

# Eliminación de Sólidos en Agua Pluvial captada mediante un Sistema de Electrocoagulación Energizado con paneles fotovoltaicos

## Removal of Solids in Rainwater captured through an Electrocoagulation System Powered with photovoltaic panels

*Maria Angeles Camacho Ruiz, Ernesto Villegas Márquez, Norma Guadalupe González Montoya, Elba González Aguayo, Celestino García Gómez<sup>a</sup>, Filiberto Briseño Aguilar e Itzel Celeste Romero Soto<sup>b</sup>*

### Resumen / Abstract

Los sólidos son contaminantes que llegan por arrastre a las ollas de almacenamiento durante la captación de agua pluvial. Estos contaminantes deben ser eliminados previamente a la aplicación de procesos de filtración y de pulido. En este trabajo, se evaluó un sistema de electrocoagulación alimentado con celdas fotovoltaicas en la remoción de sólidos. Se utilizó un reactor de acrílico con un volumen de operación de 800 ml y dos pares de electrodos; Al como ánodos y acero inoxidable como cátodos, con un área de superficie activa de 77.12 cm<sup>2</sup>. Dos variables experimentales: tiempo (40, 80 y 120 min) y distancia entre los electrodos (1 y 1.5 cm) sobre la remoción de sólidos totales fueron evaluadas. Los resultados destacan una remoción máxima de sólidos totales de 80.15 % a los 120 min con una distancia entre electrodos de 1 cm. Estas condiciones fueron establecidas como óptimas y se evaluaron a escala piloto, encontrando una eliminación del 90.12 % de sólidos. Los resultados resaltan la alta eficiencia bajo un tratamiento sostenible.

**Palabras clave:** agua pluvial, contaminantes, sólidos, sistema de electrocoagulación, sostenibilidad.

*Solids are contaminants that wash into storage pots during rainwater harvesting. These contaminants must be removed prior to the application of filtration and polishing processes. In this work, an electrocoagulation system powered by photovoltaic cells was evaluated in the removal of solids. An acrylic reactor with an operating volume of 800 ml and two pairs of electrodes was used; Al as anodes and stainless steel as cathodes, with an active surface area of 77.12 cm<sup>2</sup>. Two experimental variables: time (40, 80 and 120 min) and distance between electrodes (1 and 1.5 cm) on the removal of total solids were evaluated. The results highlight a maximum removal*

*a.* Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco I. Madero S/N, Ex Hacienda el Cañada, 66050, Cd Gral, Escobedo, NL, Mexico.

*b.* Los investigadores Camacho Ruiz, Villegas Márquez, González Montoya, González Aguayo, Briseño Aguilar y Romero Soto laboran en el Laboratorio de Investigación en Biotecnología, Centro Universitario del Norte, CUNorte, Universidad de Guadalajara, Colotlan, 46200, Jalisco, México. Itzel Celeste Romero Soto, autor responsable, teléfono +52 (644) 2 27 9829. Correo electrónico: itzel.romero@cunorte.udg.mx.

of total solids of 80.15 % at 120 min with a distance between electrodes of 1 cm. These conditions were established as optimal and were evaluated on a pilot scale, finding an elimination of 90.12 % of solids. The results highlight the high efficiency under sustainable treatment.

**Keywords:** rainwater, pollutants, solids, electrocoagulation system, sustainability.

## 1. Introducción

En México, los sectores con mayor demanda de agua son la agricultura, que consume el 76%, seguida por la industria y las termoeléctricas con un 14%, y finalmente el uso doméstico con un 10% (SEMARNAT, 2017; CONAGUA, 2019). La elevada demanda de este recurso, junto con el aumento de su escasez, ha hecho indispensable la exploración de nuevas alternativas para incrementar su disponibilidad. En este contexto, en las zonas semidesérticas, una estrategia viable es aprovechar la temporada de lluvias para captar y almacenar agua, con el fin de utilizarla durante los meses de mayor sequía. La precipitación pluvial en estas regiones generalmente promedia 400 mm anuales, y se localizan principalmente en el norte y noroeste del país (SEMARNAT, 2015; SMN, 2023).

Algunas comunidades han adoptado la captación directa desde los techos para minimizar la contaminación. No obstante, otras han construido ollas de captación, muchas de las cuales carecen de la estructura y diseño adecuado, resultando en una sobrecarga de contaminantes durante el escurrimiento. Las impurezas que se acumulan en los vasos reguladores suelen ser de naturaleza química, biológica y física, destacándose principalmente los sólidos (Fabregas, 2023). La presencia de estos contaminantes limita el uso directo del agua en actividades agropecuarias y domésticas, ya que obstruyen bombas y filtros, requiriendo un tratamiento previo.

Los métodos convencionales para la eliminación de sólidos incluyen la coagulación/floculación química, que demanda la adición de agentes químicos y una agitación constante para la formación de flóculos, lo que incrementa sus costos (Mollah et al., 2001). Otra alternativa es la electrocoagulación (EC) un tratamiento avanzado que utiliza altas cargas de energía para generar un coagulante mediante una reacción química con el cual atrapa a los contaminantes como sólidos, metales, bacterias, etc. (Hakizimana et al., 2017). La reacción que se genera depende del material del ánodo, puede ser de Al ( $\text{Al(OH)}$ ,  $\text{Al(OH)}_2$ ,  $\text{Al(OH)}_3$ ) y Fe ( $\text{Fe(OH)}$ ,  $\text{Fe(OH)}_2$ ,  $\text{Fe(OH)}_3$ ) (Mouedhen, et al., 2008; Sasson, Calmano & Adin, 2008). El ánodo funciona como electrode de sacrificio, mientras que en el cátodo se hidroliza el agua para formar  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ . Las ventajas que presenta EC frente a una coagulación convencional son la baja cantidad de lodos que se generan y, además, estos suelen ser menos tóxicos, lo cual facilita su reúso como absorbente (Moghaddam, Moghaddam & Arami, 2010). Para operar este sistema de manera sostenible, se pueden incorporar paneles fotovoltaicos que suministren la energía necesaria. Esta opción es viable en zonas con alta radiación

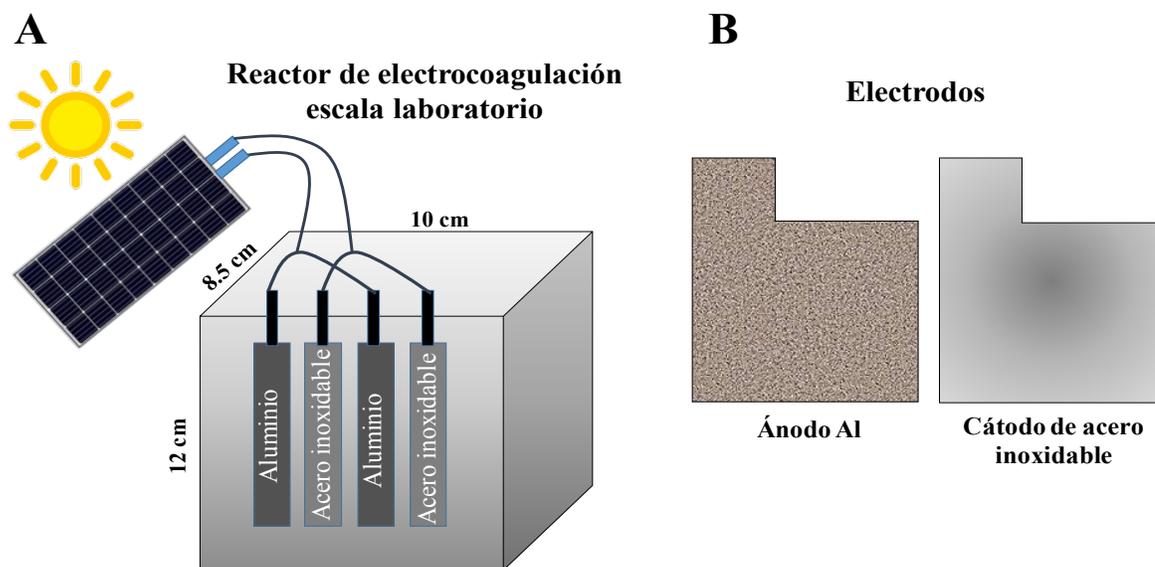
solar, considerando solo los costos iniciales de inversión y la sustitución periódica de los ánodos de sacrificio. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la eliminación de sólidos del agua pluvial captada en un vaso regulador mediante electrocoagulación, utilizando paneles fotovoltaicos como fuente de energía.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Unidad experimental

Para el primer diseño a escala laboratorio, se empleó una celda de acrílico de configuración cuadrangular con dimensiones de 12 cm por 8.5 cm por 10 cm, y capacidad de 1 L. El volumen de operación fué de 800 ml. Se utilizó un par de electrodos en forma de placas planas con un área de superficie activa de 77.12 cm<sup>2</sup>. Como ánodo se usó Al y como cátodo acero inoxidable. En este reactor, se utilizó un módulo solar policristalino de Microm electrónica modelo CX 50 con medidas de 52.3 cm de ancho y 81.5 cm de largo, formado por 36 celdas fotovoltaicas. Con una potencia nominal de 50 Watts, corriente de corto a 3.80 A y una corriente a potencia máxima de 3.45 A (Figura 1).

Figura 1. A) Reactor de electrocoagulación escala laboratorio conectado a un panel fotovoltaico para el abastecimiento de su requerimiento energético. B) configuración de electrodos utilizados en el reactor cuadrangular: ánodos de aluminio y cátodos de acero inoxidable

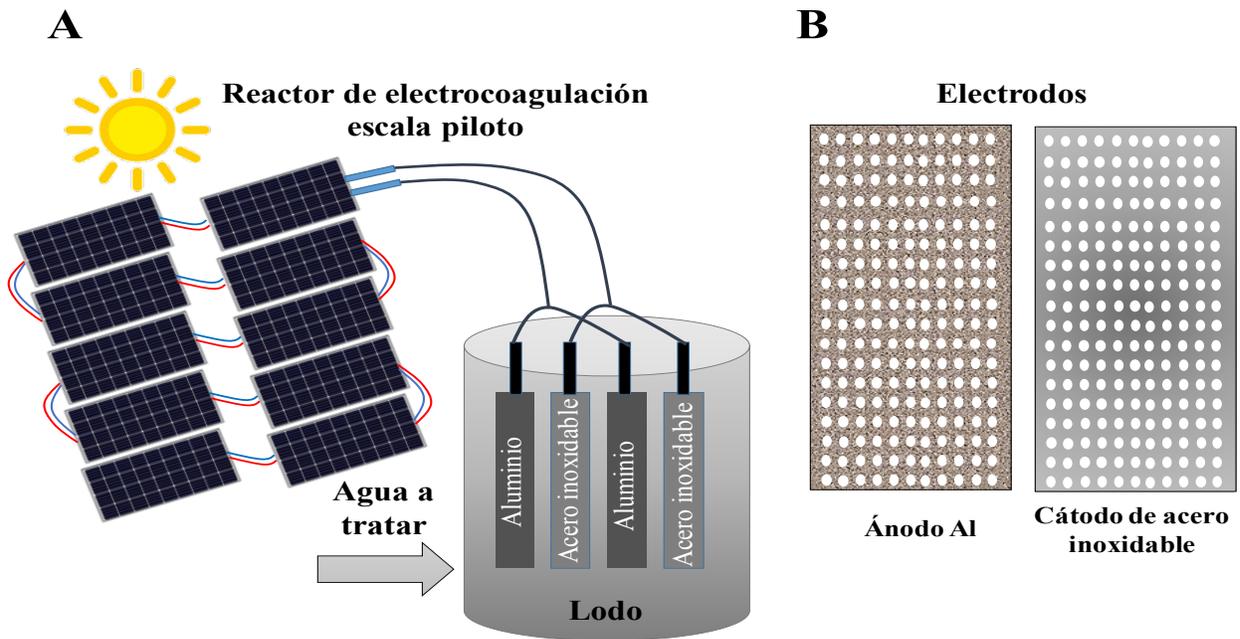


Fuente:

Para las pruebas a escala piloto bajo condiciones óptimas se utilizó un recipiente cilíndrico de plástico de 57.5 cm de diámetro y 91.4 cm de altura con un volumen de operación de 200 L. Se

utilizaron dos pares de electrodos (ánodos de Al y cátodos de acero inoxidable) en forma de láminas planas con perforaciones y un área de superficie activa de 4500 cm<sup>2</sup> para cada uno (Figura 2).

Figura 2. A) Reactor de electrocoagulación escala piloto conectado a 10 panel fotovoltaicos conectados en serie. B) Electrodo de malla utilizados en el reactor cilindrico: ánodos de aluminio y cátodos de acero inoxidable.



Fuente:

## 2.2 Solución experimental

Para la experimentación, se recolectó agua pluvial almacenada en el vaso regulador del Centro Universitario del Norte (CUNorte), de la Universidad de Guadalajara. El muestreo se realizó cumpliendo con la NOM-230-SSA1-2002. Se recolectó y almacenó un volumen suficiente para el desarrollo del diseño experimental, utilizándose el agua cruda sin dilución y sin la adición de ningún agente químico en cada experimento.

## 2.3 Condiciones de operación

Durante la experimentación, se colocó el reactor de acrílico con 800 ml del agua pluvial previamente recolectada de la olla de captación y homogenizada con dos pares de electrodos separados de acuerdo al diseño experimental (1 cm y 1.5 cm). Los electrodos se colocaron en serie y de forma directa al panel fotovoltaico. El sistema se operó en batch sin agitación. La medición del amperaje se realizó continuamente durante las corridas experimentales con un multímetro digital Tulumex modelo 16-101, manteniéndose una intensidad constante de 3.4 A.

El diseño experimental a nivel laboratorio, se optimizó y evaluó en un reactor cilindrico a escala piloto con un volumen de operación de 200 L. En este sistema tambien se utilizó agua pluvial recolectada del vaso regulador del CUNorte y se operó con dos pares de electrodos con una distancia de 1 cm entre ellos de manera cerrada. 10 paneles solares conectados en serie con las mismas características del reactor a nivel laboratorio fueron utilizados y la intensidad de corriente se monitoreo de manera constante, manteniendo un promedio de 26.5 A. Ambos experimentos se realizaron a las horas de luz solar de mayor intensidad (de las 10:55-13:10 h).

Una vez transcurrido el tiempo de cada corrida, se dejó reposar cada experiment durante 20 min para dar tiempo a la sedimentación del coagulante con los sólidos atrapados. De la parte clarificada se recolectaron 50 ml de muestra para el analisis del contaminante.

## 2.4 Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial, donde se evaluaron dos variables experimentales: el tiempo en 3 niveles: 40 min, 80 min y 120 min y la distancia entre electrodos en 2 niveles: 1 cm y 1.5 cm, dando un total de 6 experimentos (Tabla 1). Todos los ensayos se realizaron por triplicado. En el análisis de datos se empleo el software Minitab 17®. Para la optimización, se priorizó la remoción de sólidos, sin restricciones para las variables evaluadas.

## 2.5 Análisis de muestra

La Determinación de sólidos totales se realizó en base a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015. El porcentaje de eliminación de sólidos se determinó en base a la ecuación 1.

$$R (\%) = \frac{C_f - C_i}{C_f} \times 100 \quad (Ec. 1)$$

Donde:

$R (\%)$  = porcentaje de remoción de sólidos

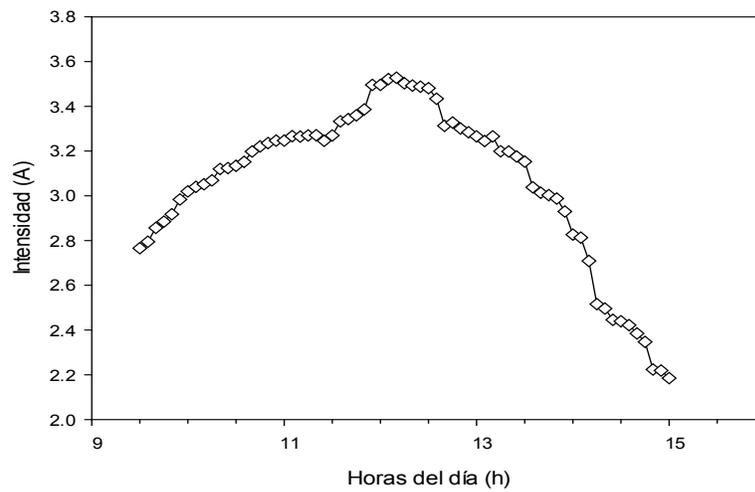
$C_f$  = concentración final de sólidos después del tratamiento

$C_i$  = concentración inicial de sólidos en el agua pluvial a tratar

## 3. Resultados y discusión

Antes de iniciar las corridas experimentales, se monitoreo el aporte energetico de un panel fotovoltaico conectado al reactor de electrocoagulación a partir de las 9:30 horas hasta las 13 h. La medición se realizó cada 5 min con el fin de determinar la hora más conveniente de operación del Sistema. De acuerdo a Kielar (2023), las horas de mayor radiación oscilan entre las 11-16 horas, pero esto varía en cada lugar. En México, Limón- Portillo (2017) afirma que las horas las hora pico promedio oscilan entre 3 y 7 horas al día. De acuerdo al monitoreo realizado las horas de luz solar de mayor intensidad fueron de las 10:55-13:10 h (figura 3).

Figura 3. Monitorización del aporte energético de un panel fotovoltaico en el sistema de electrocoagulación



Fuente:

### 3.1 Unidad a nivel laboratorio

Durante la experimentación a nivel laboratorio, la eliminación máxima de sólidos alcanzada en el agua pluvial tratada fué  $80.15 \pm 2.2$  % bajo las condiciones de 1 cm de distancia entre electrodos a 120 min (table 1). En las corridas, se observó que al incrementar la distancia entre los electrodos la remoción disminuye, lo cual concuerda con lo encontrado por Zhang et al., (2013), quien reveló que al ampliar la distancia aumenta la resistencia y esto hace que disminuya la eficiencia en el sistema. Boinpally et al. (2023) también demostró en su trabajo que la distancia y el tiempo experimental son variables de gran importancia en el rendimiento del tratamiento. Bazrafshan et al., (2015) señaló que el agua con baja conductividad requiere menor distancia entre los electrodos, así mismo, cuando la conductividad es mayor la distancia también puede ser mayor y aun así alcanzar altas eliminaciones de contaminantes, esto es por que a mayor conductividad, la resistencia se reduce (Martínez-Villafañe, Montero-Ocampo & García-Lara, 2009).

Tabla 1. Porcentajes de eliminación de sólidos en el sistema de electrocoagulación

Tiempo (min)	Distancia (cm)	Remoción (%)
40	1	$47.27 \pm 1.3$
80	1	$56.36 \pm 0.9$
120	1	$80.15 \pm 2.2$
40	1.5	$21.82 \pm 5.3$
80	1.5	$32.73 \pm 3.4$
120	1.5	$59.70 \pm 1.7$

Fuente:

El análisis estadístico muestra una  $R^2$  de 99.70, lo cual indica un buen ajuste del diseño. Asimismo, en la tabla 2 se observa el análisis de varianza, donde se destaca un valor de  $P < 0.05$  para ambas variables evaluadas, lo cual las hace significativas para el experimento.

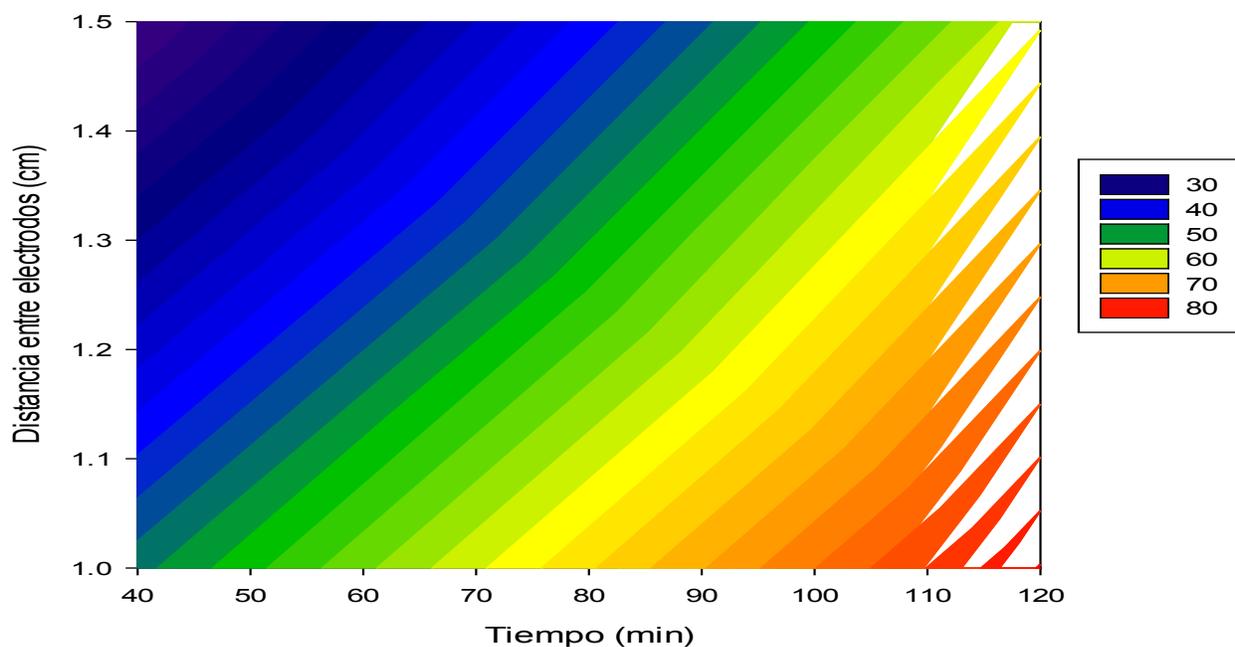
Tabla 2. Análisis de varianza del diseño experimental

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo	2	1330.59	665.296	207.77	0.005
Distancia	1	805.74	805.737	251.63	0.004
Error	2	6.40	3.202		
Total	5	2142.73			

Fuente:

Dando seguimiento a los resultados, en la figura 4 se muestra la gráfica de efectos del tiempo y la distancia entre los electrodos sobre la remoción de sólidos en el agua tratada. En la imagen se observa que a mayor tiempo y menor distancia se incrementa la eliminación de sólidos por encima del 70% como en los resultados obtenidos.

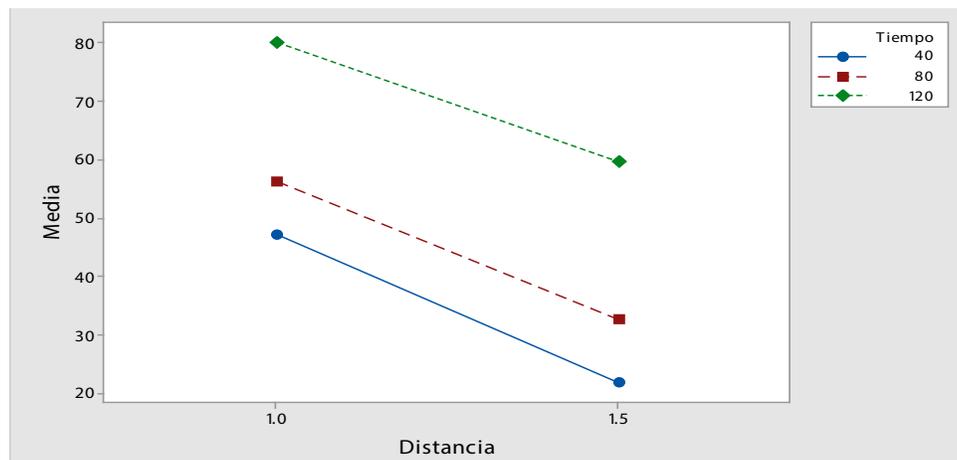
Figura 4. Gráfica de contornos del tiempo y la distancia entre electrodos sobre la remoción de sólidos en agua pluvial captada



Fuente:

El efecto del tiempo en ambas distancias evaluadas se muestran en la figura 5. En los distintos tiempos analizados a la distancia de 1 cm se obtuvieron las eliminaciones de sólidos más altas.

Figura 5. Grafica de interacciones entre variables evaluadas en el diseño experimental. De **o** el tiempo a los 40 min, **■** a los 80 min y **◆** a los 120 min



Fuente:

La optimización del sistema destacó las siguientes condiciones para ser evaluadas en el reactor de electrocoagulación a escala piloto: distancia entre electrodos de 1 cm y tiempo experimental de 120 min para alcanzar una eliminación de sólidos de 80.15 %.

### 3.2 Unidad piloto

Las variables mas importantes a considerar para realizar el escalamiento de este sistema son la relación volumen y densidad de corriente (Hakizimana et al., 2017), sin embargo, para que la operación del método sea sostenible es necesario operarlo por debajo de los 20 mA/cm<sup>2</sup> (Bayramoglu et al., 2004).

En el reactor a escala piloto se realizaron algunos ajustes para mejorar el funcionamiento del sistema y reducir el gasto de energía. En los electrodos se hicieron perforaciones para incrementar la transferencia de masa y, además se redujo la relación de intensidad/ área de superficie activa expresada como densidad de corriente de 44.08 mA/cm<sup>2</sup> que fué la que se usó en el reactor escala laboratorio a 5.88 mA/cm<sup>2</sup>. Los resultados en este reactor fueron más favorable que en reactor pequeño, alcanzando un eliminación del 91.2 % de sólidos bajo condiciones óptimas, mismas donde se esperaba una remoción teórica de 80.15%. En la tabla 3 se muestra la caracterización que se le realice al agua antes y después del tratamiento. Así mismo, en la figura 6, se observa el agua pluvial captada antes y después de la aplicación del sistema de electrocoagulación.

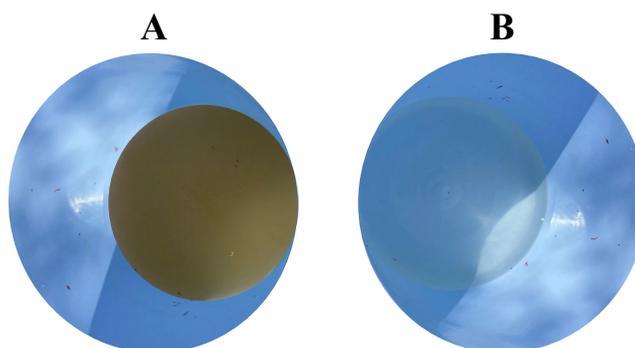
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del agua pluvial captada antes y después del tratamiento

Parámetro	Agua antes del tratamiento (mg/L)	Agua tratada (mg/L)	Remoción (%)
DQO total	1130±12	104	90.8%

Sólidos totales	830±50	73	91.2%
Sólidos suspendidos	180±35	12	93.3%
Sólidos disueltos	650±20	68	89.53%
Nitritos (N-NO <sub>2</sub> )	61.83±2	12.3	80.10%
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> )	7.14±0.6	1.1	84.59%

Fuente:

Figura 6. A) Agua pluvial captada en presencia de altas concentraciones de sólidos y antes del tratamiento. B) Agua pluvial después de la aplicación del sistema de electrocoagulación a escala piloto



Fuente:

## Conclusión

La aplicación del sistema de electrocoagulación usando paneles fotovoltaicos para la eliminación de sólidos y otros contaminantes constituye una forma sostenible para el tratamiento de agua. En este trabajo se logró alcanzar altas remociones de sólidos aplicando 120 min de tratamiento y una distancia entre electrodos de 1 cm en un reactor de 200 L empleando 10 paneles fotovoltaicos. Estos resultados resaltan la posible aplicación a gran escala de esta tecnología en zonas con alta radiación solar y con bajos recursos, pues constituye una alternativa fiable y sustentable ya que permite disminuir costos y emisiones al medio ambiente.

## Referencias bibliográficas

- Bayramoglu, M.; Kobyay, M.; Can, O. T.; Sozbir, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater, *Sep. Purif. Technol.* 37. Pp 117–125.
- Bazrafshan, E.; Mohammadi, L.; Ansari-moghaddam, A.; Mahvi, A. H. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process – a systematic review, *J Envi-*

- ron Heal Sci Eng, <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0233-8>.
- Boinpally, S.; Kolla, A.; Kainthola, J.; Kodali, R.; Vemuri, J. (2023) A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle* 4. Pp 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019). Estadísticas del Agua en México 2019. [https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM\\_2019.pdf](https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf)
- Fabregas, J. (2023). Eliminación de sólidos en suspensión de las aguas residuales industriales. <https://sigmadafclarifiers.com/eliminacion-de-solidos-suspendidos-totales-del-agua-residual/>
- Hakizimana, J. N; Bouchaib G. A. F.; Mohammed, C.; Stiriba, Y.; Vial, C.; Drogui, P.; Naja, J. F. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*. 404. Pp 1-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>
- Hanna Kielar, H (2023). Peak Sun Hours & Solar Energy. <https://www.greenlancer.com/post/peak-sun-hours>
- Limón-Portillo A (2017). Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento. <https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>
- Martínez-Villafañe, J. F.; Montero-Ocampo, C.; García-Lara, A. M. (2009). Energy and electrode consumption analysis of electrocoagulation for the removal of arsenic from underground water, *J. Hazard. Mater.* 172. Pp1617–1622.
- Moghaddam, S. S.; Moghaddam, M. R. A. & Arami, M. (2010). Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: optimization through response surface methodology, *J. Hazard. Mater.* 175. Pp 651–657.
- Mollah, M.Y.A.; Schennach, R.; Parga, J. R.; Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)-science and applications, *J. Hazard. Mater.* Pp 29–41.
- Mouedhen, G., Feki, M., De Petris W. M., Ayedi, H. F. (2008). Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process, *Journal of Hazardous Materials*. 150 (1). Pp 124-135. ISSN 0304-3894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.090>.
- NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
- Sasson, M. B.; Calmano, W. & Adin, A. (2009). Iron-oxidation processes in an electroflocculation (electrocoagulation) cell, *J. Hazard. Mater.* 171. Pp704–709.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2015). Precipitación Media Anual. <https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atmosfera.html>
- SEMARNAT (2017). Informe del Medio Ambiente. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2023). Precipitación Acumulada Mensual (mm). <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/precipitacion-form>
- 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, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 117. Pp 73–80.