



*Revista Multidisciplinaria
de Ciencia, Innovación y
Desarrollo*

<http://remcid.utgz.edu.mx>



ARTÍCULO DE REVISIÓN

Aplicaciones de la electrocoagulación en el tratamiento de agua residual industrial

Raúl Alejandro Limón-Hernández¹, José Luis Xochihua-Juan^{1*}, Verónica López-Hernández¹, Iriana Hernández-Martínez¹, Oscar Enrique Morales-Moguel¹

¹P.E. Química área industrial. Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

Recepción 23 de mayo de 2023. Aceptación 4 de junio de 2023

PALABRAS CLAVE

Tratamiento, agua residual, electrocoagulación, revisión.

Resumen

El agua es uno de los recursos naturales más utilizados, tanto a nivel doméstico como industrial. Debido a sus propiedades fisicoquímicas, el agua no se encuentra pura de manera natural y posterior a ser utilizada en un proceso, esta generalmente presenta contaminantes que alteran su composición química dando lugar al agua residual (AR). A nivel industrial, el agua residual presenta características como elevados valores acidez o alcalinidad, alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), por lo que si se descarga en cuerpos superficiales de manera directa se impactaría de manera negativa al ambiente. En este sentido, existen diversos procesos de depuración de agua residual entre los que resaltan los tratamientos biológicos, químicos y de oxidación avanzada. La electrocoagulación (EC) es un método electroquímico que consiste en desestabilizar y coagular las partículas en suspensión mediante la formación de coagulantes in situ al pasar una corriente eléctrica por un metal de sacrificio. Una de las ventajas de la EC es que permite realizar una depuración de contaminantes en tiempos cortos de operación (15-60 min) a bajo costo y con una producción de lodos inferior a otros métodos de tratamiento. El objetivo del presente trabajo es realizar una revisión bibliográfica sobre las aplicaciones de la EC en el tratamiento de AR de diferentes fuentes para analizar las principales variables de operación y porcentajes de remoción de contaminantes.

Correspondencia: José Luis Xochihua Juan. Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Campus Gutiérrez Zamora, Carretera Gutiérrez Zamora-Boca de Lima km 2.5 Gutiérrez Zamora, Veracruz, México, Tel.: 7668451952, correo electrónico: jose.xochihua@utgz.edu.mx

KEYWORDS

Treatment, wastewater, electrocoagulation, review.

Abstract

Water is one of the most useful natural resources, both domestically and industrially. Due to its physicochemical properties, water is not naturally pure and after being used in a process, it generally has contaminants that alter its chemical composition, giving rise to waste water (WW). At an industrial production, wastewater presents characteristics such as high acidity or alkalinity values, high Biochemical Oxygen Demand (BOD) and Chemical Oxygen Demand (COD), so if it is discharged directly into bodies of water it would have a negative environmental impact. In this case, there are many wastewater treatment processes, among which biological, chemical and advanced oxidation treatments stand out. Electrocoagulation (EC) is an electrochemical method that consists of destabilizing and coagulating suspended particles by forming coagulates in situ by passing an electric current through a sacrificial metal. One of the advantages of EC is that it allows treatment of contaminants in short operating times (15-60 min) at low cost and with a lower sludge production than other treatment methods. The objective of this paper is to carry out a bibliographical review on the applications of CE in the treatment of WW from different sources to analyze the main operating variables and percentages of contaminant removal.

Introducción

Con la finalidad de prevenir o evitar la contaminación de los cuerpos de agua ocasionada por las descargas industriales, se requiere llevar a cabo investigaciones que permitan desarrollar procesos de depuración eficientes, los cuales sean capaces de eliminar la gran mayoría de los contaminantes presentes. La evaluación de la efectividad de un tratamiento de aguas residuales requiere tener en cuenta múltiples aspectos. Es fundamental considerar el método de depuración utilizado, así como el mecanismo de tratamiento empleado. Además, se deben evaluar los costos operativos asociados al proceso. Otro factor clave es analizar las propiedades fisicoquímicas tanto del agua residual como del agua tratada. Esto permitirá determinar si el agua tratada es apta para su reutilización o si cumple con los parámetros establecidos por la SEMARNAT para su descarga, en cumplimiento de los límites máximos normativos establecidos.

Los tratamientos de aguas residuales se utilizan para reducir la carga de contaminantes a través de procesos físicos, químicos y biológicos. Estos procesos se agrupan en diferentes etapas: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado. Este último se emplea específicamente para eliminar los contaminantes que no fueron removidos en etapas anteriores. En el tratamiento de agua residual con alta carga orgánica, la electrocoagulación ofrece varias ventajas significativas. Entre ellas se incluye un tiempo de depuración más corto, la capacidad de ajustar el pH del agua residual, genera menor cantidad de lodo residual, así como un bajo costo debido a su requerimiento eléctrico y facilidad de operación.

Estas ventajas se destacan en comparación con los tratamientos convencionales, como los biológicos, físicos y químicos. Además, este método electroquímico no requiere

la adición de alguna especie química para remover los contaminantes, puede llevarse a cabo a temperatura y presión ambientales y finalizar la reacción con un simple interruptor de corriente. Requiere una superficie para equipos de trabajo 50-60% menor además que no se requieren obras civiles tan sofisticadas. Los costos de inversión representan un ahorro de hasta el 50%, aunque un punto en contra son los costos de operación de energía requiriendo 0.5-0.8 kWh/m³, lo que representa hasta un 10% de mayor consumo frente a los biológicos (Asha *et al.*, 2016; Rakhmania *et al.*, 2022).

La electrocoagulación es un proceso electroquímico que implica la aplicación de energía eléctrica a través de electrodos metálicos. Durante este proceso, se produce la oxidación del electrodo de sacrificio, lo que resulta en la liberación de iones metálicos. Estos iones se hidrolizan y generan hidróxidos correspondientes al metal utilizado como electrodo. Es importante destacar que este proceso no requiere el uso de coagulantes químicos, ya que la coagulación ocurre debido al suministro de corriente eléctrica. Es por esta razón que la electrocoagulación también se conoce como coagulación asistida electroquímicamente. La coagulación de la carga orgánica presente en el agua residual ocurre debido a los cationes metálicos, el hidroxilo que se genera en la electrólisis del agua y por el hidróxido metálico ya que todas estas especies químicas tienen poder coagulante (Brahmi *et al.*, 2019; Hakizimana *et al.*, 2017; Merma *et al.*, 2020).

De manera general, un reactor o celda de electrocoagulación consta de un recipiente que alberga el agua a tratar, junto con una serie de placas metálicas dispuestas en serie que actúan como electrodos. Estos electrodos están conectados a una fuente de corriente directa que suministra la energía necesaria para el proceso. Una imagen general de un reactor de electrocoagulación se visualiza en la Figura 1.

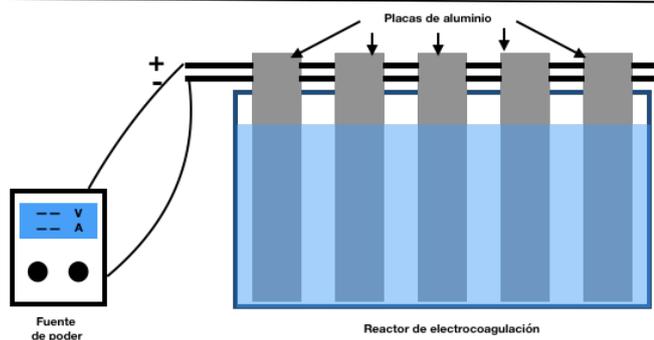


Figura 1. Esquema representativo de un reactor de electrocoagulación por lotes

Los artículos publicados sobre electrocoagulación sugieren ampliamente su implementación en el pretratamiento y tratamiento terciario de agua residual proveniente de diversas fuentes de generación. Estas fuentes incluyen agua residual doméstica, industrial, minera, petroquímica, agroindustrial, así como la remoción de contaminantes emergentes como microplásticos, fármacos y pesticidas. Esto se debe a los altos porcentajes de remoción que se han logrado utilizando este proceso. (Afsharnia *et al.*, 2018; Bharath *et al.*, 2018; Elnenay *et al.*, 2017).

La inducción de corriente eléctrica a los electrodos a través de la fuente de poder produce un diferencial de potencial, ocasionando que el ánodo sufra una oxidación y el cátodo una reducción. Estas reacciones dependen del material de los electrodos, por lo que a continuación en la Figura 2 se aborda el proceso y las reacciones involucradas en el proceso de electrocoagulación de agua residual.

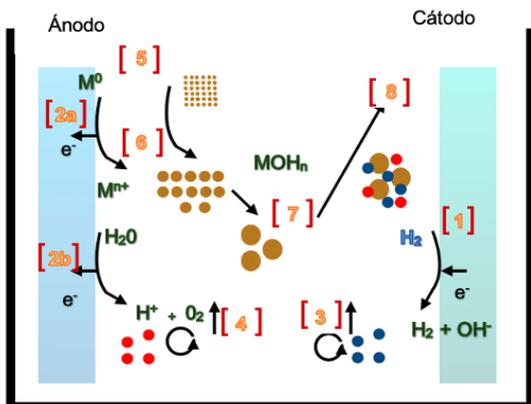
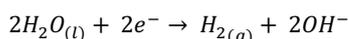
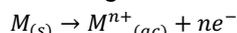


Figura 2. Esquema representativo de un reactor de electrocoagulación por lotes

La Figura 2 representa de forma gráfica el mecanismo de la electrocoagulación, donde cada una de las etapas se representa mediante corchetes. En [1] el cátodo, por causa de la reducción del agua, se obtiene como producto resultante hidrógeno molecular y el grupo hidroxilo, el cual es atraído por el ánodo. Definiendo la siguiente reacción catódica:



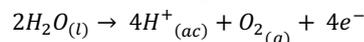
En [2a] se tienen reacciones de oxidación que ocurren en el ánodo y provocan la disolución del metal M que conforma el ánodo, ocurre mediante la siguiente reacción:



La disociación de los iones metálicos (disociación anódica) provoca que los ánodos con el paso del tiempo se desgasten hasta el punto que es necesaria su reposición. Sin embargo en la práctica la cantidad de metal disociado es muy pequeña y para una reposición del ánodo pueden transcurrir varios años.

Una reacción secundaria que ocurre es la electrólisis del agua en la superficie de los electrodos [2b]. En el ánodo se forman iones H^+ y la producción de oxígeno gaseoso (O_2) por oxidación del agua, los cuales posteriormente son atraídos por el cátodo.

Siendo la reacción anódica la siguiente:



En el caso de los gases formados correspondientes a H_2 [3] y O_2 [4], estos se elevan hacia la superficie del líquido por su diferencia de densidad. Posteriormente, los iones metálicos y el hidroxilo se atraen para formar el hidróxido metálico que trabaja como coagulante en el proceso de la forma:



Una vez formado el coagulante comienza el proceso de depuración en donde los sólidos suspendidos [5] comienzan a coagularse gracias a los efectos del hidróxido metálico y comienzan a aumentar su tamaño [6] hasta formar coágulos grandes formados por la materia orgánica y los gases formados por las reacciones de hidrólisis [7]. Finalmente los coágulos más pesados precipitan en el reactor en forma de lodos y los coágulos restantes son arrastrados hacia la superficie por el H_2 y O_2 [8]. En este caso, se debe mencionar que los gases liberados son producidos en pequeñas cantidades, lo cual no representa riesgo debido a la inflamabilidad del H_2 .

A continuación, se realiza una descripción general de 50 trabajos de investigación que en los últimos años se han obtenido con respecto a la aplicación de la electrocoagulación en el tratamiento de diferentes tipos de agua residual clasificándose en 4 categorías: porcentajes de remoción, tipo de agua residual, variables de operación y tipo de reactor.

Porcentajes de remoción

En primer lugar, se encontró que la mayoría de los estudios de electrocoagulación reportados se han llevada a cabo a escala laboratorio, utilizando diferentes tipos de aguas residuales entre las que destaca la de tipo industrial, doméstico y agrícola (Arango, 2014; Fayad, 2018; Riccio, 2015). Con respecto al material de los electrodos se encontró que al emplear únicamente electrodos de Al, es posible obtener una remoción de materia orgánica en un rango desde 82 hasta 100% en términos de turbiedad, 66 a 93% en DBO_5 , 48 a 97% en DQO y del 76 a 100% en SST (Bassala *et al.*, 2017; López & Harnish, 2016; Mayta & Mayta, 2017; Morales, 2018; Naje *et al.*, 2016).

Por otra parte, cuando se utilizan solo electrodos de Fe, los resultados de los estudios de investigación reportaron una remoción desde 93 hasta 100% en turbiedad, un 54% en DBO_5 , 42 a 96% en DQO y del 95% en SST, lo cual representan valores ligeramente superiores a los electrodos Al-Al, sin embargo en la mayoría de los estudios se reporta una oxidación rápida del electrodo de Fe, misma que en ocasiones causa cambio de color en el agua tratada por la presencia de óxidos de hierro disueltos (Apráez & García, 2015; Chezeau *et al.*, 2020; Choque, 2019; Lopes *et al.*, 2015).

En cuanto al uso de electrodos de diferente material, la combinación del Al y Fe ha sido lo más usual encontrada en la literatura, en la que se puede observar que al emplear el Al como material anódico y al Fe como material catódico es posible alcanzar una remoción de la materia orgánica en un rango de 79 a 100% en turbiedad, un 80 a 97% en DBO_5 , 75 a 97% en DQO y del 88 a 99% en SST (Indigoyen, 2019; Poma *et al.*, 2016; Riccio, 2015; Valero, 2014).

Mientras que al utilizar al Fe como material anódico y el Al como material catódico, se logra obtener una remoción en un rango 51 a 95% en DQO, así como una remoción máxima del 95% en color y 100% en metales pesados (Abdel *et al.*, 2015; Akbal & Camci, 2012; Arango, 2012). Se resalta que los rangos reportados en los porcentajes de remoción son amplios y se requeriría un análisis estadístico amplio para determinar si existe diferencia estadística significativa ya que a simple vista parece no existir, por lo que el uso de electrodos en un proceso de electrocoagulación podría definirse debido a la factibilidad que el usuario determine.

Finalmente en el análisis de trabajos que utilizaron otros tipos de electrodo se encontraron reportes de combinaciones Al-grafito, Al-acero inoxidable, Fe-grafito, Cu-Cu y Zn-Zn. los resultados reportados relación a la remoción fueron 73.9 hasta 99.02% en turbiedad, un 51.6% en DBO₅, de 51.86 a 90.8% en DQO y 95.93% en SST (Abdel *et al.*, 2015; Monsalve, 2014; Perozo & Abreu, 2017; Prajapati *et al.*, 2016). Estos resultados de porcentajes de remoción resultan estar por debajo de los trabajos que utilizaron los electrodos de Al y Fe en cualquier combinación, por lo que en términos de carga orgánica no resultaría viable su uso ya que presentan iguales o menores resultados, sin embargo, en caso de que se requiera eliminar algún contaminante emergente no se cierra su uso debido a que el análisis del presente proyecto se basa en un análisis de remoción de carga orgánica.

Tipo de agua residual

Los trabajos analizados muestran diferentes intervalos de remoción de la materia orgánica en diferentes condiciones, sin embargo, es importante conocer la tendencia de los estudios en relación al tipo de agua residual analizada, condiciones de operación y materiales utilizados en electrodos, por lo que a continuación se desglosan los resultados a partir de los trabajos analizados. En cuanto al tipo de agua residual tratada, el 81% de los trabajos encontrados han evaluado el tratamiento en agua residual de tipo industrial, mientras que el 15% se ha abocado al agua de tipo doméstico y el 4% de la literatura correspondió al agua de tipo agrícola.

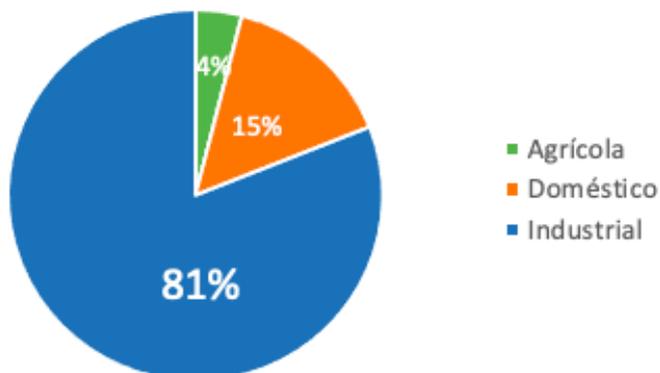


Figura 3. Aplicación de electrocoagulación en diferentes efluentes

Como se puede apreciar, se resalta la aplicación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua residual industrial.

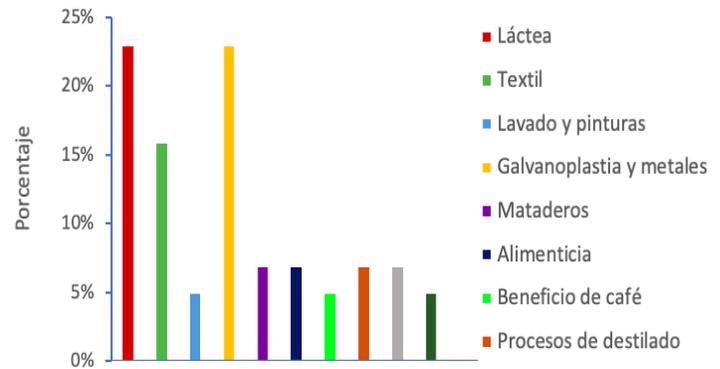


Figura 4. Aplicación de electrocoagulación en diferentes efluentes industriales

En relación al giro de estas empresas reportadas se desarrolló un análisis donde se aprecia que los principales efluentes tratados pertenecen principalmente a empresas del giro lácteo (23%), textil (16%) y galvanoplastia y metales (23%), en el caso de efluentes de beneficio de café se encontró una aplicación del 7%, al no ser un método tan estudiado en esta industria se abre la posibilidad de evaluar la viabilidad del proceso.

Variables de operación

En el caso de las variables de operación en la electrocoagulación más evaluadas, se pueden apreciar que el tiempo es uno de los factores con mayor importancia durante el proceso de electrocoagulación. La mayoría de los estudios consideraron tiempos óptimos entre 10 a 60 minutos. Cabe señalar que a mayor tiempo de tratamiento mayor es la cantidad de agregación de las partículas desestabilizadas (Phalakornkule *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013). No obstante, es importante establecer el tiempo óptimo para el alcanzar el porcentaje máximo de remoción, ya que un aumento en el tiempo del proceso, estadísticamente no suele ser representativo al analizar el porcentaje de remoción (Karami *et al.*, 2018).

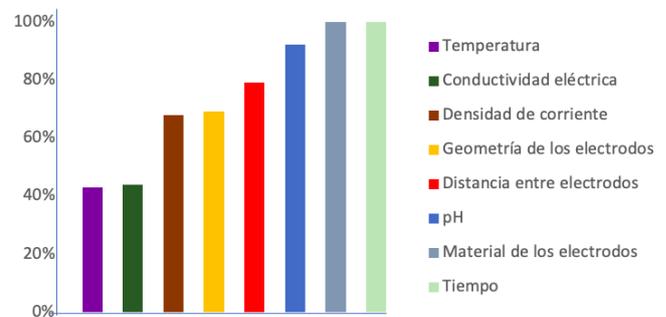


Figura 5. Variables de operación más influyentes en la electrocoagulación

Temperatura

Con respecto al factor temperatura, en el 43% de los trabajos midieron dicha variable de operación. En la mayoría de las investigaciones se indican valores en un rango de 20 a 40 °C como condición óptima de trabajo, siendo la ambiental la de mayor frecuencia. Se sabe que a -60 °C se alcanzan mayores eficiencias de remoción y que posibilita el desprendimiento de películas de óxido sobre el ánodo (Murillo, 2016), sin embargo, los trabajos se inclinaron más al hecho de que el invertir una cantidad extra de energía para elevar la temperatura del agua residual es poco viable desde el aspecto económico, ya que se elevan los gastos de operación.

Conductividad eléctrica y densidad de corriente

Los siguientes factores con mayor incidencia de registros son la densidad de corriente aplicada y la conductividad del agua a tratar. Las investigaciones presentadas indican en su mayoría que los valores de la densidad de corriente aplicada al reactor de electrocoagulación oscilan entre el rango de 0.65 a 300 A/m², puesto que se sabe que al aplicar valores más elevados pueden llegar a producir efectos negativos como el disminuir la eficiencia del proceso (Akbal & Camcidotless, 2011; Hakizimana *et al.*, 2017). Mientras que los valores de la conductividad se llegan a encontrar entre un mínimo de 6.07 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un máximo de 2500000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los efluentes tratados. Los valores anteriores, generalmente están relacionados directamente con el ajuste de pH en el medio obtenido, a partir de la adición de H₂SO₄ o NaOH (electrolito), éste último es añadido cuando se presenta una conductividad baja y se requiere elevar su valor, disminuyendo el potencial de la celda y aprovechando de manera adecuada la energía (Fayad, 2018; Pérez *et al.*, 2011).

Distancia y geometría de los electrodos

Continuando con el análisis de variables, se puede observar que el 79% de los trabajos reportan la distancia entre los electrodos. La mayoría indica una distancia óptima entre 1 o 2 cm e incluso valores cercanos a estos, puesto que a menor distancia entre electrodos mayor es la remoción de contaminantes y a medida que se incrementa el valor de esta variable los porcentajes de remoción pudieran disminuir. Además, se puede llegar a favorecer el aspecto económico por la disminución del consumo de energía a causa de la caída óhmica entre los electrodos (Brahmi *et al.*, 2019; Merma *et al.*, 2020). Otro factor considerado es la geometría de los electrodos utilizados, cabe señalar que la mayoría de los investigadores ha trabajado con electrodos en forma rectangular puesto que se obtiene una mayor área superficial de contacto para reducir la resistencia óhmica entre electrodos y la solución a tratar (Acosta Niño *et al.*, 2013; Laura & Salinas, 2020).

pH

En cuanto al pH, se puede observar que el 92% de las investigaciones lo indicaron como una de sus variables con mayor influencia en el estudio de los procesos de electrocoagulación. En este caso, reportan como condiciones óptimas de operación al considerar valores de pH en un rango de 6 a 8 unidades, debido a que incrementan la eficiencia de remoción de contaminantes (Merma *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2014). Al tratar efluentes ácidos, el pH se incrementa a causa del exceso de iones OH⁻, lo cual coincide con resultados de las investigaciones al reportar un incremento de 1 a 2 unidades. Caso contrario ocurre cuando el agua residual es alcalina, puesto que el valor de pH tiende a disminuir de 1 a 2 unidades después del tratamiento por electrocoagulación (Yildiz *et al.*, 2008).

Material de los electrodos

Por otro lado, el material de los electrodos también es uno de los factores con mayor importancia durante el proceso de electrocoagulación, ya que de estos dependen las especies coagulantes producidas durante el tratamiento y de la capacidad de remoción de contaminantes. Se identificaron 6 tipos de materiales de construcción en los electrodos (Al, Fe, grafito, acero inoxidable, Zn y Cu). De forma general, destacan principalmente los electrodos de Al y Fe con un 50 y 40% de aplicación en los diversos trabajos de investigación.

Lo anterior, frecuentemente es debido a la accesibilidad, bajo costo y mayor avance en el conocimiento sobre las reacciones que acontecen en los mismos (Emerick *et al.*, 2020; Sitterley *et al.*, 2020).

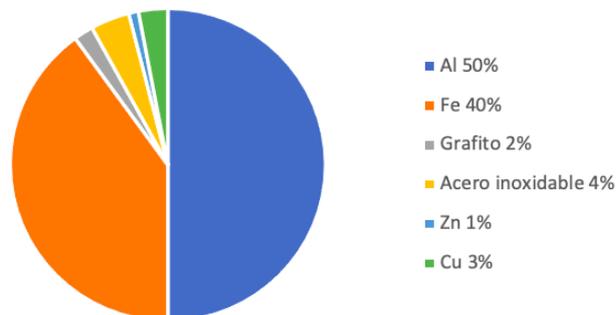


Figura 6. Materiales más utilizados en electrodos

Al analizar por separado a los electrodos mayormente utilizados, se puede visualizar que el 55% de los trabajos se utilizó como ánodo Al, en 40% Fe y solamente un 5% se encuentra distribuido en otros metales. En cuanto al material utilizado como cátodos, de nueva cuenta el primer lugar corresponde al Al que representa el 45%, seguido del Fe con un 40%. Esto concuerda con lo expuesto en la mayoría de las investigaciones, donde se menciona que el Al y Fe son los materiales más empleados como electrodos (Medina & Peralta, 2015; Perozo & Abreu, 2017).

Tipo de reactor

Por último, en relación con los reactores empleados en la mayoría de los estudios los realizaron a escala laboratorio y, por lo tanto, para mayor viabilidad utilizaron reactores de tipo batch. Lo anterior concuerda con lo descrito en el tema, ya que es el modelo más empleado para dar inicio al desarrollo en las investigaciones sobre el proceso de electrocoagulación.

Perspectivas a futuro

Se llevó a cabo una investigación bibliográfica para evaluar la viabilidad de aplicar la electrocoagulación en el tratamiento de agua residual proveniente del beneficio de café, por lo que al existir viabilidad el siguiente paso es formular un diseño experimental que permita optimizar el proceso, ya que la mayoría de los estudios previos se han centrado en diseños factoriales, dejando una brecha en la investigación de los puntos óptimos de operación. El objetivo principal es desarrollar un diseño experimental que proporcione información precisa para lograr una operación eficiente del sistema.

Conclusiones

La electrocoagulación es una técnica altamente eficiente y económica que se puede utilizar en el tratamiento de agua residual industrial. Esta técnica ofrece numerosos beneficios, tales como la remoción eficiente de contaminantes suspendidos, la ruptura de emulsiones, la separación de coloides, así como la eliminación de grasas, aceites y metales pesados. Además de su eficacia, la electrocoagulación presenta varias ventajas adicionales. Entre ellas se encuentran el bajo costo de inversión necesario para su implementación, el reducido espacio requerido para la instalación del equipo, la eliminación de la necesidad de

añadir productos químicos al agua tratada y el menor tiempo de reacción en comparación con otras técnicas de depuración. Otro aspecto favorable de la electrocoagulación es la generación reducida de lodos en comparación con los procesos biológicos convencionales. Además, el equipo necesario para llevar a cabo la electrocoagulación es relativamente sencillo de construir y fácil de operar.

De acuerdo con la revisión realizada, se ha encontrado que existe viabilidad para obtener agua residual tratada que cumpla con las especificaciones establecidas en la NOM-003-ECOL-1997 en cuanto a agua residual tratada. Incluso, esta agua residual tratada podría ser utilizada en la recarga de mantos acuíferos de acuerdo con lo establecido en la NOM-014-CONAGUA-2003. Esta información es muy alentadora, ya que el cumplimiento de estas normativas permite evitar la contaminación ambiental al ofrecer una alternativa efectiva de tratamiento para el agua residual. Además, el hecho de que esta agua tratada pueda ser reutilizada aumenta la disponibilidad de agua para usos secundarios, lo cual es beneficioso desde el punto de vista de la sustentabilidad y conservación del recurso hídrico.

Contribución de los autores

RALH diseño del trabajo y redacción.

JLXJ revisión de antecedentes y redacción

VLH revisión de antecedentes y redacción

IHM diseño del trabajo y redacción

OEMM revisión de antecedentes y redacción

Financiamiento

Ninguno.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

- Abdel, M., Ahmed, A., Amhed, E., & Ahmed, E.-A. (2015). Comparison of Different Electrocoagulation Processes for Real Wastewater Degradation. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(7), 1133-1140. <http://www.ijser.org>
- Acharya, S., Sharma, S. K., Chauhan, G., & Shree, D. (2018). Statistical Optimization of Electrocoagulation Process for Removal of Nitrates Using Response Surface Methodology. *Indian Chemical Engineer*, 60(3), 269-284. <https://doi.org/10.1080/00194506.2017.1365630>
- Acosta Niño, G. E., Coy Barrera, C. A., Bourdón García, A., & Cuervo Lumbaque, E. (2013). La Electrocoagulación como un Tratamiento Eficiente para la Remoción de Metales Pesados Presentes en Aguas Residuales. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 9(2), 306. <https://doi.org/10.18359/RFCB.389>
- Afsharnia, M., Biglari, H., Rasouli, S. S., Karimi, A., & Kianmehr, M. (2018). Sono-electrocoagulation of fresh leachate from municipal solid waste; Simultaneous applying of iron and copper electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(1). <https://doi.org/10.20964/2018.01.22>
- Ahmadian, M., Yousefi, N., van Ginkel, S. W., Zare, M. R., Rahimi, S., & Fatehizadeh, A. (2012). Kinetic study of slaughterhouse wastewater treatment by electrocoagulation using Fe electrodes. *Water Science and Technology*, 66(4), 754-760. <https://doi.org/10.2166/WST.2012.232>
- Akbal, F., & Camci, S. (2012). Treatment of metal plating wastewater by electrocoagulation. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 31(3), 340-350. <https://doi.org/10.1002/ep.10546>
- Akbal, F., & Camci, S. (2011). Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, 269(1-3), 214-222. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001>
- Apráez, S., & García, J. (2015). Análisis de la electrocoagulación como tecnología eficiente para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil [Universidad La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitariahttps://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/33
- Arango, Á. (2014). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: desarrollo y potencial de aplicación. *Engineering and Technology Journal of A. Arango / J. Eng. Technol*, 3(1), 78-98.
- Asha, G., Manoj Kumar, B., & Muntean, E. (2016). 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>
- Assadi, A., Soudavari, A., & Fazli, M. (2016). Comparison of Electrocoagulation and Chemical Coagulation Processes in Removing Reactive red 196 from Aqueous Solution. *J. Hum. Environ. Health Promot*, 1(3), 172-182. <https://doi.org/10.29252/jhehp.1.3.172>
- Aziz, A. R. A., Asaithambi, P., & Daud, W. M. A. B. W. (2016). Combination of electrocoagulation with advanced oxidation processes for the treatment of distillery industrial effluent. *Process Safety and Environmental Protection*, 99, 227-235. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2015.11.010>
- Bassala, H. D., Kenne Dedzo, G., Njine Bememba, C. B., Tchekwagep Seumo, P. M., Donkeng Dazie, J., Nansu-Njiki, C. P., & Ngameni, E. (2017). Investigation of the efficiency of a designed electrocoagulation reactor: Application for dairy effluent treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 111(1), 122-127. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.002>
- Bayar, S., Yildiz, Y. S., Yilmaz, A. E., & Irdemez, S. (2011). The effect of stirring speed and current density on removal efficiency of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation method. *Desalination*, 280(1-3), 103-107. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.06.061>
- Bharath, M., Krishna, B., & Manoj, K. (2018). A Review of Electrocoagulation Process for Wastewater Treatment. *International Journal of ChemTech Research*. <https://doi.org/10.20902/ijctr.2018.110333>
- Brahmi, K., Wided, B., Béchir, H., Elimame, E., Mouna, L., & Zied, T. (2019). Investigation of electrocoagulation reactor design parameters effect on the removal of cadmium from synthetic and phosphate industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 1848-1859. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2014.12.012>
- 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>
- Can, B. Z., Boncukcuoglu, R., Yilmaz, A. E., & Fil, B. A. (2014). Effect of some operational parameters on the Arsenic removal by electrocoagulation using iron electrodes. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-95/FIGURES/15>
- Castro, K., Orozco, L. F., & Taborda, G. (2013). Removal of chemical oxygen demand in coffee mucilage by electrocoagulation. *ECS Transactions*, 47(1), 275-282. <https://doi.org/10.1149/04701.0275ecst>
- 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 (Philadelphia)*, 55(14), 2510-2527. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1638935>
- Choque, M. (2019). Tratamiento de aguas residuales en la industria textil, por el método de electrocoagulación. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*.
- Cruz, A., Ríos, E., Pola, F., Lagunas, S., Meza, R., & Ruíz, V. M. (2018). Evaluation of hydraulic retention time on treatment of coffee processing wastewater (CPWW) in EGSB bioreactor.

- Sustainability (Switzerland), 10(1). <https://doi.org/10.3390/su10010083>
23. Dobrosz, I., Gómez, M., & Ibarra, H. (2020). Tratamiento de aguas residuales de la industria del café soluble vía electrocoagulación-oxidaciónanódica. *EIA*, 17(34), 1-17. <https://doi.org/10.1002/CEAT.201000091>
 24. Elazzouzi, M., el Kasmi, A., Haboubi, K., & Elyoubi, M. S. (2018). A novel electrocoagulation process using insulated edges of Al electrodes for enhancement of urban wastewater treatment: Techno-economic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 506-515. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.006>
 25. Elnenay, A. E. M. H., Nassef, E., Malash, G. F., & Magid, M. H. A. (2017). Treatment of drilling fluids wastewater by electrocoagulation. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1). <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.03.005>
 26. Emerick, T., Vieira, J., Silveira, H., & Juarez, J. (2020). Ultrasound-assisted electrocoagulation process applied to the treatment and reuse of swine slaughterhouse wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 1-9.
 27. Fayad, N. (2018). The application of electrocoagulation process for wastewater treatment and for the separation and purification of biological media. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01719756>
 28. García, M. A., Contreras, A., Aguilera, Ma. G., Ruiz, E. A., & Morales, M. R. (2021). MANEJO DE RESIDUOS DE FÁRMACOS: UNA BREVE REVISIÓN. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. <https://doi.org/10.20937/rica.53505>
 29. Genanaw, W., Kanno, G. G., Derese, D., & Aregu, M. B. (2021). Effect of Wastewater Discharge From Coffee Processing Plant on River Water Quality, Sidama Region, South Ethiopia. *Environmental Health Insights*, 15. <https://doi.org/10.1177/11786302211061047>
 30. Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., & Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2016.10.011>
 31. Hossini, H., & Rezaee, A. (2014). Optimization of Nitrate Reduction by Electrocoagulation Using Response Surface Methodology. *Health Scope*, 3(3), 17795. <https://doi.org/10.17795/jhealthscope-17795>
 32. Hussin, F., Abnisa, F., Issabayeva, G., & Aroua, M. K. (2017). Removal of lead by solar-photovoltaic electrocoagulation using novel perforated zinc electrode. *Journal of Cleaner Production*, 147, 206-216. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.01.096>
 33. Ibarra, H. N., Dobrosz, I., & Gómez, M. Á. (2018). Multi-objective optimization of the Fenton process for the treatment of soluble coffee wastewater. *Informacion Tecnológica*, 29(5), 111-122. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000500111>
 34. Indigoyen, D. (2019). Remoción de materia orgánica de aguas residuales de la industria láctea por el método de electrocoagulación, utilizando energía eólica. Universidad Nacional del centro del Perú.
 35. Iskandar, A. (2020, April). Design of small-scale electrocoagulation reactor for non-sugar removal of sugarcane juice. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 472, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
 36. Jain, K., Patel, A. S., Pardhi, V. P., & Flora, S. J. S. (2021). Nanotechnology in wastewater management: A new paradigm towards wastewater treatment. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/molecules26061797>
 37. Jasim, N. A. (2020). The design for wastewater treatment plant (WWTP) with GPS X modelling. *Cogent Engineering*, 7(1), 1-33. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1723782>
 38. Karami, T., Elyasi, S., & Amani, T. (2018). Modeling and optimizing of electrocoagulation process in treating phenolic wastewater by response surface methodology: precise evaluation of significant variables. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(11), 2389-2398. <https://doi.org/10.1007/S13762-017-1539-0>
 39. Kobya, M., Ozyonar, F., Demirbas, E., Sik, E., Oncel, M.S., 2015. Arsenic removal from groundwater of Sivas-S, arkis, la Plain, Turkey by electrocoagulation process: comparing with iron plate and ball electrodes. *J. Environ. Chem. Eng.* 3 (2), 1096e1106.
 40. Laura, S., & Salinas, J. (2020). Eficiencia en la remoción del contenido de cromo III por electrocoagulación en las aguas residuales de curtiembre del parque industrial de Río Seco. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
 - Limón, R. A. (2018). Electrocoagulación como tratamiento de aguas de descarga al río Tecolutla en la zona de Gutiérrez Zamora, Veracruz. Universidad Veracruzana.
 42. Liu, Y. J., Huang, Y. L., Lo, S. L., & Hu, C. Y. (2020). Comparing the effects of types of electrode on the removal of multiple pharmaceuticals from water by electrochemical methods. *Water*, 12(9), 2-10. <https://doi.org/10.3390/W12092332>
 43. Lopes, H., Simionato, J., de Souza, T., Garcia, J., de Carvalho, O., & Correr, C. (2015). Efficiency and operating cost of electrocoagulation system applied to the treatment of dairy industry wastewater. *Acta Scientiarum - Technology*, 37(3), 401-408. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i3.26452>
 44. López, P., & Harnisth, A. (2016). Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Enfoque UTE*, 7(1), 13-21. <https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.V7N1.84>
 45. Mayta, R., & Mayta, J. (2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *Rev Soc Quím Perú*, 83(3), 331-340.
 46. Medina, J., & Peralta, M. (2015). Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria. Universidad Politécnica Salesiana.
 47. 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>
 48. Mohora, E., Rončević, S., Agbaba, J., Tubić, A., Mitić, M., Klačnja, M., & Dalmacija, B. (2014). Removal of arsenic from groundwater rich in natural organic matter (NOM) by continuous electrocoagulation/flocculation (ECF). *Separation and Purification Technology*, 136, 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.006>
 49. Monsalve, J. (2014). Electrocoagulación para reuso de aguas residuales del proceso de impresión en la industria papelera. Universidad Pontificia Bolivariana.
 50. Morales, E., Oliva, S. M., Rascón, J., Milla, M. E., Villegas, D. A., & Chavez, S. G. (2020). Sistemas de tratamiento de aguas mieles de café en la Provincia de Rodríguez de Mendoza, Perú. *REVISTA COLOMBIANA DE INVESTIGACIONES AGROINDUSTRIALES*, 7(1), 84-90. <https://doi.org/10.23850/24220582.2918>
 51. Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M., & Al-Marri, M. J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of environmental management*, 186, 24-41.
 52. Murillo, A. (2016). Propuesta de tratamiento para el agua residual industrial generada por procesos de cromado mediante electrocoagulación. Fundación Universidad de América .
 53. Najé, A. S., Chelliapan, S., Zakaria, Z., Ajeel, M. A., & Alaba, P. A. (2016). A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(1), 1-30. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0019>
 54. Novita, E., Pradana, H. A., Wahyuningsih, S., Marhaenanto, B., Sujarwo, M. W., & Hafids, M. S. (2019). Anaerobic digester variation for biogas production on coffee wastewater treatment. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 8(3), 164-174. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v8i3.164-174>
 55. Ouaisa, Y. A., Chabani, M., Amrane, A., & Bensmaili, A. (2014). Removal of tetracycline by electrocoagulation: Kinetic and isotherm modeling through adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.12.009>
 56. Peng, B., Yao, Z., Wang, X., Crombeen, M., Sweeney, D. G., & Tam, K. C. (2020). Cellulose-based materials in wastewater treatment of petroleum industry. *Green Energy and Environment*, 5(1), 37-49. <https://doi.org/10.1016/J.GEE.2019.09.003>
 57. Pérez, S., Morales, J. B., Félix, R. M., & Hernández, O. M. (2011). Evaluation of the electro-coagulation process for the removal of turbidity of river water, wastewater and pond water. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(1), 79-91. www.amidiq.com
 58. Perozo, J., & Abreu, R. (2017). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable. *Química Viva*, 16(1), 56-69.

59. Phalakornkule, C., Karakat, B., Nuyut, T., & Ruttithiwapanich, T. (2010). Investigation of Electrochemical Variables and Performance of a Continuous Upflow Electrocoagulation Process in the Treatment of Reactive Blue 140. *Water Environment Research*, 82(12), 2325-2332. <https://doi.org/10.2175/106143010x12681059116815>
60. Phan, H. Q. H., Hoan, N. X., Nguyen, N. H., Duc, N. D. D., Anh, N. T. N., Que, N. T., & Thuy, N. T. (2019). Pre-treatment potential of electro-coagulation process using aluminum and titanium electrodes for instant coffee processing wastewater. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, 3(3). <https://doi.org/10.22515/sustinere.jes.v3i3.87>
61. Poma, J., Rosaly, J., Sanca, Q., & Astrid, P. (2016). Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación.
62. Prajapati, A. K., Chaudhari, P. K., Pal, D., Chandrakar, A., & Choudhary, R. (2016). Electrocoagulation treatment of rice grain based distillery effluent using copper electrode. *Journal of Water Process Engineering*, 11, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.03.008>
63. Rakhmania, Kamyab, H., Yuzir, M. A., Abdullah, N., Quan, L. M., Riyadi, F. A., & Marzouki, R. (2022). Recent Applications of the Electrocoagulation Process on Agro-Based Industrial Wastewater: A Review. *Sustainability (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/SU14041985>
64. Riccio, Y. (2015). Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector agua de las vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico.
65. SEMARNAT. (2009). NOM-014-CONAGUA-2003. Diario Oficial de La Federación.
66. EMARNAT. (1998). NOM-003-SEMARNAT-1997. Diario Oficial de La Federación.
67. Shankar, R., Singh, L., Mondal, P., & Chand, S. (2013). Removal of Lignin from Wastewater through Electro-Coagulation. *World Journal of Environmental Engineering*, 1(2), 16-20. <https://doi.org/10.12691/wjee-1-2-1>
68. Sitterley, K. A., Rosenblum, J., Ruyle, B., Keliher, R., & Linden, K. G. (2020). Factors impacting electrocoagulation treatment of hydraulic fracturing fluids and removal of common fluid additives and scaling ions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103728>
69. Song, P., Yang, Z., Xu, H., Huang, J., Yang, X., & Wang, L. (2014). Investigation of Influencing Factors and Mechanism of Antimony and Arsenic Removal by Electrocoagulation Using Fe-Al Electrodes. *I&EC Research*, 53(1), 12911-12919. <https://doi.org/10.1021/ie501727a>
70. Un, U., & Ozel, E. (2013). Electrocoagulation of yogurt industry wastewater and the production of ceramic pigments from the sludge. *Separation and Purification Technology*, 120, 386-391. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2013.09.031>
71. Valero, D. (2014). Tratamiento de las aguas residuales de la industria de la almendra mediante técnicas electroquímicas: Estudio de la alimentación de los sistemas mediante energía solar fotovoltaica. Universidad de Alicante.
72. Yildiz, Y. Ş., Koparal, A. S., & Keskinler, B. (2008). Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*, 138(1-3), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.05.029>
73. Zhang, S., Zhang, J., Wang, W., Li, F., & Cheng, X. (2013). Removal of phosphate from landscape water using an electrocoagulation process powered directly by photovoltaic solar modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 117(1), 73-80. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2013.05.027>