

# Electrocoagulation as a Sustainable Alternative for the Treatment of Refinery Effluents: Application in Esmeraldas Refinery

## Electrocoagulación como Alternativa Sostenible para el Tratamiento de Efluentes de Refinería: Aplicación en Refinería Esmeraldas

N.G. Padilla<sup>1</sup>  0000-0001-6694-5523      G.A. Morillo<sup>1,3</sup>  0009-0009-0703-2666  
M.A. Muñoz<sup>3,4</sup>  0000-0003-0728-618X      M.V. Rosero<sup>2,3</sup>  0000-0003-4060-4397

<sup>1</sup>Empresa de Hidrocarburos del Ecuador EP Petroecuador  
E-mail: [Napoleon.Padilla@epetroecuador.ec](mailto:Napoleon.Padilla@epetroecuador.ec)

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador  
E-mail: [mvrosero@uce.edu.ec](mailto:mvrosero@uce.edu.ec)

<sup>3</sup>Grupo de Investigación en Ingeniería de Procesos Químicos, Biológicos y Físicos (GIIP), Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador  
E-mail: [fiq.giip@uce.edu.ec](mailto:fiq.giip@uce.edu.ec)

<sup>4</sup>Departamento de Pirólisis y Polímeros, Universidad de Alicante, Alicante, España.  
E-mail: [mmb127@alu.ua.es](mailto:mmb127@alu.ua.es)

### Abstract

The contamination of effluents generated by the oil refining industry is a critical environmental problem, due to the presence of hydrocarbons, phenols and refractory organic matter that prevent their discharge without treatment. This study evaluates the efficiency of electrochemical treatment by electrocoagulation of the process effluent from the Esmeraldas State Refinery (REE), using aluminum and zinc electrodes. The reduction of total petroleum hydrocarbons (TPH), phenols and chemical oxygen demand (COD) was analyzed in a laboratory-scale electrochemical cell system under controlled conditions of pH, current density and temperature. Average removal efficiencies of 73.69 % for TPH, 57.54 % for phenols and 50.61 % for COD were achieved, with a specific energy consumption of 2.1 kWh/m<sup>3</sup> for a volume of 4 liters per 60 minutes of treatment. The results indicate that electrocoagulation is a viable technical alternative for the treatment of oil wastewater and can contribute to compliance with current Ecuadorian environmental regulations. In addition, the study highlights the influence of the initial composition of the effluent on the efficiency of the process and raises the need for further research to optimize operating performance under acceptable conditions.

**Index terms**— Electrocoagulation, Effluent Treatment, Total Hydrocarbons, Phenols, Chemical Oxygen Demand, Refinery Effluents.

### Resumen

La contaminación de los efluentes generados por la industria de refinación de petróleo constituye un problema ambiental crítico, debido a la presencia de hidrocarburos, fenoles y materia orgánica refractaria que impiden su vertido sin tratamiento. Este estudio evalúa la eficiencia del tratamiento electroquímico mediante electrocoagulación del efluente de proceso de la Refinería Estatal Esmeraldas (REE), utilizando electrodos de aluminio y zinc. Se analizó la reducción de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), fenoles y demanda química de oxígeno (DQO) en un sistema de celda electroquímica a escala de laboratorio, bajo condiciones controladas de pH, densidad de corriente y temperatura. Se alcanzaron eficiencias promedio de remoción del 73,69 % para TPH, 57,54 % para fenoles y 50,61 % para DQO, con un consumo energético específico de 2,1 kWh/m<sup>3</sup> para un volumen de 4 litros por 60 minutos de tratamiento. Los resultados indican que la electrocoagulación es una alternativa técnica viable para el tratamiento de aguas residuales petroleras, y puede contribuir al cumplimiento de la normativa ambiental ecuatoriana vigente. Además, el estudio destaca la influencia de la composición inicial del efluente en la eficiencia del proceso y plantea la necesidad de investigaciones adicionales para optimizar el desempeño operativo en condiciones aceptables.

**Palabras clave**— Electrocoagulación, Tratamiento de Efluentes, Hidrocarburos Totales, Fenoles, Demanda Química de Oxígeno, Efluentes de Refinería.

Recibido: 20-04-2025, Aprobado tras revisión: 04-07-2025

Forma sugerida de citación: Padilla, N.; Muñoz, M.; Morillo, G.; Rosero, M. (2025), "Electrocoagulación como Alternativa Sostenible para el Tratamiento de Efluentes de Refinería: Aplicación en Refinería Esmeraldas". Revista Técnica "energía". No. 22, Issue I, Pp. 53-61.

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v21.n2.2025.706>

© 2025 Autores



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0



### 1. INTRODUCCIÓN

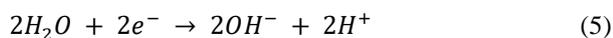
La refinación de petróleo desempeña un papel fundamental en el abastecimiento energético global y en el desarrollo económico de los países productores. Sin embargo, esta actividad industrial genera efluentes líquidos de alta complejidad, caracterizados por la presencia de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), compuestos fenólicos, materia orgánica recalcitrante, metales pesados y sólidos suspendidos [1] [2] [3]. Estos residuos representan un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos y terrestres si no son tratados adecuadamente; además de, incrementar los costos de operación y mantenimiento de las instalaciones industriales [4] [5]. En Ecuador, el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, específicamente el Reglamento Ambiental para Actividades Hidrocarburíferas (Decreto Ejecutivo 1215) [6], obliga a implementar tecnologías de tratamiento que garanticen la calidad de los efluentes vertidos a cuerpos de agua dulce.

Diversas tecnologías de tratamiento, tales como la coagulación química, la adsorción, la oxidación avanzada y los procesos biológicos, han sido aplicadas para el tratamiento de efluentes de refinerías. No obstante, estas tecnologías presentan limitaciones como elevados costos de operación, generación de subproductos secundarios y eficiencia limitada frente a contaminantes persistentes [7] [8].

En los últimos años, los procesos electroquímicos, y en particular la electrocoagulación (EC), han ganado atención como alternativas prometedoras [9] [10] [11]. Este método se basa en la generación in situ de coagulantes metálicos a través de la oxidación electrolítica de electrodos de hierro o aluminio [12] [13], permitiendo la remoción simultánea de contaminantes orgánicos e inorgánicos sin necesidad de aditivos químicos externos. Las reacciones involucradas generan hidróxidos metálicos [14] y especies oxidantes que favorecen la coagulación, adsorción y flotación de contaminantes [13], [16]. Estos mecanismos son influenciados por parámetros operativos como la densidad de corriente, el pH inicial y la configuración del reactor. El mecanismo de la electrocoagulación se basa en las siguientes reacciones principales:



La reacción de oxidación indirecta anódica produce [15]:



Estas reacciones permiten la generación de hidróxidos metálicos activos y de especies oxidantes, promoviendo la coagulación, adsorción y flotación de contaminantes [12] [13] [16]. Sin embargo, la eficiencia de la electrocoagulación depende de múltiples factores operativos como la densidad de corriente, el pH inicial, el diseño del reactor y la naturaleza de los electrodos [15] [17] [18]. Persisten desafíos técnicos relacionados con la optimización de estos parámetros en condiciones reales de operación [19] [20] [21], especialmente en efluentes complejos como los de refinería.

Para asegurar la protección de los recursos hídricos y cumplir con los compromisos ambientales nacionales, el Estado ecuatoriano, a través del Reglamento Ambiental para Actividades Hidrocarburíferas (Decreto Ejecutivo 1215), establece que toda descarga de origen doméstico o industrial al sistema de alcantarillado o directamente a cuerpos de agua dulce debe cumplir, como mínimo, con los valores límites señalados en la Tabla 10 del mencionado reglamento [6]. En el presente estudio, se consideraron los parámetros críticos definidos en dicha normativa para evaluar la calidad del efluente tratado, cuyos límites permisibles se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce [6].

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo
Conductividad	us	-	2500
Potencial de hidrógeno	pH	-	5-9
Sólidos Totales	ST	ppm	1600
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	ppm	0.2
Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	TPH	ppm	20,0
Metales pesados	-	ppm	0.5
Nitrógeno amoniacal	N	ppm	30
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	DQO	ppm	120

En este contexto, la propuesta del presente estudio consiste en evaluar la aplicación de un sistema de electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio y acero galvanizado como portador de zinc, para el tratamiento del lazo de reciclaje de aguas residuales de la Refinería Estatal Esmeraldas (REE), operada por EP Petroecuador. Se busca determinar la eficiencia de remoción de TPH, compuestos fenólicos y DQO, bajo condiciones de operación controladas y compararlas con los límites establecidos en la normativa ecuatoriana.



## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El estudio experimental se llevó a cabo utilizando 12 muestras de agua recolectadas entre abril y mayo de 2024 en la unidad de tratamiento de efluentes de la REE. La toma de muestras se realizó conforme al procedimiento interno, basado en la norma NTE INEN 2169:2013 para aguas residuales industriales, garantizando condiciones de representatividad y estabilidad fisicoquímica adecuadas para su análisis y tratamiento EC posterior. El diagrama general del proceso seguido se presenta en la Figura 1.

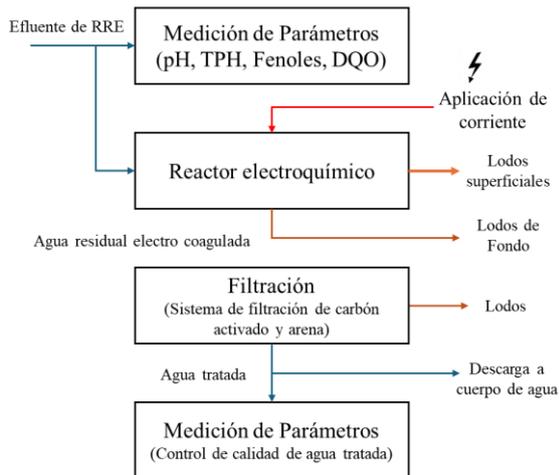


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso

### 2.1 Medición de parámetros de calidad del agua

La medición de los parámetros de calidad del agua se realizó tanto en el efluente crudo de entrada como en el efluente tratado de salida, evaluando los indicadores de pH, hidrocarburos totales de petróleo (TPH), compuestos fenólicos y demanda química de oxígeno (DQO). Durante el período de estudio se llevaron a cabo doce (12) campañas de muestreo, en cada una de las cuales se analizaron los cuatro parámetros mencionados. El pH fue determinado utilizando el método SM 4500H+B mediante un medidor E2-040 modelo HQ11D, con un rango de medición de 4 a 10 unidades de pH y una precisión de  $\pm 0,10$  pH. La concentración de TPH se cuantificó aplicando el método SM 5520-F y ASTM D8193, utilizando el equipo TPH E3-050 (modelo ERACHECK ECO-01). La determinación de compuestos fenólicos se efectuó mediante espectrofotometría UV-Vis en un espectrofotómetro Thermo Genesis 10S E3-017, en un rango espectral de 190–1100 nm y una velocidad de escaneo de hasta 1000  $\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$ , conforme al método ASTM D1783. Finalmente, la DQO fue medida empleando el equipo portátil HACH DR900 E3-038, bajo el método SM 5220B, con un rango de medición de 5 a 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y una precisión del  $\pm 4,6\%$ .

### 2.2 Proceso de electrocoagulación de efluentes de refinerías de petróleo

El tratamiento de electrocoagulación de las muestras se llevó a cabo en un reactor de vidrio de dimensiones 20×15×25 cm y un volumen efectivo de 7,5 litros. El sistema de electrocoagulación está compuesto por seis electrodos dispuestos en placas paralelas (tres ánodos de aluminio y tres cátodos de acero galvanizado), con dimensiones individuales de 4×9×0,03 cm y un área activa combinada de 32,4  $\text{cm}^2$ .

El reactor (Figura 2) fue alimentado por una fuente de corriente continua ajustable modelo KA3005D, con rango ajustable de 0–30 V y 0–5 A, precisión de salida de voltaje  $\pm 0,01$  V y control digital de corriente. Se operando en el rango de 4500 a 6700 mA, lo que corresponde a una densidad de corriente aproximada de 138  $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Cada ensayo experimental se realizó tratando 4 litros de efluente contaminado; las condiciones de operación de temperatura de 26 °C y 60 minutos fueron seleccionadas con base en estudios previos [22] [23].

Durante el proceso se monitoreó la formación de flóculos y la evolución de los parámetros de calidad del agua. Al concluir el tiempo de tratamiento, se apagó la fuente de corriente y se permitió la sedimentación gravitacional de los flóculos. Posteriormente, el agua residual tratada y los lodos (tanto superficiales como de fondo) fueron separados mediante filtración.

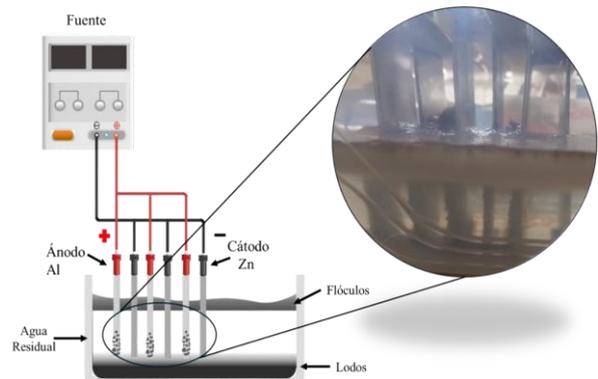


Figura 2: Representación esquemática del montaje del reactor electroquímico

### 2.3 Proceso de filtración de efluentes de agua tratada mediante electrocoagulación

El agua tratada mediante electrocoagulación fue sometida a un proceso de filtración complementaria con el objetivo de garantizar la remoción de partículas residuales. El sistema de filtración constó de tres etapas consecutivas: una primera filtración gruesa mediante papel filtro de celulosa con porosidad de 10 micras; seguida de una etapa de adsorción mediante 25 gramos de carbón activado (tamaño de partícula entre 0,8 y 1,2 mm); y finalmente una filtración por gravedad usando 30 gramos de arena sílicea lavada, con granulometría controlada entre 1,5 y 2,0 mm.

En cada ciclo de filtración se procesaron 3,8 litros de agua tratada. Posteriormente, se realizaron mediciones de

pH, hidrocarburos totales de petróleo (TPH), compuestos fenólicos y demanda química de oxígeno (DQO) en el agua filtrada, con el fin de verificar la calidad final del efluente tratado.

### 2.4 Cálculo del consumo energético

El consumo energético específico (E, en kWh/m<sup>3</sup>) un volumen tratado de 4 litros, aplicando una corriente continua de 0,7 A y un voltaje de 12 V durante un tiempo de 60 minutos. Fue determinado utilizando las siguientes expresiones:

$$P = I \times V \tag{7}$$

$$E = P \times t \tag{8}$$

$$\text{Energía específica} = \frac{E}{\text{volumen}} \tag{9}$$

Donde: P es la potencia eléctrica; I es la corriente en amperios (A); V es el voltaje en voltios (V); E es la energía consumida en kWh y t es el tiempo en horas (h) y Volumen en metros cúbicos (m<sup>3</sup>).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización inicial de los efluentes crudos de la Refinería de Esmeraldas se presenta en la Tabla 2. Los valores obtenidos para pH, hidrocarburos totales de petróleo (TPH), fenoles y demanda química de oxígeno (DQO) son consistentes con los reportados en otros estudios relacionados [22] [23].

Tabla 2: Caracterización de las muestras crudas de efluentes recolectadas en la Refinería Estatal Esmeraldas

Muestra	pH	Hidrocarburos totales (TPH)	Fenoles (mgL <sup>-1</sup> )	DQO (mgL <sup>-1</sup> )
1	6,93	27,6	70,5	350
2	7,71	12,6	85,5	332
3	7,9	19,6	95,7	424
4	7,69	14,8	104,4	401
5	7,33	20,8	70,54	624
6	7,5	25,4	59,31	331
7	7,8	24,8	62,34	451
8	7,4	24,1	86,5	440
9	7,36	24,1	86,5	440
10	7,20	49,8	43,68	408
11	7,50	33,2	38,9	213
12	7,20	25,1	21,4	187

Los resultados indican que las concentraciones de TPH, fenoles y DQO exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana (Tabla 10, Anexo 1 del Decreto 1215 [6]), la cual establece valores máximos permisibles de 10 mg/L para TPH, 0,1 mg/L para fenoles y una

remoción mínima del 78 % de DQO para efluentes de refinerías [24] [25]. Esto muestra la necesidad de buscar tratamientos eficaces para la remoción de estos contaminantes.

La electrocoagulación se ha planteado como una alternativa viable para la remoción de materia orgánica, metales pesados y otros contaminantes en aguas residuales industriales [26] [27] [28]. En este estudio, se empleó un reactor electroquímico con ánodos de aluminio y cátodos de acero galvanizado (zinc).

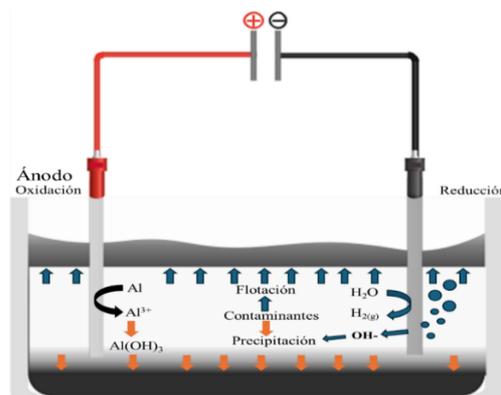
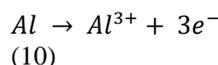


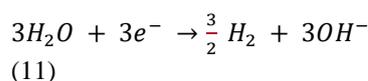
Figura 3: Representación esquemática de los procesos electroquímicos de oxidación y reducción en un sistema de electrocoagulación utilizando electrodos metálicos

La disolución anódica y catódica durante la electrocoagulación (Figura 3) sigue las siguientes reacciones:

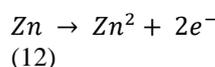
Anodización del aluminio:



Reducción del agua en el cátodo:



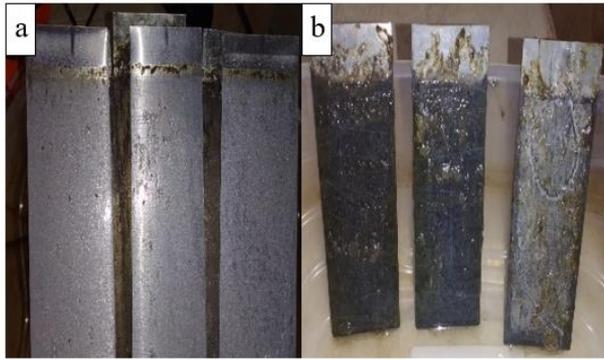
Oxidación del zinc:



Formación de flóculos de hidróxido de zinc:



La Figura 4 muestra el desgaste observado en los electrodos tras el proceso de electrocoagulación: los electrodos de aluminio presentan evidentes signos de oxidación, liberando Al<sup>3+</sup> que favorece la formación de flóculos de Al(OH)<sub>3</sub>, mientras que los electrodos de zinc exhiben depósitos de materia orgánica e hidrocarburos.



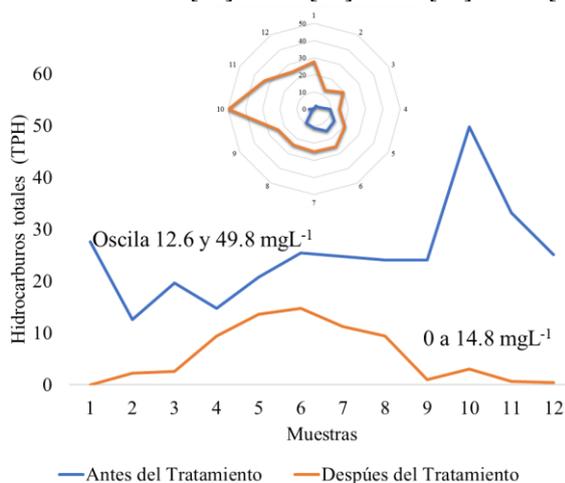
**Figura 4: Cambios en los electrodos metálicos después del proceso de electrocoagulación: (a) Electrodos de aluminio mostrando desgaste superficial debido a la liberación de iones  $Al^{3+}$ ; (b) Electrodos de zinc recubiertos con depósitos de hidrocarburos provenientes del efluente tratado**

### 3.1 Reducción de hidrocarburos totales de petróleo (TPH)

La Figura 5, muestra los perfiles de concentración de TPH antes y después de 60 minutos de tratamiento. Inicialmente, las concentraciones de TPH variaron entre 12,6 y 49,8 mg/L. Tras la electrocoagulación, los valores se redujeron a un rango de 0 a 14,8 mg/L<sup>-1</sup>, con una eficiencia promedio de remoción del 73,69 %. Las muestras 1, 10, 11 y 12 mostraron las reducciones más drásticas, con niveles cercanos a cero.

Como se presentó en las ecuaciones 7 y 9 la electrocoagulación implica la conversión de  $Al^{3+}$  en  $Al(OH)_3$  en el ánodo y la conversión de  $Zn^{2+}$  en  $Zn(OH)_2$  en el cátodo, los iones  $Al^{3+}$  reaccionan con el fenol para formar compuestos organometálicos. [29]

La eliminación de TPH se atribuye a la generación de hidróxidos metálicos que favorecen la adsorción y coagulación de hidrocarburos, dada su naturaleza hidrofóbica [30] [31] [32] [33].



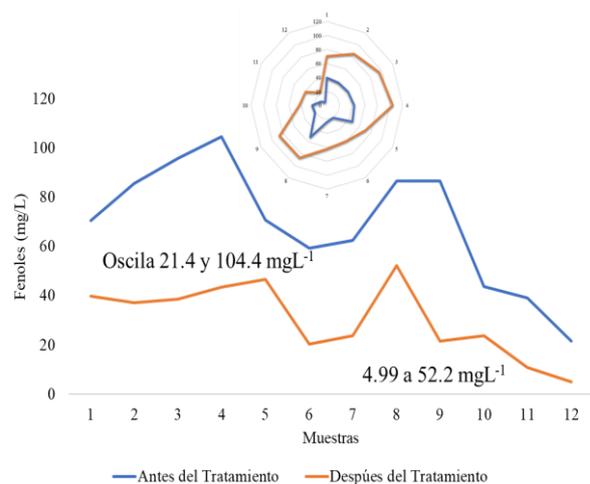
**Figura 5: Comparación del perfil de degradación de THP antes y después del proceso de electrocoagulación por 60 minutos**

Comparativamente, otros estudios como los de Pérez y colaboradores reportan remociones de hasta 98 % tras 30 días de tratamiento combinado electroquímico-biológico, mientras que procesos puramente biológicos, como el de Chang y colaboradores, lograron solo un 55 % de remoción en 60 días [34] [35]. Estos resultados destacan la superioridad de la electrocoagulación en términos de eficiencia y rapidez.

### 3.2 Reducción de fenoles

La Figura 6 muestra la reducción de fenoles tras 60 minutos de tratamiento. Las concentraciones iniciales, entre 21,4 y 104,4 mg/L, disminuyeron a valores entre 4,99 y 52,2 mg/L, logrando una eficiencia promedio de remoción del 57,54 %. Esta eficiencia, inferior a la obtenida para TPH, se explica por la mayor polaridad y solubilidad de los fenoles en agua.

La variabilidad en los resultados sugiere que factores como la concentración inicial de fenoles y la presencia de otros contaminantes pueden influir en la efectividad del proceso. También, autores como Abdelwahab utilizó un recipiente rectangular de plexiglás de dimensiones (25 cm × 25 cm × 30 cm) como celda electroquímica de un baño de agua termostático para controlar la temperatura, los experimentos se llevaron a cabo a un pH 7 para una concentración inicial de fenol de 50 mg L<sup>-1</sup> en presencia de 2 g L<sup>-1</sup> de NaCl, la densidades de corriente fueron de 6,4; 12,9; 19,3 y 23,6 mA cm<sup>-2</sup>, alcanzando un porcentaje de remoción de 84, 88, 95 y 97% respectivamente durante dos (2) horas de tratamiento. Donde se concluyó que la electrocoagulación con electrodos de aluminio eliminaba el 97% del fenol de las aguas residuales de las refinerías de petróleo [36], este valor es superior al obtenido en nuestro estudio debido a que el tiempo de exposición es mayor-



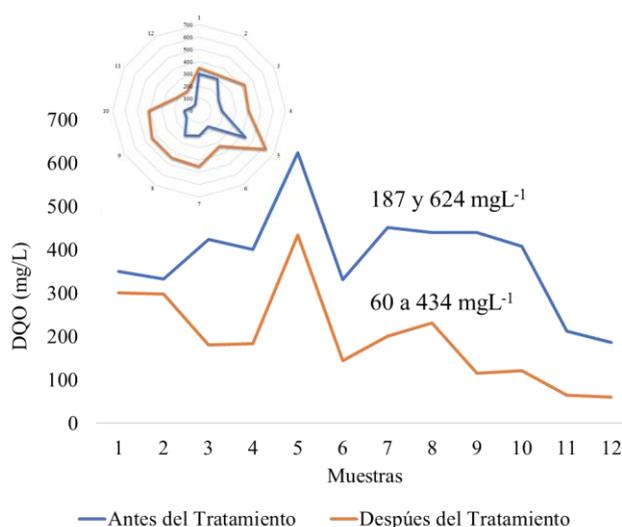
**Figura 6: Comparación del perfil de degradación de fenoles antes y después del proceso de electrocoagulación por 60 minutos**

La remoción de fenoles ocurre mediante la formación de complejos organometálicos entre  $Al^{3+}$  y fenoles [29] [37] [38] [39]. Esto se atribuye al hecho de que a

densidades de corriente altas y tiempos de exposición prolongados la disolución del electrodo anódico aumenta de acuerdo con la ley de Faraday, los hidróxidos de aluminio resultantes producen más lodos con la consiguiente eliminación significativa de fenol debido a la coagulación de barrido [40] [41] [42].

### 3.3 Reducción de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Fig. 7 presenta los resultados para la DQO. Las concentraciones iniciales variaron entre 187 y 624 mgL<sup>-1</sup>, reduciéndose a un rango de 60 a 434 mgL<sup>-1</sup> después del tratamiento, con una eficiencia promedio de remoción del 50,61 %, la más baja entre los parámetros evaluados.



**Figura 7: Comparación del perfil de degradación de DQO antes y después del proceso de electrocoagulación por 60 minutos**

La eliminación de DQO se produce por la formación de flocúlos de Al(OH)<sub>3</sub>, los cuales aglomeran y sedimentan materia orgánica [43] [44] [45]. Aunque efectiva, la reducción moderada de DQO indica que puede ser necesario complementar la electrocoagulación con procesos adicionales, como coagulación química o filtración multilecho. Comparativamente, El-Naas en su trabajo del 2009 reportó una remoción de 98,9 % de DQO utilizando electrodos de aluminio frente al 85,6 % alcanzado con acero inoxidable [46].

### 3.4 Consumo energético

El tratamiento de 4 litros de efluente bajo las condiciones evaluadas resultó en un consumo energético específico de 2,1 kWh/m<sup>3</sup>. Este valor es significativamente menor al reportado por Butler (5,768 kWh/m<sup>3</sup>) [20], indicando una mayor eficiencia energética atribuible al uso de corriente moderada y tiempo de tratamiento optimizado. Otros estudios, como el de Saeedi Pikaar en el 2011, también han reportado mejoras en la remoción de contaminantes mediante el uso de electrodos de óxidos metálicos mixtos [47] [48], aunque se enfatiza la importancia de evaluar la estabilidad a largo plazo de los electrodos [49].

Finalmente, bajo condiciones optimizadas, Jawad y colaboradores en 2019 lograron eliminaciones de hasta 100 % de DQO y 99,12 % de fenoles utilizando electrodos de grafito, aunque a un mayor consumo energético (59,9 kWh/kg) [50].

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de electrocoagulación utilizando ánodos de aluminio y un cátodo de zinc demostró ser efectivo para la remoción de contaminantes en los efluentes de la Refinería de Esmeraldas (REE). Se obtuvo una eficiencia promedio de reducción del 73,69 % para hidrocarburos totales de petróleo (TPH); 57,54 % para fenoles y 50,61 % para la demanda química de oxígeno (DQO), bajo condiciones de operación de pH cercano a 7,46, densidad de corriente de 138 mA/cm<sup>2</sup> y un tiempo de tratamiento de 60 minutos, con un consumo energético específico de 2,1 kWhm<sup>-3</sup>.

Comparado con tratamientos convencionales, como la biodegradación o biofiltración, que requieren tiempos prolongados (30 a 60 días) y presentan eficiencias de remoción de TPH en el rango de 55 – 68 %, la electrocoagulación mostró un desempeño superior en tiempos significativamente más cortos. Sin embargo, al contrastarlo con estudios optimizados de electrocoagulación que alcanzan remociones mayores al 90 % bajo densidades de corriente elevadas y mayores tiempos de operación, se evidencia que las condiciones de operación evaluadas en este estudio aún tienen margen de mejora como la modificación de pH en la celda electroquímica.

La variabilidad en la eficiencia de remoción observada entre las diferentes muestras refleja la influencia crítica de la composición inicial del efluente relacionada directamente con la variabilidad de condiciones operativas del proceso de refinería. Esto señala la necesidad de estudios adicionales de homogenización de parámetros en el efluente. Lo que llevará a una mejor estandarización de parámetros de la celda electroquímica como pH, intensidad de corriente, disposición de electrodos y tiempo de tratamiento, así como el análisis de la estabilidad y desgaste de los electrodos a largo plazo.

El sistema estudiado demostró una adecuada eficiencia energética comparada con otros reportes de la bibliografía, lo que respalda su potencial para aplicaciones industriales. No obstante, aspectos como la gestión de los lodos generados, la durabilidad de los materiales electrodos y la eficiencia del tratamiento en condiciones de operación continua deben ser abordados en investigaciones futuras para garantizar la sostenibilidad y escalabilidad del proceso.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador EP Petroecuador y al Grupo de Investigación en

Ingeniería de Procesos (GIIP) de la Facultad de Ingeniería Química de la UCE.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Wang, M. G. Smit, Y. Verhaegen, T. M. Nolte, A. D. Redman, A. J. Hendriks y M. Hjort, «Petroleum refinery effluent contribution to chemical mixture toxic pressure,» *Chemosphere*, vol. 311, p. 137127, 2023.
- [2] World Bank Group, «Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la refinación del petróleo,» Corporación Financiera Internacional, 2007.
- [3] B. M. E. Canchingre, Q. G. Mosquera, P. M. Morales y R. V. Galán, «La gestión de los residuos líquidos empresariales de la refinería estatal esmeraldas, república del ecuador,» *CIGET*, n° 3, pp. 42-56, 2016.
- [4] J. Wang, L. S. Lautz, T. M. P. L. Nolte, K. R. Koopman, R. S. Leuven y A. J. Hendriks, «Towards a systematic method for assessing the impact of chemical pollution on ecosystem services of water systems,» *Journal of Environmental Management*, vol. 281, p. 111873, 2021.
- [5] L. Posthuma, M. C. Zijp, D. De Zwart, D. Van de Meent, L. Globovnik, M. Koprivsek, A. Focks, J. Van Gils y S. Birk, «Chemical pollution imposes limitations to the ecological status of European surface waters,» *Scientific Report*, vol. 10, p. 14825, 2020.
- [6] Ministerio del Ambiente, Agua, y Transición Ecológica, Anexo 1 Decreto Ejecutivo 1215: REVISION DEL ANEXO 1 DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO, Quito ecuador : GOB-EC, 2010.
- [7] C. DAMIAN, «Environmental pollution in the petroleum refining industry,» *Ovidius University Annals of Chemistry*, vol. 24, n° 2, pp. 109-114, 2013.
- [8] S. Shailja y Shikha, «Treatment and Recycling of Wastewater from Oil Refinery/Petroleum Industry,» *Advances in Biological Treatment of Industrial Waste Water and their Recycling for a Sustainable Future*, p. 303–332, 2018.
- [9] X. Li, «Development in electrochemical technology for environmental wastewater treatment,» *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 17, n° 12, p. 2212110, 2022.
- [10] C. A. Martínez-Huitle, «Environment-Friendly Electrochemical Processes,» *Materials*, vol. 14, n° 6, p. 1548, 2021.
- [11] H. E.-N. S. A.-Z. A. A.-L. Muftah, «Treatment of Petroleum Refinery Wastewater by Continuous Electrocoagulation,» *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, n° 10, pp. 2144- 2150, 2013.
- [12] M. P. & P. P. D. & S. M. Kumar y col., *Electrocoagulation Based Treatment of Water and Wastewater Overview and Applications*, Elsevier, 2024.
- [13] Y.-J. & H. C.-Y. & L. S.-L. Liu y col., «Direct and indirect electrochemical oxidation of amine-containing pharmaceuticals using graphite electrodes,» *Hazardous Materials*, vol. 366, n° 15, pp. 592-605, 2019.
- [14] C. Comninellis, «Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment,» *Electrochimica Acta*, vol. 39, n° 11-12, pp. 1857-1862, 1994.
- [15] J. S. Al-Marri, A. B. Abouedwan, M. I. Ahmad y N. Bensalah, «Electrocoagulation using aluminum electrodes as a sustainable and economic method for the removal of kinetic hydrate inhibitor (polyvinyl pyrrolidone) from produced wastewaters,» *Frontiers*, vol. 23, p. 1305347, 2023.
- [16] C. A. Martínez-Huitle y M. Panizza, «Electrochemical oxidation of organic pollutants for wastewater treatment,» *Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 11, pp. 62-71, 2018.
- [17] D. E. B. Million, «Studies on electrode combination for COD removal from domestic wastewater using electrocoagulation,» *Heliyon*, vol. 7, n° 12, p. e08614., 2021.
- [18] A. Kadier, Z. Al-Qodah, G. Kurtoglu, D. Song, J. Peralta, J. Ying, C. Phalakornkule, M. Bajpai, M. Noorzalila, V. Gilhotra, M. Ebba, Q. Ma y C. Chiedo, «A state-of-the-art review on electrocoagulation (EC): An efficient, emerging, and green technology for oil elimination from oil and gas industrial wastewater streams,» *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 6, p. 100274, 2022.
- [19] A. A. Moneer, W. M. Thabet, M. Khedawy, M. M. El-Sadaawy y N. A. Shaaban, «Electrocoagulation process for oily wastewater treatment and optimization using response surface methodology,» *Environmental Science and Technology*, p. 13859–13872, 2023.
- [20] E. Butler, Y.-. H. R. Tse, L. Y. Yu, M. Suleiman y A. Ahmad, «Electrocoagulation in Wastewater Treatment,» *Water*, vol. 3, n° 2, pp. 495-525, 2011.
- [21] C. C. Almeida, P. R. F. d. Costa, M. J. d. M. Melo, E. V. d. Santos y C. A. Alberto, «Application of Electrochemical Technology for Water Treatment of Brazilian Industry Effluents,» de la Sociedad Química de Mexico, vol. 58, n° 3, pp. 276-286, 2014.

- [22] S. Ye y N. Li, «Comparison of Electrochemical Treatment of Petroleum Refinery Effluents Using Electrooxidation, Electrocoagulation and Electrophenol Process.», *ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, vol. 11, n° 7, p. 6173 – 6182, 2016.
- [23] L. S. Perez, O. M. Rodriguez, S. Reyna, J. L. Sánchez-Salas, J. D. Lozada, M. A. Quiroz y E. R. Bandala, «Oil refinery wastewater treatment using coupled electrocoagulation and fixed film biological processes.», *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 91, pp. 53 - 60, 2016.
- [24] Presidencia de la Republica del Ecuador, «REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LA NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL.», Ecuador, 2017.
- [25] P. R. G. Sánchez y G. K. J. García, «WASTEWATER TREATMENT OF INDUSTRIAL LOADS WITH ADVANCED OXIDATION IN CONVENTIONAL SYSTEMS.», *La Granja*, vol. 27, n° 1, pp. 101-109, 2018.
- [26] T. Ahmed, H. B. M. Rahman, M. H. Khan, A. Ahsan, N. Islam, M. El-Sergany, M. Shafiquzzaman, M. Imteaz y N. Al-Ansari, «Evaluation of the impacts of seawater integration to electrocoagulation for the removal of pollutants from textile wastewater.», *Environmental Sciences Europe*, vol. 36, n° 77, 2024.
- [27] S. M. Didar-Ui Islam, «Electrocoagulation (EC) technology for wastewater treatment and pollutants removal.», *Sustainable Water Resources Management*, vol. 5, pp. 359–380., 2019.
- [28] P. B. Bhagawati, F. Y. AlJaberi, S. A. Ahmed, A. Kadier, H. H. Alwan, S. K. Ajjam, C. B. Shivayogimath y B. R. Babu, «Electrocoagulation Technology for Wastewater Treatment: Mechanism and Applications.», *Advanced Oxidation Processes in Dye-Containing Wastewater*, p. 305–318, 2022.
- [29] R. Alam, M. Sheob, B. Saeed, K. S. Ullah, M. Shirinkar, Z. Frontistis, F. Basheer y I. H. Farooqi, «Use of Electrocoagulation for Treatment of Pharmaceutical Compounds in Water/Wastewater: A Review Exploring Opportunities and Challenges.», *Water*, vol. 13, n° 15, p. 2105, 2021.
- [30] E. Mohamed y R. Nassef, «Coagulation: The metal ions react with the hydrocarbons, neutralizing their charge and causing them to aggregate into larger particles. This process is known as coagulation.», *Petroleum and Gas Engineering*, vol. 5, n° 3, p. Mohamed, 2014.
- [31] J. Craggs y R. Park, «Electrocoagulation for cost-effective wastewater treatment.», *National Institute of Water and Atmospheric Research*, n° 1-23, 2019.
- [32] N. Drouiche, S. Aoudj, M. Hecini, N. Ghaffour, H. Lounici y N. Mameri, «Study on the treatment of photovoltaic wastewater using electrocoagulation: Fluoride removal with aluminium electrodes— Characteristics of products.», *Hazardous Materials*, vol. 169, pp. 65-69, 2009.
- [33] R. Muttaqin, R. Ratnawati, S. Slamet y col., «Batch electrocoagulation system using aluminum and stainless steel 316 plates for hospital wastewater treatment.», *International Bioprocessing Association Subject Conference*, vol. 963, p. 012056, 2022.
- [34] W. Chang, L. Whyte y S. Ghoshal, «Comparison of the effects of variable site temperatures and constant incubation temperatures on the biodegradation of petroleum hydrocarbons in pilot-scale experiments with field-aged contaminated soils from a cold regions site.», *Chemosphere*, vol. 82, n° 6, pp. 872-878, 2011.
- [35] E. Zamudio-Pérez, E. R. Bandala, L. C. Fernandez y L. G. Torres, «Surfactant Enhanced Washing of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbons and Treatment of Produced Wastewaters Using a Biofilter.», *Environmental Treatment Techniques*, vol. 1, n° 2, pp. 110-116, 2013.
- [36] O. Abdelwahab, N. K. Amin y E.-S. Z. El-Ashtoukhy, «Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater.», *Hazardous Materials*, vol. 163, n° 2-3, pp. 711-6, 2009.
- [37] M. A. Sadik, «A Review of Promising Electrocoagulation Technology for the Treatment of Wastewater.», *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 9, pp. 109-126, 2019.
- [38] V. M. Crespo, *QUÍMICA ORGANOMETÁLICA*, Barcelona: Universidad de Barcelona, 2023.
- [39] T. Priya, B. K. Mishra y P. M. N. Vara, «Physico-chemical techniques for the removal of disinfection by-products precursors from water.», *de Disinfection By-products in Drinking Water*, Butterworth Heinemann, 2020, pp. 23-58.
- [40] G. Zhen-Ren, G. Zhang, J. Fang y X. Dou, «Enhanced chromium recovery from tanning wastewater.», *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, n° 1, pp. 75-79, 2006.
- [41] A. Golder, A. Samanta y S. Ray, «Removal of trivalent chromium by electrocoagulation.», *Separation and Purification Technology*, vol. 53, n° 1, pp. 33-41, 2007.
- [42] H. M. Mateus, J. Barba-Ortega y M. Rincón-Joya, «Comportamiento en la curva de la corriente eléctrica cambiando el área de anodizado.», *Respuestas*, vol. 25, n° 2, pp. 117-124, 2020.
- [43] M. C. Area, S. A. Ojeda, O. M. Barboza, D. I. Bengoechea y F. E. Felissia, «Tratamientos aplicables para la reducción de la DQO

recalcitrante de efluentes de pulpos quimimécnicos y semiquímicos (revisión),» *Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 13, 2010.

- [44] M. Ebba, P. Asaithambi y E. Alemayehu, «Development of electrocoagulation process for wastewater treatment: optimization by response surface methodology,» *Heliyon*, vol. 8, n° 5, p. e09383., 2020.
- [45] R. M. A. López, O. O. P. Castellanos, R. F. Lango, C. M. C. Castañeda, M. J. Montoya, V. C. A. Sosa, M. B. Ortiz y col, «Advanced Oxidation as an Alternative Treatment for Wastewater. A Review,» *Enfoque*, vol. 12, n° 4, pp. 76-87, 2020.
- [46] M. H. El-Naas, S. Al-Zuhair, A. Al-Lobaney y S. Makhlof, «Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater,» *Environ Manage*, vol. 91, n° 1, pp. 180-185, 2009.
- [47] M. Saedi y A. Khalvati-Fahlyani, «Treatment of Oily Wastewater of a Gas Refinery by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes,» *Water Environmental Federation*, vol. 83, n° 2, pp. 256-264, 2011.
- [48] I. Pikaar, R. A. Rozendal, Z. Yuan, J. Keller y K. Rabaey, «Electrochemical sulfide oxidation from domestic wastewater using mixed metal-coated titanium electrodes,» *Water Research*, vol. 45, n° 17, pp. 5381-5388, 2011.
- [49] R. Souza y L. Ruotolo, «Electrochemical treatment of oil refinery effluent using boron-doped diamond anodes,» *Environmental Chemical Engineering*, vol. 1, n° 3, pp. 544-551, 2013.
- [50] S. S. Jawada y A. H. Abbar, «Treatment of petroleum refinery wastewater by electrochemical,» *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, vol. 12, p. 144-150, 2019.



**Napoleón Padilla.** - Nació en Esmeraldas, Ecuador, en 1980. Es Ingeniero Químico por la Universidad Central del Ecuador (2006), Magíster en Administración de Empresas por la Universidad Técnica Luis Vargas Torres, en 2013 y Máster en Ingeniería

Química por la Universidad Central del Ecuador, en 2025. Actualmente cursa el doctorado en Administración Gerencial en la Universidad Benito Juárez García, México. Su investigación se centra en el tratamiento de aguas residuales de la industria petrolera mediante procesos electroquímicos. Se desempeña como jefe de Tratamiento de Aguas y Efluentes en la Refinería Estatal Esmeraldas de EP Petroecuador.



**Morayma Muñoz Borja.** - Nació en Quito, Ecuador, en 1992. Recibió su título de Ingeniera Química en la Universidad Central del Ecuador en 2017. Obtuvo el título de Máster en Ingeniería Química en la Universidad de Alicante, en 2020, y el título de Máster en Sistemas Integrados de Gestión en la Universidad Alfonso X el Sabio, en 2023. Actualmente cursa estudios de doctorado en la Universidad de Alicante. Sus áreas de investigación se centran en pirólisis analítica y fenómenos de transporte.



**Grace Morillo Chandi.** - Nació en Ibarra, Ecuador, en 1988. Recibió su título de Ingeniera Química en la Universidad Central del Ecuador en 2012. Obtuvo el título de Magister en Administración y Gerencia Organizacional en la Universidad de las Américas, en 2021.

Actualmente cursa estudios de doctorado en la Universidad de Investigación e Innovación de México. Sus áreas de investigación se centran en hidrocarburos y educación.



**Marco Rosero Espín.** - Nació en Esmeraldas, Ecuador, en 1978. Recibió su título de Ingeniero Químico en la Universidad Central del Ecuador en 2008. Obtuvo el título de Doctor en la Universidad de Alicante, España, en 2025. Sus áreas de investigación se enfocan en

los procesos térmicos aplicados al tratamiento de materiales y en el estudio de sistemas electroquímicos para aplicaciones ambientales y energéticas.