

Electrocoagulation for Microplastic Removal: Quantification, Electrode Consumption, and Sludge Production

Lorgio Valdiviezo-Gonzales¹; Lucerito Ortiz Garcia²; Ignacio Nieves Diaz³

Gabriel De-la-Torre⁴; Fernando García Avila⁵

¹⁻³ Universidad Tecnológica del Perú, UTP, Perú,

⁴Grupo de Investigación de Biodiversidad, Medio Ambiente y Sociedad, Universidad San Ignacio de Loyola, Lima, Peru

⁵Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Ecuador

lvaldiviez@utp.edu.pe, C25072@utp.edu.pe, C22312@utp.edu.pe,
e25150@utp.edu.pe, c17348@utp.edu.pe

Abstract– *The presence of microplastics (MPs) in liquid effluents has drawn increasing scientific concern owing to their ecological impacts and the limited efficacy of conventional treatment technologies. Electrocoagulation (EC) has emerged as a promising alternative for MPs removal; however, few studies have addressed three practical aspects critical to scale-up: MPs quantification, electrode consumption, and sludge generation. This study evaluates (i) the effectiveness of a mass-versus-turbidity approach for MPs quantification, (ii) iron (Fe) electrode wear, and (iii) the concentration of EC-generated sludge. A synthetic effluent containing graded doses of polyester was treated in a previously optimized EC system using a 15-run experimental design with replication. The turbidity-based calibration showed an excellent linear relationship with MPs mass ($R^2 = 0.997$), supporting turbidity as a reliable surrogate for MPs concentration. Under optimal operating conditions, Fe electrode consumption was 0.122 kg m^{-3} , and sludge production was 3.1 kg m^{-3} . These results provide actionable metrics for process design and cost estimation. Future work should include comprehensive physicochemical and toxicological characterization of the generated sludge to inform valorization and potential reuse pathways.*

Keywords– *microplastics; electrocoagulation; turbidity-based quantification; electrode consumption; sludge generation; polyester.*

Remoción de Microplásticos por electrocoagulación: Cuantificación, Consumo de Electroodos y Generación de Lodos

Lorgio Valdiviezo-Gonzales¹; Lucerito Ortiz Garcia²; Ignacio Nieves Diaz³;
Gabriel De-la-Torre⁴; Fernando García Avila⁵

¹⁻³ Universidad Tecnológica del Perú, UTP, Perú,

⁴Grupo de Investigación de Biodiversidad, Medio Ambiente y Sociedad, Universidad San Ignacio de Loyola, Lima, Peru

⁵Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Ecuador

lvaldiviez@utp.edu.pe, C25072@utp.edu.pe, C22312@utp.edu.pe,

e25150@utp.edu.pe, c17348@utp.edu.pe

Resumen– La presencia de microplásticos (MPs) en efluentes líquidos ha llamado la atención de la comunidad científica, debido a sus impactos en los ecosistemas y las bajas eficiencias de las técnicas convencionales. La electrocoagulación (EC) se ha mostrado como una técnica capaz de remover microplásticos, así como otros contaminantes en el agua, sin embargo, a la actualidad no se ha abordado estudios sobre la cuantificación de MPs, consumo de electrodos y generación de lodos en la EC. El objetivo del presente estudio es evaluar la efectividad de la metodología masa vs turbidez en la cuantificación de microplástico, determinar el desgaste de electrodos de Fe y determinar la concentración de lodos generados durante el proceso. Para este propósito se preparó un efluente sintético, conteniendo cantidades variables de poliéster, así como el diseño experimental de un sistema previamente optimizado de EC (15 experimentos con sus respectivas repeticiones). Previamente se evaluó la metodología de cuantificación de MPs. El alto coeficiente de relación ($R^2=0.997$) indica que es posible determinar la concentración de microplásticos mediante la turbidez. Asimismo, bajo las mejores condiciones de operación el desgaste del electrodo experimental fue determinado en 0.122 Kg/m³. Mientras que el lodo generado se determinó en 3.1 Kg/m³. Se esperan futuros estudios que aborden la caracterización completa de los lodos generados, su valorización y posible reúso.

Palabras clave-- microplásticos; electrocoagulación; cuantificación por turbidez; consumo de electrodos; generación de lodos; poliéster.

I. INTRODUCCIÓN

La electrocoagulación es una de las técnicas electroquímicas de gran potencial de aplicación en el tratamiento de aguas, por su sencillez operativa, bajo costo, bajo impacto ambiental y capacidad de remover una diversidad de contaminantes. Entre los contaminantes removidos por esta técnica se encuentran los metales pesados [1], [2], [3]; compuestos orgánicos como aceites [4], pesticidas [5], patógenos [6], así como contaminantes emergentes como PFAS y microplásticos [7].

Los microplásticos, definidos como partículas de plástico entre 1 μm – 5 mm, han llamado la atención en los últimos años, principalmente por sus efectos en los organismos acuáticos y en las personas [8]. Los efectos en los organismos acuáticos incluyen reducción de alimentación y retardos en el crecimiento [9], [10]. Asimismo, los microplásticos pueden actuar como transporte de otros contaminantes como pesticidas, metales pesados y fármacos, lo que incrementa su toxicidad [11].

Diversas técnicas convencionales se han evaluado para la remoción de microplásticos en agua [12], tales como la adsorción [13], coagulación [14], filtración [15], entre otras.

Sin embargo, la comparación se torna difícil debido a las distintas metodologías de cuantificación de microplásticos [16]. Estas metodologías incluyen la observación directa, peso seco, turbidez o técnicas más sofisticadas como la citometría de flujo [17]. Cada una de estas metodologías presenta ventajas y desventajas poco abordadas en la literatura.

La electrocoagulación se presenta como una alternativa eficiente en la remoción de microplásticos y otros contaminantes presentes en matrices acuáticas. Los parámetros más influyentes reportados son la densidad de corriente, el material de electrodo, las características y la concentración de microplásticos [18]; sin embargo, mucha de la literatura se concentra en la evaluación de parámetros de mayor influencia en la remoción y evaluación del impacto de las características fisicoquímicas del MPs y su impacto en la remoción y muy poca aborda la estimación de costos, consumo de electrodos, así como la generación y manejo de lodos de la electrocoagulación.

En conjunto, estos tres elementos: la cuantificación reproducible, el consumo real de electrodo y generación de lodos constituyen métricas de diseño indispensables para comparar estudios bajo condiciones operacionales distintas y para realizar un dimensionamiento preliminar del proceso; en

particular, al normalizar los resultados por volumen tratado y por carga aplicada, se fortalece la transferibilidad de los hallazgos hacia escenarios de tratamiento en planta y se aporta evidencia útil para decisiones de operación y gestión de residuos en sistemas basados en electrocoagulación.

Por lo expuesto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la efectividad de las metodologías de masa seca y turbidez en la cuantificación de microplásticos, determinar el desgaste de electrodos de Fe y estimar la concentración de lodos generados durante el proceso de electrocoagulación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Tipo de estudio, alcance y justificación experimental

El estudio fue experimental, cuantitativo y de escala de laboratorio; se utilizó un efluente sintético con el propósito de controlar la composición de la matriz acuosa, aislar el efecto de la concentración de microplásticos de poliéster y reducir interferencias asociadas a materia orgánica, sólidos suspendidos, sales complejas u otros contaminantes. Esto permite evaluar con mayor precisión la relación masa seca – turbidez el consumo de electrodos y la generación de lodos bajo condiciones de control.

El uso de efluente sintético constituye al mismo tiempo una limitación de estudio; por ello la extrapolación de los resultados a efluentes reales debe realizar con cuidado; en matrices reales la presencia de sólidos suspendidos, coloides, materia orgánica natural, variación de pH, alcalinidad, dureza y otros contaminantes pueden modificar la señal de la turbidez, la eficiencia de la coagulación, el consumo de electrodos y la cantidad de lodo generado. Es por ello que los resultados deben considerarse como una aproximación preliminar para el diseño y no como evidencia definitiva del desempeño en planta.

B. Preparación de efluente, montaje experimental y parámetros de operación

El presente estudio recoge información de un sistema optimizado de electrocoagulación en la remoción de microplásticos. Para ello se utilizó 200 ml de un efluente sintético conteniendo 10 mg/L de sulfonato de sodio, pH 7, y cantidades variables de poliéster (PS: 51-150 μ m), cloruro de sodio (250-500 mg/L), voltaje 8 y tiempo de operación variable (15-20 minutos, ver Tabla I).

TABLA I
 CONDICIONES EXPERIMENTALES REALIZADOS PARA DETERMINAR
 CONSUMO DE ELECTRODO

Exp.	MPs (mg/l)	NaCl (mg/l)	Tiempo (min)	Amperaje	Remoción (%)
1	150	250	15	0.18	99.07

2	100	375	20	0.17	97.90
3	150	500	15	0.15	99.07
4	150	500	20	0.28	99.00
5	200	250	17.5	0.08	99.35
6	200	500	17.5	0.11	98.25
7	150	250	20	0.15	98.20
8	100	375	15	0.22	98.70
9	150	375	17.5	0.25	98.07
10	150	375	17.5	0.17	98.00
11	100	250	17.5	0.19	99.20
12	150	375	17.5	0.26	98.87
13	200	375	20	0.18	99.10
14	200	375	15	0.2	99.05
15	100	500	17.5	0.18	99.70

El sistema de electrocoagulación incluye 2 electrodos de Hierro con una distancia de separación entre electrodos de 1 cm y un área efectiva de 9.7 cm², una fuente de corriente continua y un agitador magnético.

En la Fig. 1, se muestra el montaje experimental por lotes (200 ml), conformado por una fuente de poder operada a voltaje constante, una celda con electrodos de Fe montados sobre un soporte para asegurar la separación y área activa reproducibles, y una placa de agitación magnética para mantener la suspensión homogénea de microplásticos durante el tiempo de tratamiento (controlado con cronómetro)

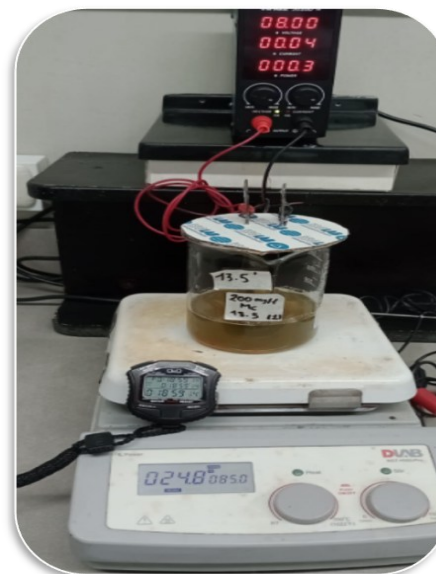


Fig. 1 Esquema experimental de electrocoagulación para la remoción de microplástico

C. Cuantificación de Concentración de microplásticos en la muestra

La cuantificación de microplásticos en la muestra se realizó mediante la medición indirecta de la turbidez. Para esto, se construyó una curva de calibración masa seca vs turbidez (colorímetro DR-890, Hatch), a fin de poder determinar la predictividad del método. Cada medición de la turbidez y masa seca se realizó por triplicado.

D. Consumo de electrodos y determinados de lodos

El consumo de electrodos se determinó pesando los electrodos antes y después de cada experimento. Mientras que el consumo teórico se realizó mediante la segunda ley de Faraday.

$$\text{Consumo de electrodos} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{i \times t \times M}{z \times F \times v} \quad (1)$$

Donde i es el amperaje, t es el tiempo de operación (s), M es la masa molar del Hierro (55.98 g mol^{-1}), z el número de electrones transferidos ($z=2$), F la constante de Faraday ($96,487 \text{ C mol}^{-1}$); y v el volumen de la solución (m^3).

Para la determinación de lodos, se consideraron las condiciones de operación que permitieron alcanzar las más altas remociones: 200 mg/L de microplástico de poliéster (MPs-PS), 250 mg/L de Cloruro de sodio, 17.5 minutos de tiempo de operación, 8 volt. Estas condiciones permiten alcanzar remociones de microplástico de hasta 99.35 % (experimento 5).

Para la cuantificación del lodo generado, el efluente tratado se dejó sedimentar por 1h, el lodo fue cuidadosamente separado y secado a 105°C por 24 h, luego fue pesado. Este procedimiento fue realizado por triplicado y el resultado se reportó en Kg/m^3 (Fig. 2b).

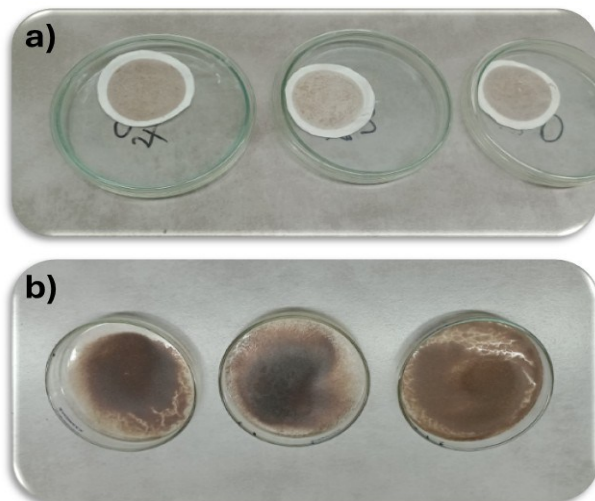


Fig. 2 Filtrado y determinación de masa de MPs (a) y de lodos (b)

D. Tratamiento estadístico

Los datos replicados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. En las curvas de calibración se evaluó el ajuste lineal mediante el coeficiente de determinación (R^2).

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Cuantificación de microplásticos en solución, curva de calibración masa seca vs turbidez/Absorbancia

La cuantificación de microplásticos en solución puede incluir la observación directa bajo microscopio-estereoscopia, mediante la metodología de la masa seca (antes y después del tratamiento) o de forma indirecta, mediante la turbidez, inclusive se reporta métodos más sofisticados que incluyen FTIR, fluorescencia, cromatografía entre otros, cada uno de ellos con ventajas y desventajas, poco abordadas en la literatura.

En la Fig. 3 se muestra la relación entre la masa seca de microplásticos (mg/L) y la turbidez (NTU), mostrándose un comportamiento lineal en el rango evaluado, con un ajuste elevado ($R^2=0.9966$); la ecuación de la recta ($y = 0.1715x + 0.1756$) indica que, a medida que incrementa la masa de MPs en suspensión, aumenta proporcionalmente la turbidez debido a la mayor dispersión de la luz por las partículas.

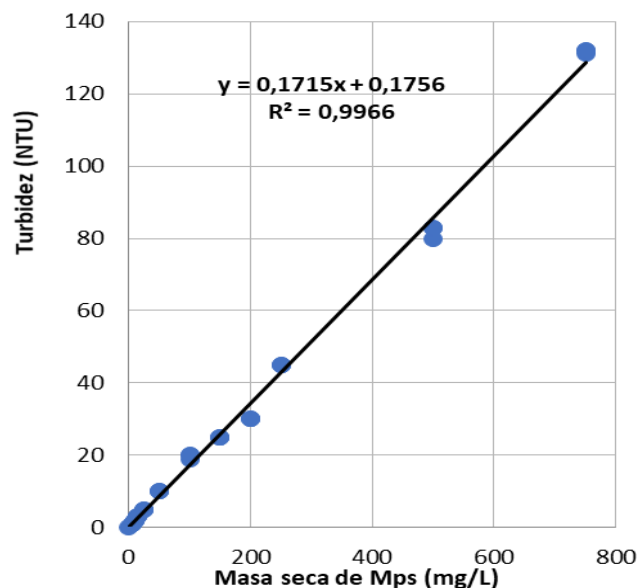


Fig. 3 Curva de calibración Masa Seca vs Turbidez

Mientras que en la Fig. 4 se presenta la curva de calibración entre la concentración de MPs (mg/L) y la absorbancia, también con un ajuste lineal consistente ($R^2 = 0.9958$), lo que confirma que la señal óptica se incrementa con la carga de partículas en el medio.

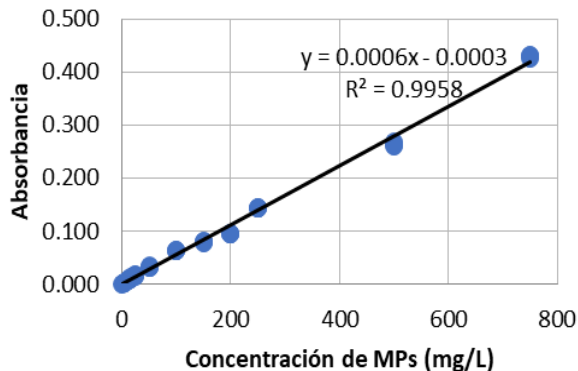


Fig. 4 Curva de calibración Masa Seca vs Absorbancia

Los resultados presentan un comportamiento lineal entre ambos parámetros. El coeficiente obtenido en ambas curvas ($R^2 = 0.9966$ y 0.9958), indica que es posible la predicción de masa seca de MPs (mg/L), en función de la turbidez y absorbancia. Esto permite reducir en gran medida los tiempos en la determinación de la remoción.

La determinación de MPs mediante la metodología del peso seco/masa seca, es usado para caracterizar MPs en lodos, sin embargo, puede ser poco eficiente cuando la muestra tiene otros sólidos ya que no distingue estos de los MPs [19], es decir que la cuantificación de MPs mediante la turbidez no permite una cuantificación precisa en la presencia de otros sólidos en la muestra.

Metodologías de identificación y cuantificación más sofisticadas y costosas como el μ -FTIR, se presentan como más precisos y confiables [19], pero requieren un riguroso pretratamiento [20], incrementando notablemente los costos y tiempo empleado.

Por lo tanto, cada metodología presenta limitaciones en cuanto a precisión, tiempo y costos. La metodología de peso/masa seca vs Turbidez se caracteriza por su rapidez y relativa simplicidad, sin embargo, su precisión depende de la complejidad de la muestra (presencia de otros sólidos). Esta metodología se presenta ideal para efluentes sintéticos, o efluentes reales cuyo único contaminante sólido son los MPs.

B. Consumo de electrodos

La Tabla I presenta las condiciones experimentales bajo las cuales se calculó el consumo teórico (Ecuación 1) y experimental del ánodo. El volumen de la muestra fue de 200 ml y 8 V (voltaje constante). Mientras que en la Fig. 5 se presentan los consumos teóricos y experimentales encontrados. Los consumos experimentales alcanzan un valor hasta 13.7% en promedio superiores a los valores teóricos. Asimismo, se observa el mayor consumo de electrodo cuando el amperaje alcanza su mayor valor (experimento 4, 0.28 A), demostrando la relación entre Amperaje y consumo de electrodo [21].

Aljaberi [22] reportó diferencias entre el valor experimental y teórico del electrodo, indicando que se debe a la presencia de burbujas y capa de óxido sobre la superficie del electrodo. Adicionalmente, estas diferencias se pueden atribuir a las reacciones secundarias y desgaste físico de los electrodos.

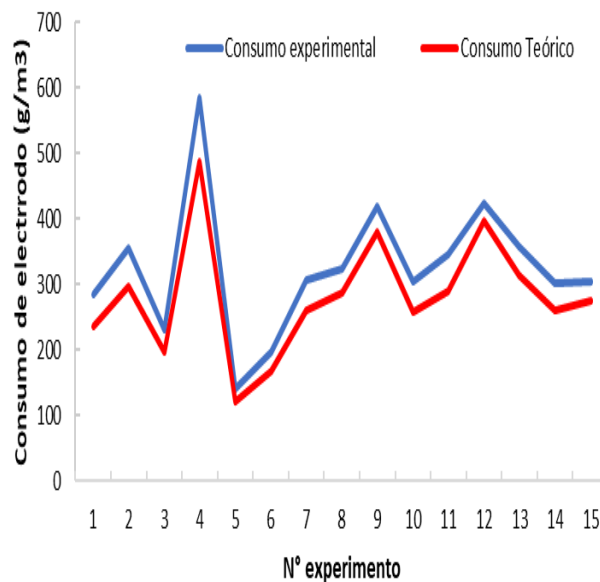


Fig. 5 Consumo de electrodo en la electrocoagulación de microplásticos en efluente sintético

En las condiciones de mayor remoción (experimento 5) el consumo teórico y experimental alcanzado fue de 121.8 g/m³ y 142 g/m³. Estos valores son inferiores a los 310 g/m³ reportado previamente, en la electrocoagulación de efluentes de curtumbre, usando ánodos de Hierro [23]. El monitoreo del consumo de electrodos es relevante en la estimación de costos de producción, mantenimiento de electrodos, así como la generación y manejo de lodos. Por lo tanto, es necesario la optimización de los sistemas de electrocoagulación en cuanto a pH, material de electrodo, distancia entre electrodos, configuración, densidad de corriente entre otros parámetros que permitan obtener los mejores resultados de remoción y evitar desperdicios de material y energía.

C. Generación de lodos de electrocoagulación

En la electrocoagulación, así como en muchas otras técnicas de tratamiento de agua la generación de lodos es inevitable. En el caso de la EC, estos lodos contienen hidróxidos metálicos junto con los contaminantes removidos.

La generación de lodos depende del tipo de efluente, y parámetros operacionales como densidad de corriente, tiempo de operación y área del electrodo [24]. A la actualidad no se ha reportado datos de generación de lodos de electrocoagulación en la remoción de microplásticos.

En la Tabla II se presenta la cuantificación de lodos realizada por triplicado, considerando las mejores condiciones de operación (experimento 5).

Tabla II
LODOS GENERADOS EN LA ELECTROCOAGULACIÓN

Muestra	Gramos de lodo/200 ml de agua tratada	Lodo generado (kg/m ³)
1	0.616	3.08
2	0.598	2.99
3	0.643	3.21
Promedio		3.1
DS		0.11

Wi corresponde a la masa inicial del sistema de recolección (recipiente/filtro seco), y Wf a la masa final tras el secado del lodo a 105 °C hasta masa constante; la diferencia (Wf–Wi) se normalizó por el volumen tratado para expresar la producción de lodo en kg/m³.

El valor promedio de lodos generados es de 3.1 kg/m³ de agua tratada. Valores de 1.5-1.8 kg/m³ de lodos se ha reportado en la electrocoagulación de aguas urbanas usando electrodos de aluminio [25], asimismo valores de 3.3 kg/m³ para el tratamiento de aguas de minería, también por electrocoagulación [24].

Los Lodos de la electrocoagulación son descritos como fácilmente sedimentables, deshidratables y de menor cantidad comparados con los lodos de la coagulación química convencional [26]. Sin embargo, es necesario mayores estudios e indicadores que permitan la caracterización de la composición y deshidratación tales como la velocidad de sedimentación, índice de volumen de lodo (SVI).

Por otro lado, se han reportado diversos estudios de valorización de lodos de electrocoagulación, por ejemplo, como fertilizantes [27], pigmentos cerámicos [28], material de

construcción [26]. Por ello, se espera futuros estudios relacionados a la valoración de lodos de electrocoagulación de efluentes con microplásticos.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio constituye una de las primeras aproximaciones respecto a la cuantificación indirecta de MPs en muestras de agua, estimación del desgaste de electrodos, y generación de lodos en el proceso de electrocoagulación de efluentes conteniendo microplásticos.

El método de masa seca vs la turbidez se presenta como una alternativa simple y rápida en la cuantificación de microplásticos en solución, sin embargo, se debe indicar que la principal limitación es que este método sólo es aplicado en efluentes sintéticos o reales donde el contaminante sólido es únicamente el microplástico. En muestras que contienen otros sólidos es necesario un tratamiento previo (purificación) o el empleo de otras técnicas de mayor precisión.

El consumo experimental del electrodo (0.142 Kg/m³) es superior al consumo teórico (0.122 Kg/m³) calculado mediante la ley de Faraday. Esto se explica por las reacciones secundarias y el desgaste físico y químico del electrodo, el cual no es considerado en la ecuación de Faraday. El control del desgaste de los electrodos es fundamental en la optimización del proceso, gestión de lodos y pronóstico del mantenimiento de estos.

Los lodos generados, considerando las mejores condiciones de remoción de microplástico, fue de 3.1 Kg/m³. Este valor es relativamente bajo comparado con estudios previos en otros tipos de efluentes. Sin embargo, son necesario estudios complementarios de composición química, velocidad de sedimentación a fin de predecir una adecuada gestión de lodos.

Se espera futuros estudios de gestión y valorización de lodos de electrocoagulación de efluentes conteniendo microplásticos.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Tecnológica del Perú por el apoyo financiero que permitió la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] B. Abdulhadi, P. Kot, K. Hashim, A. Shaw, M. Muradov, y R. Al-Khaddar, «Continuous-flow electrocoagulation (EC) process for iron removal from water: Experimental, statistical and economic study», *Sci. Total Environ.*, vol. 760, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143417.
- [2] T. Aguiar, L. Baumann, A. Albuquerque, L. Teixeira, E. de Souza Gil, y P. Scalize, «Application of Electrocoagulation for the Removal of Transition Metals in Water», *Sustainability*, vol. 15, n.º 2, 2023, doi: 10.3390/su15021492.
- [3] S. A. Bakry, M. E. Matta, A. M. Noureldin, y K. Zaher, «Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of heavy metals from wastewater using aluminum electrodes under variable operating

- conditions», *Desalin. Water Treat.*, vol. 318, 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100396.
- [4] C. An, G. Zhang, Y. Yao, y S. Zhao, «Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review», *Sci. Total Environ.*, vol. 579, pp. 537-556, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.062.
 - [5] B. Biswas y S. Goel, «Electrocoagulation and electrooxidation technologies for pesticide removal from water or wastewater: A review», *Chemosphere*, vol. 302, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134709.
 - [6] S. A. Abdul-Husain y S. Alramahi, «Removal of Pathogenic pollutants using electrocoagulation using aluminium electrodes», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1184, n.º 1, p. 012011, sep. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1184/1/012011.
 - [7] T. Mu, M. Park, y K.-Y. Kim, «Energy-efficient removal of PFOA and PFOS in water using electrocoagulation with an air-cathode», *Chemosphere*, vol. 281, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130956.
 - [8] M. A. Hanif, N. Ibrahim, F. A. Dahalan, U. F. Umi Fazara, M. Hasan, y A. A. Jalil, «Microplastics and nanoplastics: Recent literature studies and patents on their removal from aqueous environments», *Sci. Total Environ.*, vol. 810, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152115.
 - [9] C. J. Foley, Z. S. Feiner, T. D. Malinich, y T. O. Höök, «A meta-analysis of the effects of exposure to microplastics on fish and aquatic invertebrates», *Sci. Total Environ.*, vol. 631-632, pp. 550-559, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.046.
 - [10] M. N. Issac y B. Balasubramanian, «Effect of microplastics in water and aquatic systems», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, n.º 16, pp. 19544-19562, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-13184-2.
 - [11] P. R. Swain, P. K. Parida, P. J. Majhi, B. K. Behera, y B. K. Das, «Microplastics as Emerging Contaminants: Challenges in Inland Aquatic Food Web», *Water*, vol. 17, n.º 2, 2025, doi: 10.3390/w17020201.
 - [12] W. Biao, N. A. Hashim, M. F. B. Rabuni, O. Lide, y A. Ullah, «Microplastics in aquatic systems: An in-depth review of current and potential water treatment processes», *Chemosphere*, vol. 361, 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142546.
 - [13] A. E. Essien, S. E. Dickson-Anderson, y Y. Guo, «Utilizing nature-based adsorbents for removal of microplastics and nanoplastics in controlled polluted aqueous systems: A systematic review of sources, properties, adsorption characteristics, and performance», *Next Sustainability*, vol. 5, p. 100119, ene. 2025, doi: 10.1016/j.nxsust.2025.100119.
 - [14] B. Li, J. Zhao, W. Ge, W. Li, y H. Yuan, «Coagulation-flocculation performance and floc properties for microplastics removal by magnesium hydroxide and PAM», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, n.º 2, 2022, doi: 10.1016/j.jece.2022.107263.
 - [15] I. Ali *et al.*, «Removal of micro- and nanoplastics by filtration technology: Performance and obstructions to market penetrations», *Journal of Cleaner Production*, vol. 470, p. 143305, sep. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143305.
 - [16] K. Rajala, O. Grönfors, M. Hesampour, y A. Mikola, «Removal of microplastics from secondary wastewater treatment plant effluent by coagulation/flocculation with iron, aluminum and polyamine-based chemicals», *Water Res.*, vol. 183, 2020, doi: 10.1016/j.watres.2020.116045.
 - [17] Y.-T. Tse, H.-S. Lo, S. M.-N. Chan, y E. T.-P. Sze, «Flow Cytometry as a Rapid Alternative to Quantify Small Microplastics in Environmental Water Samples», *Water*, vol. 14, n.º 9, 2022, doi: 10.3390/w14091436.
 - [18] L. Valdiviezo-Gonzales, N. L. Valdivia, I. Cassana, J. Huaytalla Aldana, y E. Segovia Tito, «Removal of microplastics by electrocoagulation: A brief review and bibliometric analysis», en *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, M. M. L. Petrie, J. Texier, y R. A. R. Matta, Eds., Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.1301.
 - [19] A. A. Horton *et al.*, «Semi-automated analysis of microplastics in complex wastewater samples», *Environ. Pollut.*, vol. 268, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115841.
 - [20] J. Yang *et al.*, «Microplastics in different water samples (seawater, freshwater, and wastewater): Methodology approach for characterization using micro-FTIR spectroscopy», *Water Res.*, vol. 232, 2023, doi: 10.1016/j.watres.2023.119711.
 - [21] J. F. Martínez-Villafañe, C. Montero-Ocampo, y A. M. García-Lara, «Energy and electrode consumption analysis of electrocoagulation for the removal of arsenic from underground waters», *J. Hazard. Mater.*, vol. 172, n.º 2-3, pp. 1617-1622, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.044.
 - [22] F. Y. AlJaberi, «Modelling current efficiency and ohmic potential drop in an innovateelectrocoagulation reactor», *Desalin. Water Treat.*, vol. 164, pp. 102-110, 2019, doi: 10.5004/dwt.2019.24452.
 - [23] A. A. Sari, u. Widyarani, E. Sutarlan, E. B. Nursanto, y N. Fasa, «Cost optimization of tannery wastewater treatment by electrocoagulation process with iron electrode under various DC voltage and electricity consumption», en *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, IOP Publishing Ltd, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/623/1/012079.
 - [24] A. Gafiullina, M. Mamelkina, P. Vehmaanperä, T. Kinnarinen, y A. Hökkinen, «Pressure filtration properties of sludge generated in the electrochemical treatment of mining waters», *Water Res.*, vol. 181, 2020, doi: 10.1016/j.watres.2020.115922.
 - [25] M. Elazzouzi, A. El Kasmi, K. Haboubi, y M. S. Elyoubi, «A novel electrocoagulation process using insulated edges of Al electrodes for enhancement of urban wastewater treatment: Techno-economic study», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 116, pp. 506-515, 2018, doi: 10.1016/j.psep.2018.03.006.
 - [26] K. Rajaniemi, S. Tuomikoski, y U. Lassi, «Electrocoagulation sludge valorization—a review», *Resources*, vol. 10, n.º 12, 2021, doi: 10.3390/resources10120127.
 - [27] D. Kumar y C. Sharma, «Paper industry wastewater treatment by electrocoagulation and aspect of sludge management», *J. Clean. Prod.*, vol. 360, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131970.
 - [28] U. Tezcan Un, S. E. Onpeker, y E. Özel, «The treatment of chromium containing wastewater using electrocoagulation and the production of ceramic pigments from the resulting sludge», *J. Environ. Manage.*, vol. 200, pp. 196-203, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.05.075.