basheer, A., Aljayashi, T., & Toriman, M. (2019). Treatment of Saline Water Using Electrocoagulation with Combined Electrical Connection of Electrodes. *Processes*, 7, 242. <https://doi.org/10.3390/pr7050242>
- Anima. (2014). Revisão bibliográfica sistemática integrativa. Biblioteca Virtual de Enfermagem. https://biblioteca.cofen.gov.br/wp-content/uploads/2019/06/manual_revisao_bibliografica-sistematica-integrativa.pdf
- Armaignac, E. O., & Cortón, R. H. (2010). Tecnología química vol. xxx, no. 1, 2010 21 estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de hierro. 1. <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543769003.pdf>
- Aryanti, P. T. P., Nugroho, F. A., Phalakornkule, C., & Kadier, A. (2024). Energy efficiency in electrocoagulation processes for sustainable water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), Article 6. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114124>
- Barışçı, S., & Turkyay, O. (2016). Domestic greywater treatment by electrocoagulation using hybrid electrode combinations. *Journal of Water Process Engineering*, 10, 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.01.015>
- Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., & Vemuri, J. (2023a). A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle*, 4, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>
- Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., & Vemuri, J. (2023b). A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle*, 4, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>
- Cañizares, P., Martínez, F., Jiménez, C., Sáez, C., & Rodrigo, M. A. (2009). Technical and economic comparison of conventional and electrochemical coagulation processes. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 84(5), Article 5. <https://doi.org/10.1002/jctb.2102>
- Ebba, M., Asaithambi, P., & Alemayehu, E. (2022). Development of electrocoagulation process for wastewater treatment: Optimization by response surface methodology. *Heliyon*, 8, e09383. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09383>
- Espinoza, F. R., Romani, M., Borba, C. E., Módenes, A. N., Utzig, C. F., & Dall'Oglio, I. C. (2020). A mathematical approach based on the Nernst-Planck equation for the total electric voltage demanded by the electrocoagulation process: Effects of a time-dependent electrical conductivity. *Chemical Engineering Science*, 220, 115626. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115626>
- Espitia, M. Á. M., Bermúdez, J. D. C., & Valencia, R. N. A. (2022). Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia. *Revista Mutis*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.21789/22561498.1783>
- Gasmi, A., Soumaya, I., Nouredine, E., Mohamed, A. T., Djamel, G., aHMED, H. A. M., Badreddine, A., & Ayadi, I. K. (2022). Comparative Study of Chemical Coagulation and Electrocoagulation for the Treatment of Real Textile Wastewater: Optimization and Operating Cost Estimation. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01652>
- Grossetti, M. D. G. (2012). Revisión integrativa de la investigación en enfermería, el rigor científico que se le exige. *Scielo Brazil*, 33(2). <https://doi.org/10.1590/S1983-14472012000200002>

- Herrera, L., Sigcha, P., & Banchón, C. (2024). Boosting BOD/COD biodegradability of automobile service stations wastewater by electrocoagulation. *Water Science and Technology*, 90(9), 2399-2412. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.357>
- Ibrahim, M. S., Abbas, S. H., & Al-Shami, A. (2023). Taguchi approach for electrocoagulation for treatment of methyl red dye from textile wastewater by using different connection electrodes. *Desalination and Water Treatment*, 297, 240-253. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29614>
- Javed, A., & Ayesha, M. (2023). A critical review of electrocoagulation and other electrochemical methods. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*. <https://www.iscientific.org/wp-content/uploads/2023/05/13-IJCBS-23-23-21.pdf>
- Javonic, T., Velinov N., Petrovic, M., Bojic, D., Radovic, M., & Bojic A. (2021). Pregled mehanizma procesa elektrokoagulacije i njegova primena za prečišćavanje otpadnih voda. <https://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=2406-29792101063J>
- Koyuncu, S., & Arıman, S. (2020). Domestic wastewater treatment by real-scale electrocoagulation process. *Water Science and Technology*, 81(4), 656-667. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.128>
- Liu, Y., Zhang, X., Jiang, W., Wu, M., & Li, Z. (2021). Comprehensive review of floc growth and structure using electrocoagulation: Characterization, measurement, and influencing factors. *Chemical Engineering Journal*, 417, 129310. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129310>
- Limón, H. R. A., Xochihua, L. J., López, I., Hernández, M.O., & Morales, E. M. (2023). Aplicaciones de la electrocoagulación en el tratamiento de agua residual industrial. *Revista multidisciplinaria de ciencia, innovación y desarrollo*. <https://remcid.utgz.edu.mx/Archivos/Vol2/Articulo%202.1-1.pdf>
- López, M., Flores-Hidalgo, M. A., & Reynoso-Cuevas, L. (2021a). Electrocoagulation Process: An Approach to Continuous Processes, Reactors Design, Pharmaceuticals Removal, and Hybrid Systems—A Review. *Processes*, 9(10), 1831. <https://doi.org/10.3390/pr9101831>
- López, G. M., Flores-Hidalgo, M. A., & Reynoso-Cuevas, L. (2021). Electrocoagulation Process: An Approach to Continuous Processes, Reactors Design, Pharmaceuticals Removal, and Hybrid Systems—A Review. *Processes*, 9(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/pr9101831>
- Lu, J., Zhang, P., & Li, J. (2021). Electrocoagulation technology for water purification: An update review on reactor design and some newly concerned pollutants removal. *Journal of Environmental Management*, 296, 113259. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113259>
- Mao, Y., Zhao, Y., & Cotterill, S. (2023). Examining Current and Future Applications of Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water*, 15(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/w15081455>
- Marlina, E., Purwanto, P., & Sudarno, S. (2021). COD removal, decolorization, and energy consumption of electrocoagulation as a wastewater treatment process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 896(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/896/1/012043>
- Mejía, A. P. R., Ruiz, Á. A., & Giraldo, L. F. G. (2006). Electrocoagulation: Challenges and opportunities in water treatment. 1(2). <https://repository.unilasallista.edu.co/server/api/core/bitstreams/d486fa2e-5e9b-4217-82cd-6d0e899ca78f/content>
- Mousazadeh, M., Khademi, N., Kabdaşlı, I., Rezaei, S., Hajalifard, Z., Moosakhani, Z., & Hashim, K. (2023). Domestic greywater treatment using electrocoagulation-electrooxidation process: Optimisation and experimental approaches. *Scientific Reports*, 13(1), 15852. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42831-6>
- Muñoz, E. M. A., Cortés, B. J. D., & Agudelo, R. N. V. Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia. <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1783>
- Ndjomgoue, Y. A. C., & Nanseu, N. E. P. (2022). Effect of pH on Escherichia coli Removal by Electrocoagulation and Elimination Kinetics after Treatment. <https://doi.org/10.1155/2022/5249368>
- Omwene, P. I., Kobya, M., & Can, O. T. (2018). Phosphorus removal from domestic wastewater in electrocoagulation reactor using aluminium and iron plate hybrid anodes. *Ecological Engineering*, 123, 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.025>
- Othmani, A., Kadier, A., Singh, R., Igwegbe, C. A., Bouzid, M., Aquatar, M. O., Khanday, W. A., Bote, M. E., Damiri, F., Gökkuş, Ö., & Sher, F. (2022). A comprehensive review on green perspectives of electrocoagulation integrated with advanced processes for effective pollutants removal from water environment. *Environmental Research*, 215, 114294. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114294>
- Pereira, A. S., Moreira, D., Parreira, F., & Shitsuka, R. (2018). Metodología da pesquisa científica. *Repositorio.ufsm.br*. https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1
- Soberanis, P. M., Martín, A., González, C. A., Prieto, F., Guevara-Lara, A., & García J. E. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(2), Article 2. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S166527382011000200010&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Qadir, M., Jones, E., y Drechsel, P. (2024). Domestic wastewater generation, treatment, and agricultural reuse. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4427017/v1>
- Rabayah, H., Lafi, W., Abushgair, K., & Assbeihat, J. M. (2016). Comparison of Coagulation, Electrocoagulation and Biological Techniques for the Municipal Wastewater Treatment. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11, 11014-11024. https://www.researchgate.net/publication/312328393_Comparison_of_Coagulation_Electrocoagulation_and_Biological_Techniques_for_the_Municipal_Wastewater_Treatment
- Rakhi, M. S. (2021). Wastewater Treatment Using Electrocoagulation. *Asian Journal of Applied Science and Technology*. National Institute of Technology (NIT) Tiruchirappalli - Department of Energy and Environment. <https://ssrn.com/abstract=3846167>
- Rithish, R., & Savithiri, V. (2024) Comparative study of novel iron mesh and solid electrodes for TDS removal from domestic wastewater by electrocoagulation | AIP Conference Proceedings | AIP Publishing. (s. f.). <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3193/1/020173/3319777/Comparative-study-of-novel-iron-mesh-and-solid?redirectedFrom=fulltext>

Run-Feng Chen, R. F., Wu, L. H., Zhong, C. X., & Qiao, C. H. Evaluation of electrocoagulation process for high-strength swine wastewater pretreatment. *Separation and Purification Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118900>

Sushila, S., & Kumar, P. (2024). Pollution Load Reduction from Domestic Wastewater with Electrocoagulation Process for Agricultural Reuse. *Indian Journal Of Science And Technology*, 17(14), 1409-1418. <https://doi.org/10.17485/IJST/v17i14.168>

Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 22, 154-169. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.05.009>

Sridevi, V., Sahithi, K., & Sujatha, V. (2020). Application of Electrocoagulation Technique in Textile Wastewater Treatment: A Review. *International Journal of Advanced Science and Engineering*, 06(04), Article 04. <https://doi.org/10.29294/IJASE.6.4.2020.1533-1537>

Tabash, I., Elnakar, H., & Khan, M. F. (2024). Optimization of iron electrocoagulation parameters for enhanced turbidity and chemical oxygen demand removal from laundry greywater. *Scientific Reports*, 14(1), 16468. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67425-8>

Tariq, A., & Mushtaq, A. (2023). Untreated Wastewater Reasons and Causes: A Review of Most Affected Areas and Cities. *International Journal of Chemical and Biochemical*. <https://www.iscientific.org/wp-content/uploads/2023/05/15-IJCBS-23-23-22.pdf>

Tello, M. V. C., Meneses, P. A., & Ortíz, M. P. (2019). Tratamiento de agua residual procedente de lavadoras por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales – Ate Vitarte. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 22(44), Article 44. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v1i1.17287>

Widyarani, Wulan, D. R., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R. T., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: Generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(22), 32397-32414. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19057-6>