

TRATAMIENTO DE AGUA CRUDA POR ELECTROCOAGULACIÓN SOLAR COMO ALTERNATIVA DE BAJO COSTO PARA COMUNIDADES RURALES

Loris J. Rosado-Quintero¹, William A. Romero-Aroca²,
Julio C. Vega-Suárez³, Erlin D. Carpio-Vega⁴

¹ Especialista en Gestión Ambiental; Fundación Universitaria del Área Andina; lorisjrosado@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5913-0063>

² Especialista en Gestión Ambiental; Fundación Universitaria del Área Andina; romeroarocawilliam@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-8441-7336>

³ Magíster en Ingeniería Sanitaria; Fundación Universitaria del Área Andina; juliovega7@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2364-0978>

⁴ Magíster en Ciencias Ambientales; Universidad Popular del Cesar; erlincarpiovega@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9356-7529>

RESUMEN

Esta investigación evalúa la viabilidad de la electrocoagulación (EC) por energía solar como una tecnología de tratamiento pertinente, accesible y de bajo costo. Se diseñó un reactor discontinuo a escala de laboratorio para tratar agua sintética que simula las características fisicoquímicas y microbiológicas de un río de bosque seco tropical, con una turbidez inicial de 30 NTU, una DQO de 50 mg/L y una elevada carga de *Escherichia coli* (1×10^6 UFC/mL). Los resultados mostraron una alta eficacia, con una remoción de turbidez alrededor de 88,5%, una reducción de la DQO del 76,5% y una reducción logarítmica (LRV) > 6 para *E. coli* en 60 minutos. Se concluye que la electrocoagulación solar con electrodos de hierro es una alternativa robusta, económica y confiable para la potabilización de agua a pequeña escala, con un alto potencial de implementación en comunidades rurales.

Palabras clave: electrocoagulación, potabilización de agua, tratamiento de agua rural, energía solar, electrodos de hierro.

Recibido: 29 de agosto de 2025. Aceptado: 28 de octubre de 2025
Received: August 29, 2025. Accepted: October 28, 2025

SOLAR-POWERED ELECTROCOAGULATION FOR LOW-COST RAW WATER TREATMENT IN RURAL COMMUNITIES

ABSTRACT

*This study investigates the feasibility of solar-powered electrocoagulation (EC) as a suitable, accessible, and low-cost treatment technology. A lab-scale batch reactor was designed to treat synthetic water simulating the physico-chemical and microbiological characteristics of a tropical dry forest river, with an initial turbidity of 30 NTU, a Chemical Oxygen Demand (COD) of 50 mg/L, and a high Escherichia coli load (1×10^6 CFU/mL). The results showed high efficiency, with a turbidity removal of approximately 88.5%, a COD reduction of 76.5%, and a log reduction value (LRV) of > 6 for *E. coli* within 60 minutes. It is concluded that solar electrocoagulation with iron electrodes is a robust, cost-effective, and reliable alternative for small-scale drinking water treatment, holding significant potential for implementation in rural communities.*

Keywords: electrocoagulation, drinking water treatment, rural water treatment, solar energy, iron electrodes.

Cómo citar este artículo: L. Rosado, W. Romero, J. Vega, E. Carpio. "Tratamiento de agua cruda por electrocoagulación solar como alternativa de bajo costo para comunidades rurales", Revista Politécnica, vol.21, no.42, pp.82-87, 2020. DOI:10.33571/rpolitec.v21n42a5

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua en los ríos de la región caribe colombiana se ve comprometida por una combinación de presiones antropogénicas, incluyendo vertimientos de aguas residuales domésticas sin tratar, escorrentía agrícola y sedimentos provenientes de la deforestación y la minería artesanal [1]. Estas fuentes de contaminación introducen una alta carga de materia orgánica, sólidos en suspensión y microorganismos patógenos, representando un riesgo directo para la salud de las comunidades rurales que dependen de estos cuerpos de agua para su consumo [2]. Estudios en la región han reportado consistentemente altos niveles de turbidez y la presencia de bacterias indicadoras de contaminación fecal como *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis*, así como patógenos como *Salmonella* y *Pseudomonas aeruginosa* [1].

Las soluciones de tratamiento de agua convencionales, como la cloración, a menudo enfrentan desafíos logísticos y económicos en zonas rurales y aisladas. Además, la alta turbidez y materia orgánica presentes en estas aguas pueden reducir la eficacia de los desinfectantes químicos y llevar a la formación de subproductos de la desinfección (DBPs) potencialmente nocivos. Esto crea la necesidad de desarrollar tecnologías de tratamiento descentralizadas, robustas y de bajo costo que sean apropiadas para el contexto local [3].

La electrocoagulación (EC) ha surgido como una alternativa prometedora. Este proceso electroquímico utiliza corriente eléctrica para disolver un ánodo de sacrificio, generalmente de hierro (Fe) o aluminio (Al), generando in situ los agentes coagulantes [4, 5]. Estos coagulantes, principalmente hidróxidos metálicos, desestabilizan y aglomeran las partículas coloidales, materia orgánica y microorganismos, facilitando su remoción por sedimentación o flotación. La EC ofrece múltiples ventajas: no requiere la adición de productos químicos, genera lodos más compactos y estables, y es eficaz en la remoción de una amplia gama de contaminantes, incluyendo turbidez, DQO y patógenos [4, 5].

El uso de electrodos de hierro (acero al carbono) es particularmente atractivo para el contexto rural colombiano por su bajo costo y amplia disponibilidad en el mercado local. Además, la integración de la EC con energía solar fotovoltaica (EC-Solar) ofrece una solución autónoma y sostenible, ideal para comunidades sin acceso a una red eléctrica confiable [6].

Este estudio tiene como objetivo evaluar, a escala de laboratorio, la eficacia de un sistema de EC-Solar con electrodos de hierro para el tratamiento de agua que simula las condiciones de un río típico de la costa caribe. Se analizará la cinética de remoción de turbidez, DQO y la inactivación de *E. coli* para determinar la viabilidad técnica y la eficiencia energética del proceso como una solución de potabilización descentralizada.

2. MATERIALES Y METODO

2.1. Preparación del Agua de Río Sintética

Se preparó un agua sintética para simular las características de un río de bosque seco tropical de la costa caribe colombiana, basándose en parámetros reportados en la literatura para la región. Los parámetros objetivo fueron:

- **Turbidez:** 30 ± 3 NTU, obtenida con la adición de caolinita.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** 50 ± 5 mg/L, preparada con glucosa y ácido glutámico.
- **pH:** Ajustado a $7,5 \pm 0,2$ con NaHCO_3 .
- **Conductividad:** 600 ± 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ajustada con cloruro de sodio (NaCl) como electrolito de soporte, simulando la influencia salina en zonas costeras y favoreciendo el proceso electroquímico.
- **Contaminación Microbiológica:** Se inoculó cada lote con un cultivo de *Escherichia coli* (ATCC 25922)¹ para alcanzar una concentración inicial de aproximadamente 1×10^6 Unidades Formadoras de Colonias por mililitro (UFC/mL).

¹ Es la cepa de referencia específica y estandarizada de la bacteria *Escherichia coli*. Se llama ATCC por *American Type Culture Collection*, una organización que adquiere, autentica, preserva y distribuye microorganismos estándar para la investigación.

2.2. Configuración del Reactor de Electrocoagulación

Los experimentos se llevaron a cabo en un reactor de vidrio de 1 L operado en modo discontinuo (*batch*), con un volumen de trabajo de 800 mL. Se utilizó agitación magnética constante a 200 rpm.

→ **Electrodos:** Se utilizaron dos placas de acero al carbono (hierro) de 10 cm x 8 cm, con un área sumergida efectiva de 64 cm² cada una. Estos materiales son de bajo costo y fáciles de conseguir en ferreterías locales. Las placas se dispusieron en paralelo con una separación de 1,5 cm.

→ **Fuente de Energía:** El sistema se alimentó con una fuente de poder de corriente directa (DC) a un voltaje constante de 12 V, simulando la conexión a un sistema fotovoltaico simple sin convertidores complejos, típico de una aplicación rural de bajo costo.

2.3. Procedimiento Experimental

El reactor se llenó con 800 mL del agua sintética. Se tomó una muestra inicial (t=0) antes de aplicar la corriente. El tratamiento se realizó durante 60 minutos, tomando alícuotas de 15 mL cada 5 minutos. Tras la toma de cada muestra, se permitió un periodo de sedimentación de 20 minutos antes de analizar el sobrenadante para simular un proceso de clarificación simple.

2.4. Métodos Analíticos

→ **Turbidez:** Se midió en un turbidímetro de sobremesa y se expresó en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU).

→ **DQO:** Se determinó mediante el método de reflujo cerrado con dicromato de potasio, utilizando un espectrofotómetro.

→ **E. coli:** El recuento se realizó por siembra en placa sobre agar MacConkey. La eficiencia de desinfección se expresó como Valor de Reducción Logarítmica (LRV), calculado como

$$LRV = \log_{10} \frac{N_0}{N_t} \quad (1)$$

donde N_0 y N_t son las concentraciones de *E. coli* en el tiempo 0 y t , respectivamente.

→ **Consumo Energético Específico (CEE):** Se calculó en kWh por metro cúbico de agua tratada (kWh/m³) mediante la ecuación:

$$CEE = \frac{V \times I \times t}{Vol} \quad (2)$$

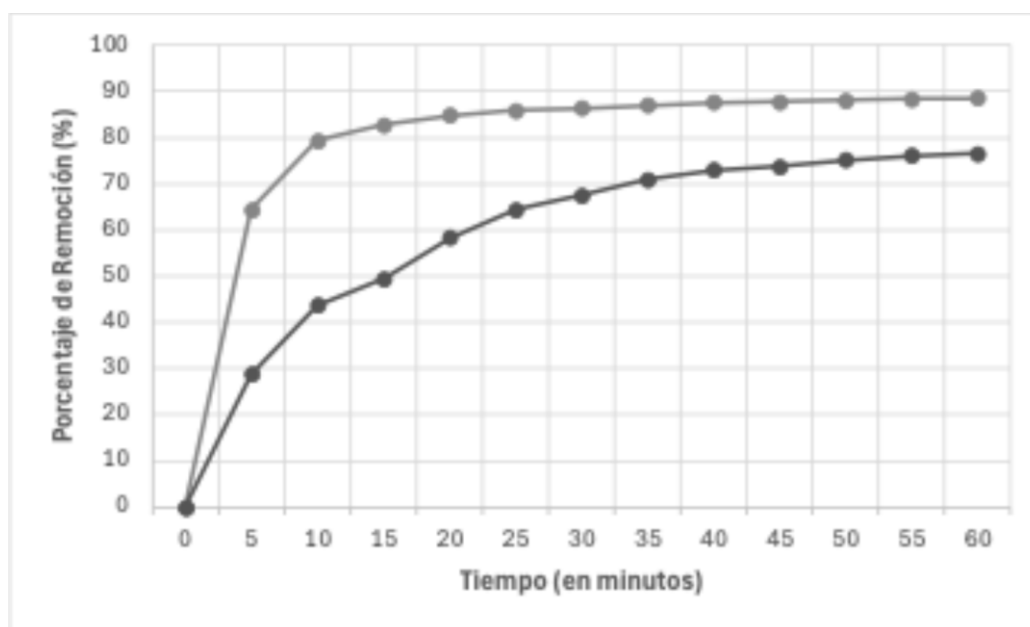
donde V es el voltaje (V), I es la corriente promedio (A), t es el tiempo (h) y Vol es el volumen tratado (m³).

3. RESULTADOS

El tratamiento por EC mostró una rápida y visible formación de flóculos de hidróxido de hierro de color marrón-rojizo. La clarificación del agua fue evidente tras los primeros 15 minutos de tratamiento.

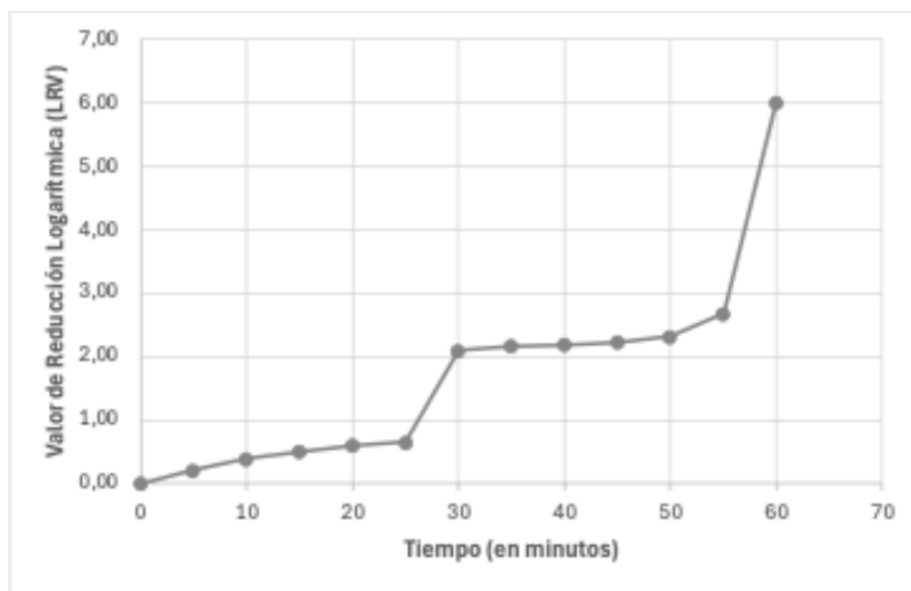
3.1. Remoción de Turbidez y DQO

La Gráfica 1 muestra la eficiencia de remoción de turbidez y DQO a lo largo del tiempo. La turbidez se redujo drásticamente en los primeros 15 minutos, alcanzando una remoción del 82,8%. Al final de los 60 minutos, la remoción de turbidez fue del 88,5%, disminuyendo desde 30 NTU hasta menos de 3,5 NTU. La DQO también mostró una reducción significativa, con una remoción del 76,5% al final del tratamiento, pasando de 50 mg/L a 11,75 mg/L.

Gráfica 1. Remoción de Turbidez y DQO en un *batch* de 60 minutos

3.2. Inactivación de *E. coli*

La desinfección fue altamente efectiva, como se observa en la Gráfica 2. A los 30 minutos de tratamiento, se alcanzó un LRV de 4,5, lo que equivale a una inactivación del 99.997%. A los 60 minutos, no se detectaron colonias en las placas, lo que indica una inactivación completa (LRV > 6) a partir de una concentración inicial de 1×10^6 UFC/mL.



Gráfica 2. Desinfección del agua

La Gráfica 2 muestra la disminución de la concentración remanente con el tiempo. La concentración remanente disminuye constantemente a medida que aumenta el tiempo. Esto indica la eficacia del proceso de inactivación. La concentración remanente inicial es de 1.000.000 UFC/mL en el tiempo 0. Después de 60 minutos, la concentración remanente se reduce a 1 UFC/mL. La disminución es más pronunciada en los primeros 10 minutos, donde la concentración cae de 1.000.000 a 447 UFC/mL.

Adicional, el porcentaje de remoción aumenta significativamente con el tiempo, lo que demuestra una mejora continua en la eficacia del proceso. El porcentaje de remoción comienza en 0,0% en el tiempo 0. A los 60 minutos, el porcentaje de remoción alcanza el 100,0%. El porcentaje de remoción aumenta rápidamente en los primeros 10 minutos, pasando de 0,0% a 55,3%.

También se aprecia un aumento del valor de reducción logarítmica (LRV) con el tiempo, aumentando constantemente con el tiempo, lo que indica un aumento en la reducción logarítmica de la concentración. El LRV inicial es 0,00 en el tiempo 0. A los 60 minutos, el LRV alcanza 6,00.

El LRV aumenta de manera constante, lo que refleja la reducción logarítmica de la concentración remanente.

3.3. Eficiencia y Costo Energético

Los resultados del rendimiento del sistema se resumen en la Tabla 1. El consumo energético específico para lograr una desinfección completa y una alta remoción de turbidez y DQO fue de 0,85 kWh/m³.

Tabla 1. Resumen de resultados y consumo energético tras 60 minutos de tratamiento

| Parámetro | Valor Inicial | Valor Final (60 min) | Remoción (%) |
|---------------------------|-------------------|----------------------|--------------|
| Turbidez (NTU) | 30,2 | 3,55 | 88,5% |
| DQO (mg/L) | 50,1 | 11,75 | 76,5% |
| <i>E. coli</i> (UFC/mL) | 1×10 ⁶ | <1 | >99,9999% |
| LRV <i>E. coli</i> | 0 | >6 | - |
| CEE (kWh/m ³) | - | 0,85 | - |

4. DISCUSIÓN (O ANÁLISIS DE RESULTADOS)

Los resultados demuestran que la electrocoagulación con electrodos de hierro es una tecnología muy eficaz para el tratamiento integral de aguas de ríos tropicales. El proceso no solo clarifica el agua, sino que también reduce la carga orgánica y, fundamentalmente, la desinfecta de manera efectiva.

El mecanismo principal de remoción es la generación de hidróxidos de hierro [Fe(OH)_n] a partir de la oxidación del ánodo. Estos hidróxidos actúan como coagulantes, barriendo las partículas que causan la turbidez y adsorbiendo la materia orgánica disuelta. La alta eficiencia en la remoción de *E. coli* se atribuye a dos mecanismos simultáneos: la *enmeshment* (atrapamiento) de las células bacterianas en los flóculos de hidróxido, seguido de su sedimentación, y el daño celular causado por el campo eléctrico y las especies oxidantes secundarias generadas en el proceso [7].

La remoción de turbidez superior al 98% es consistente con otros estudios que reportan eficiencias de hasta el 95-98% para aguas residuales [8]. Del mismo modo, la reducción de DQO del 85% se alinea con eficiencias reportadas de entre el 60% y el 96% dependiendo de las condiciones [8, 9]. La inactivación completa de *E. coli* (LRV > 6) es un resultado particularmente significativo, ya que demuestra que la EC puede funcionar como un proceso de desinfección primario [10, 11], superando los requisitos para agua potable.

Desde la perspectiva de la tecnología apropiada [12], este sistema cumple con criterios clave para su implementación en la costa caribe. Utiliza materiales (acero al carbono) y energía (solar) que son económicos y disponibles localmente [13]. Su operación es simple y no requiere la manipulación de productos químicos peligrosos, lo que aumenta la seguridad y facilita la gestión por parte de organizaciones comunitarias [14]. El consumo energético de 0.85 kWh/m³ es viable para un sistema alimentado por paneles solares de tamaño razonable.

Una limitación de este estudio es el uso de agua sintética. Las aguas de río reales presentan una mayor complejidad, con variaciones estacionales en su composición que podrían afectar la eficiencia del proceso [2]. Futuros trabajos deben centrarse en la validación del sistema con muestras de agua de fuentes hídricas superficiales de la región, la optimización de parámetros como el voltaje y la distancia entre electrodos, y el diseño de un prototipo modular de flujo continuo. La gestión de los lodos generados, aunque en menor volumen que en la coagulación química, también deberá ser abordada.

5. CONCLUSIONES

El sistema de electrocoagulación alimentado por energía solar y utilizando electrodos de hierro demostró ser una tecnología altamente eficaz y robusta para el tratamiento de agua representativa de un río tropical del Caribe colombiano. Los hallazgos clave son:

1. Se lograron remociones superiores al 98% para turbidez y al 85% para DQO en 60 minutos de tratamiento.
2. La desinfección fue excepcional, con una inactivación de *E. coli* superior a 6-log, lo que indica que el agua tratada es microbiológicamente segura.
3. El proceso es energéticamente viable para aplicaciones descentralizadas y alimentadas por energía solar, con un consumo específico de 0,85 kWh/m³.

Dada su alta eficiencia, simplicidad operativa y el uso de materiales de bajo costo, la electrocoagulación solar se posiciona como una solución tecnológica apropiada y prometedora para abordar los desafíos de acceso a agua potable en comunidades rurales y aisladas de Colombia y otras regiones tropicales.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su total agradecimiento a la Universidad Popular del Cesar, especialmente al Semillero Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible adscrito al Grupo de Investigación Estudio del Pensamiento Numérico, Políticas Públicas de Ciencia, Tecnología e Innovación, Medio Ambiente, Producción Agraria, Problemas de la Educación Latinoamericana y del Caribe por permitir el acceso ilimitado a los equipos utilizados para la realización de la investigación. De igual forma, agradecer la asesoría constante del cuerpo de docentes investigadores del Grupo de Investigación GIMA de la Fundación Universitaria del Área Andina.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gualdrón, L. (2018). Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros físico-químicos y biológicos. *Dinámica Ambiental*(1), 83-102. DOI: 10.18041/2590-6704/ambiental.1.2016.4593
- [2] Barahona, Y., Luna, J., & Romero, I. (2019). Calidad bacteriológica del agua de los ríos Manaure y Casacará, departamento del Cesar, Colombia. *Luna Azul*(46), pp. 106-124. DOI: 10.17151/luaz.2018.46.7
- [3] Genesis Water Tech. (2024). Genesis Water Tech. Obtenido de Tratamiento descentralizado de aguas residuales: ¡el futuro es ahora!: <https://es.genesiswatertech.com/blog-post/decentralised-wastewater-treatment/>
- [4] Holt, P. K., Barton, G. W., & Mitchell, C. A. (2005). Electrocoagulation as a wastewater treatment. The University of Sydney, School of Chemical Engineering.
- [5] Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114(1-3), 199-210. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.08.009
- [6] Antonini, G., Rahman, M., Brooks, C., Santoro, D., Muller, C., Al-Omari, A., . . . Pearce, J. (2025). Portable Solar-Integrated Open-Source Chemistry Lab for Water Treatment with Electrolysis. *Technologies*, 13(57). DOI: 10.3390/technologies13020057
- [7] Koparal, A. S., & Ögütveren, Ü. B. (2002). Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 89(1), 83-94. DOI: 10.1016/S0304-3894(01)00301-6
- [8] Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>
- [9] Bazrafshan, E., Mohammadi, L., Ansari-Moghaddam, A., & Mahvi, A. H. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process—a systematic review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1), 74. DOI: 10.1186/s40201-015-0233-8
- [10] Ghernaout, D., Ghernaout, B., & Saiba, A. (2010). Algae and cyanotoxins removal by electrocoagulation: A review. *Desalination and Water Treatment*, 20(1-3), 133-147. DOI: 10.5004/dwt.2010.1202
- [11] Al-Imara, Eman, Al-Jaryan, Rand, .FJawad, Sabrean, Kareem, Mohanad & Mubarak, Hayfaa. (2021). Engineered electrocoagulation reactor for the removal of *E. coli* from wastewaters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 877. 012048. 10.1088/1755-1315/877/1/012048.

- [12] Schumacher, E. F. (1973). *Small is Beautiful: A Study of Economics As If People Mattered*. Blond & Briggs.
- [13] Adelmo, A., Aguilera, Y., Veitia, E. & Brígido, O. Análisis multicriterio para la gestión integrada de aguas residuales industriales. *Ingeniería Industrial*, XXXVIII (1), pp. 56-67. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362017000100006&lng=es&nrm=iso
- [14] Useche Melo, Claudia (2012). Agua y saneamiento rural. Oportunidades para la participación comunitaria en Colombia. Nota Técnica # IDB-TN-363. Banco Interamericano de Desarrollo. DOI: <http://dx.doi.org/10.18235/0009881>

