

Electrocoagulación para el tratamiento de agua de embalses artificiales

Electrocoagulation for the treatment of water from artificial reservoirs

Carlos Gómez Rodríguez¹, Jessica Hernández Delgado¹, Giovanna Lorena Ibarra Meléndez¹, Hugo César Ramírez Patlán², Elizabeth del Rosario Salas Sandoval¹, Noemi Guadalupe Vázquez Navarro³, Tzayam Pérez Segura¹

¹Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Sede Noria Alta, Guanajuato, Gto., 36050, México.

²Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Guanajuato, Sede Belén, Guanajuato, Gto., 36000, México.

³Departamento de Química, Universidad de Guanajuato, Sede Noria Alta, Guanajuato, Gto., 36050, México.

c.gomezrodriguez@ugto.mx¹, j.hernandez.delgado@ugto.mx¹, gl.ibarramelendez@ugto.mx¹, hc.ramirezpatlan@ugto.mx², edr.salassandoval@ugto.mx¹, ng.vazqueznavarro@ugto.mx³, t.perezsegura@ugto.mx¹

Resumen

Dados los problemas de abastecimiento de agua en las zonas urbanas y la importancia de la captación de este vital recurso en presas y embalses artificiales, se realizó un muestreo de las presas de “La Purísima” y “Burrone” ubicadas en la ciudad de Guanajuato. Con las cuales se llevaron a cabo pruebas de tratabilidad que consistieron en una caracterización experimental de la calidad del agua antes y después de aplicar un proceso de electrocoagulación en un reactor a escala pre-piloto ubicado en el laboratorio de tratamiento de aguas en la Sede Pueblito de Rocha de la Universidad de Guanajuato. Se analizó la influencia de la velocidad de flujo y la densidad de corriente empleada para la remoción de los sólidos disueltos, suspendidos y totales durante el tiempo de operación. Con lo anterior, se pudo determinar una disminución hasta del 90% de la cantidad de contaminantes y turbidez; además, se realizó un cálculo de costos de operación cuyos resultados muestran que el proceso de electrocoagulación es eficaz y una alternativa viable.

Palabras clave: electrocoagulación, presas de Guanajuato, potabilización, remoción de sólidos.

Introducción

El creciente desarrollo socioeconómico y el aumento de la población junto con la distribución desigual de los recursos hídricos representan las principales causas de escasez y desabastecimiento de agua en los sectores urbanos. Por tales motivos se han desarrollado tecnologías para asegurar el suministro y almacenamiento de agua donde las presas y la construcción de embalses artificiales juegan un papel importante. Los procesos de potabilización de agua tienen su origen desde su captación y comprenden distintas etapas para poder ser utilizada por el ser humano sin riesgos a la salud, entre los cuales se identifican los pretratamientos, tratamientos primarios, secundarios y terciarios¹. Por lo que las plantas convencionales de tratamiento de aguas emplean una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos para disminuir los niveles de sólidos, así como una gran variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas².

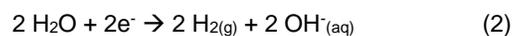
De manera general, en los pretratamientos se busca la remoción de sólidos de gran tamaño mientras que en los tratamientos primarios se utilizan tanques de sedimentación y flotación. En cuanto a los tratamientos secundarios se busca reducir los sólidos en suspensión y la demanda química de oxígeno. Por otro lado, en el tratamiento terciario o avanzado se desea eliminar los materiales disueltos tales como el color, metales y otros compuestos orgánicos¹. Ahora bien, dentro de los procesos secundarios más comunes se encuentran

¹ Tripathi, S. & Hussain, T. (2022). Chapter 7 – Water and Wastewater Treatment through Ozone-based technologies. *Development in Wastewater Treatment Research and Processes*, 139-172.

² Al-Hazmi, H. E., Mohammadi, A., Hejra, A., Majtacz, J., Esmaeili, A., Habibzadeh, S., Saeb, M. R., Badawi, M., Lima, E. C. & Makinia, J. (2023). Wastewater treatment for reuse in agriculture: Prospects and challenges. *Environmental Research*, 116711.

aqueños en los que ocurre una clarificación del agua por medio de la floculación con un agente coagulante³ en el que también se ajusta el pH con la adición de ácidos o bases. Sin embargo, existen varias desventajas como la gran generación de lodos residuales y el alto costo de operación.

En los últimos años se han utilizado tecnologías de tratamiento electroquímico como la electrocoagulación que representa una alternativa al proceso convencional de coagulación-floculación, debido a que no produce tantos lodos con respecto a la coagulación química y no se agrega una gran cantidad de reactivos químicos para su operación. En éste se pretende electrogenerar el agente coagulante *in-situ*, reduciendo así el costo del proceso. Los iones electrogenerados en los electrodos de trabajo corresponden a Al^{3+} y OH^- , los coagulantes se trasladan al seno de la solución y presentan una serie de reacciones de hidrólisis en las que se forman especies monoméricas y poliméricas para dar lugar a los flóculos de hidróxido metálico⁴ dentro de la muestra de agua a tratar. De esta forma, ocurre la adsorción de las partículas coloidales que se eliminan a través de una sedimentación posterior. Por lo tanto, implica la disolución del ánodo de sacrificio dada la aplicación de una diferencia de potencial a través de los electrodos que comúnmente son de aluminio o hierro. A continuación, se presentan las reacciones más representativas de dicho proceso:



Debido a lo anterior, el presente trabajo tiene como fin realizar pruebas de tratabilidad de diferentes muestras de agua provenientes de embalses artificiales del municipio de Guanajuato para determinar la viabilidad técnica del proceso de electrocoagulación como una alternativa a el proceso convencional de coagulación-floculación. Se analizaron las concentraciones de sólidos totales, suspendidos y disueltos, así como la medición de parámetros como el pH y la turbidez durante un cierto tiempo de operación. Se estudió el efecto de la densidad de corriente y, a su vez, se determinó el consumo energético, así como los costos de operación en función del aluminio consumido y la energía eléctrica gastada.

Metodología

Descripción de las muestras y metodología del muestreo

El proyecto comenzó con el muestreo en diferentes puntos de las presas analizadas, las cuales fueron “La Purísima” ubicada en la comunidad de Molineros y “Burrones” que se encuentra cerca de Lomas de Marfil II en la ciudad de Guanajuato, con la finalidad de obtener una variabilidad de resultados y observaciones. Se utilizaron guantes de látex para la higiene durante el proceso de toma de muestras y se localizaron tres puntos diferentes de muestreo para la presa de “La Purísima” y dos puntos distintos en el caso de la presa de “Burrones”, tal como se observa en la Figura 1. Se emplearon cubetas para la recolección del agua junto con embudos para facilitar el llenado de 6 bidones con una capacidad de 20 litros, aproximadamente; por lo que en cada punto de muestreo seleccionado de cada presa se almacenaron 2 bidones de agua a temperatura ambiente para su posterior análisis.

En la Tabla 1 se reporta la caracterización de cada una de las muestras iniciales utilizadas en el proceso de tratamiento por electrocoagulación donde se midieron las cantidades de sólidos totales obtenidos de la suma de los sólidos suspendidos y disueltos; además de la turbidez que se pudo medir tanto de forma cuantitativa como cualitativa debido a que el color de cada muestra de agua variaba en tonalidades café/verde.

³ Ferone, C., Capasso, I., Bonati, A., Roviello, G., Montagnaro, F., Santoro, L., Turco, R. & Cioffi, R. (2019). Sustainable management of water potabilization sludge by means of geopolymers production. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1-9.

⁴ Villalobos-Lara, A. D., Álvarez, F., Gamiño-Arroyo, Z., Navarro, R., Peralta-Hernández, J. M., Fuentes, R. & Pérez, T. (2021). Electrocoagulation treatment of industrial tannery wastewater employing a modified rotating cylinder electrode reactor. *Chemosphere*, 264, 128491.

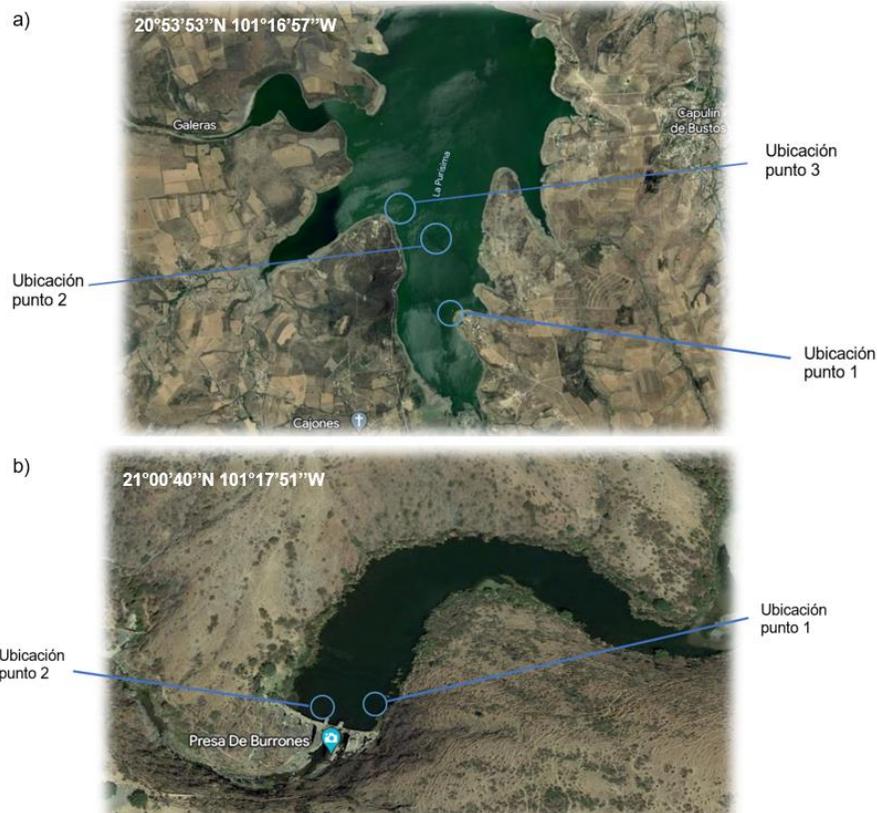


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo: a) presa "La Purísima" y b) presa de "Burrones".

Tabla 1. Caracterización de las muestras obtenidas de las presas de a) "La Purísima" y b) "Burrones".

Presas	Muestra	Sólidos totales	Sólidos suspendidos	Sólidos disueltos	Turbidez
a) La Purísima	Muestra 1	738	194	544	19
	Muestra 2	562.22	226.66	335.56	13
	Muestra 3	369.11	126.67	242.44	16
b) Burrones	Muestra 1	582.44	140	442.44	18
	Muestra 2	562.64	106.86	455.78	5
	Muestra 3	589.14	106.7	482.44	3

Descripción del sistema electroquímico

El reactor de electrocoagulación se compone de dos tanques de sedimentación que están conectados a un reactor de cilindro rotatorio (RCE). Cuenta con 6 placas de aluminio como ánodos, las cuales se distribuyen de manera equidistante en la superficie del reactor, formando un ángulo de 60° entre sí. Los electrodos están conectados a la pared del reactor para su funcionamiento, lo cual se puede observar en la Figura 2, y su operación se da en modo continuo con flujo ascendente en recirculación por lotes.

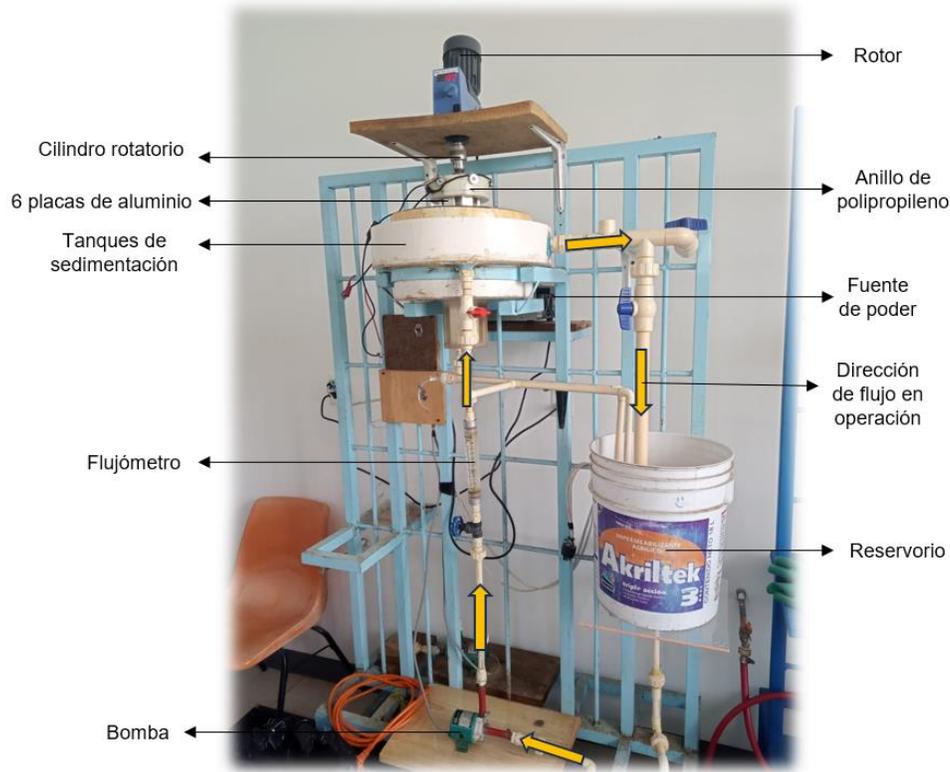


Figura 2. Sistema de electrocoagulación.

Técnicas analíticas y metodología experimental

Antes de cada prueba fue necesario realizar el armado del sistema experimental, primero se configuró el ánodo para lo cual se lijaron las 6 placas de aluminio necesarias y se insertaron alrededor de un anillo de polipropileno con tuercas que están conectadas entre sí. Luego, se conectó a la fuente de poder mediante un alambre de cobre colocado en una de las tuercas. En la parte superior del reactor se instaló el cilindro rotatorio que funciona como cátodo del sistema y agitador de la mezcla a tratar; de igual manera, se conectó a la fuente de poder empleando otro alambre de cobre para asegurar la conductividad de la corriente necesaria para el arranque de cada experimento.

Se aseguró que todas las partes del reactor como los tanques de sedimentación estuvieran bien colocadas y que las tuberías de entradas y salidas del reactor estuvieran cerradas. En seguida, se introdujo la muestra de agua a tratar y fue necesario enchufar el rotor del agitador, establecer la corriente que debía proporcionar la fuente de poder y activar la bomba para flujo de agua. Se probaron tres diferentes densidades de corrientes a 3.5 mA/cm^2 , 5.25 mA/cm^2 y 7 mA/cm^2 con un flujo constante de agua igual a 3 L/min . Se comprobó si la fuente de poder sería capaz de proporcionar la densidad de corriente para dicho proceso, y de no alcanzar el valor de corriente deseado, se agregó cloruro de sodio (NaCl) con una concentración entre 0.01 M a 0.05 M para aumentar la conductividad del agua. También, se realizó una revisión del pH y la turbidez con la muestra inicial de agua para poder realizar la comparación de resultados.

Con estas consideraciones previas se comenzó la operación del sistema extrayendo 200 ml de muestra en el tiempo 0 y, posteriormente, cada 15 minutos hasta alcanzar los 90 minutos de tiempo. Con cada nueva muestra puntual del experimento se midió el pH y la turbidez usando un potenciómetro. Después, se realizó una filtración al vacío con 100 ml de agua de cada muestra individual para la medición de los sólidos disueltos y suspendidos con mayor precisión. Por lo tanto, se requirió agregar 15 ml de las muestras filtradas en cápsulas de porcelana para poder seguir el método enunciado en la norma $\text{NMX-AA-034-SCFI-2015}$. Al

finalizar el secado, enfriado y pesado de las cápsulas de porcelana con muestra, se realizó el cálculo de los sólidos suspendidos con la diferencia de los sólidos totales y disueltos.

Resultados y discusión

Durante el proceso experimental ya descrito en la sección anterior fue necesario mantener una estabilidad de los valores de la corriente; por lo que en ocasiones se agregaron concentraciones de cloruro de sodio desde 0.005 M hasta 0.01M y dentro del cálculo se restaron a los sólidos totales que se midieron en el laboratorio.

En las Figuras 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos del tratamiento de agua de las presas de “La Purísima” y “Burrone”, respectivamente. El aumento del pH conforme avanza la reacción se debe a la formación de iones hidróxido que se generan continuamente a partir de la hidrólisis en el cátodo. Un valor óptimo de trabajo y para evitar que los electrodos se pasiven es mantener el pH entre 6 y 8, dado que se alarga la vida útil de los electrodos porque se evita la formación de óxido de aluminio. Los sólidos totales fueron removidos en un 90% con la densidad de corriente de 7 mA/cm² que fue la de mayor intensidad, comparado con las otras dos de menor densidad que sólo fueron capaces de remover un 60%. Los sólidos disueltos fueron removidos en un 90% con la densidad de corriente mayor (7 mA/cm²), lo cual genera muy buenas expectativas con este tratamiento, debido a que este procedimiento es muy caro en las estaciones de purificación del agua. La naturaleza de los sólidos suspendidos es muy diversa, dado que es un embalse a cielo abierto; además de ser la receptora de las aguas residuales del municipio. Las propiedades fisicoquímicas de los coloides son desconocidas y pueden no ser afines a los hidróxidos de aluminio generados en el reactor a densidad de 5.25 mA/cm². Sin embargo, en un análisis más profundo se deberían repetir las pruebas para corroborar estos datos.

Por otro lado, en el caso de la presa de “Burrone” se observa la tendencia del aumento de pH en un intervalo de 7 a 8. Se logró una reducción del 50% de sólidos totales con la densidad de corriente de 7 mA/cm²; sin embargo, con 3.5 mA/cm² se redujo al 40%. Por lo que es una buena opción para el ahorro de energía que es lo más costoso en este tratamiento de potabilización. Los sólidos disueltos son coloides que por sus propiedades pueden no ser tan afines a los flóculos producidos en el reactor, de manera que solamente se redujeron en un 40%, teniendo resultados similares con la mínima densidad de corriente. Por tales razones, este método puede ser acompañado con alguna otra técnica convencional como la coagulación-floculación para lograr mejores resultados. Esta técnica nos permite observar una reducción del 90% de los sólidos suspendidos, con resultados similares para las tres densidades de corriente; por lo tanto, se espera que se pueda utilizar la menor densidad de corriente para economizar energía eléctrica en el tratamiento del agua.

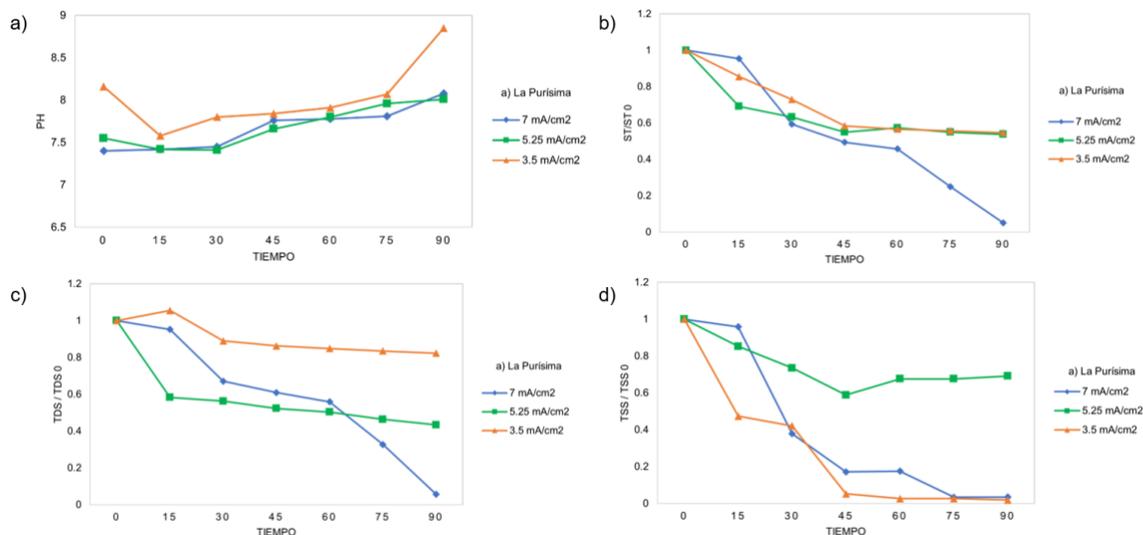


Figura 3. Resultados de agua de la presa de “La Purísima”: a) variación del pH, b) sólidos totales normalizados, c) sólidos disueltos normalizados, d) sólidos suspendidos normalizados, con respecto al tiempo de electrocoagulación para cada densidad de corriente aplicada con una velocidad de rotación de 100 rpm y velocidad de flujo de 3 L/min.

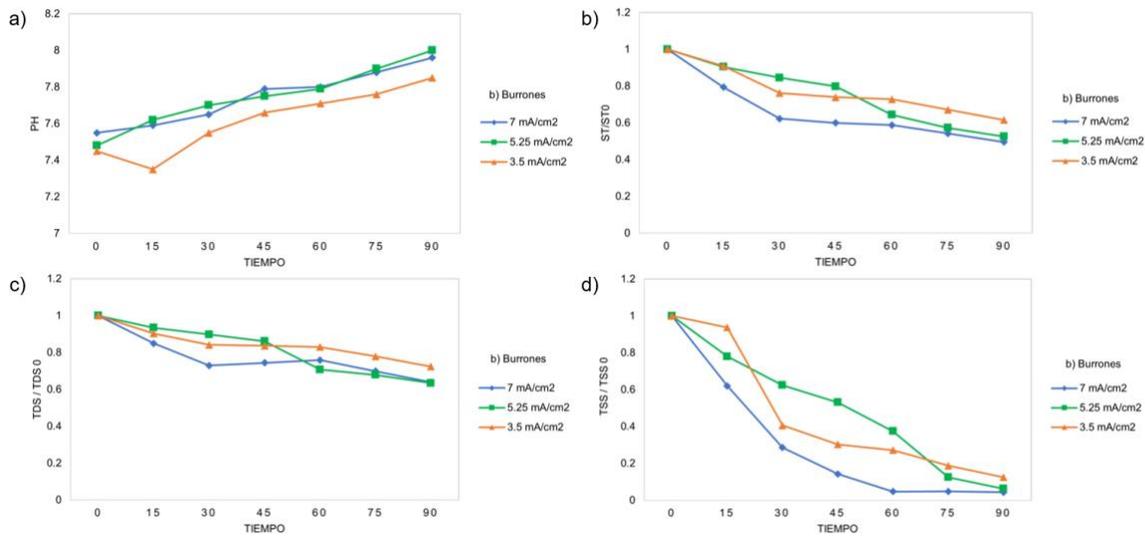


Figura 4. Resultados de agua de la presa de "Burrones": a) variación del pH, b) sólidos totales normalizados, c) sólidos disueltos normalizados, d) sólidos suspendidos normalizados, con respecto al tiempo de electrocoagulación para cada densidad de corriente aplicada con una velocidad de rotación de 100 rpm y velocidad de flujo de 3 L/min.

Con respecto al análisis cualitativo, en el tiempo 0 se observa el agua completamente homogénea, turbia y con un color café-verdoso; sin embargo, al pasar los primeros 15 minutos en el reactor, se empieza a sedimentar los sólidos y el agua empieza a perder la turbidez para pasar a ser agua transparente y clara, tal como se muestra en las Figuras 5 y 6 de las muestras de ambas presas.



Figura 5. Resultados de las muestras obtenidas entre el tiempo 0 y 90 minutos de operación para el agua de la presa de "La Purísima": a) recolección inicial y b) transcurrido el tiempo de sedimentación.



Figura 6. Resultados de las muestras obtenidas entre el tiempo 0 y 90 minutos de operación para el agua de la presa de "Burrone": a) recolección inicial y b) transcurrido el tiempo de sedimentación.

Consumo de energía y costos de operación

El consumo de energía del reactor se calculó mediante la siguiente fórmula⁵:

$$E = \frac{E_{celda} * I_{celda} * t}{V} * 0.001$$

Donde E_{celda} es el potencial eléctrico de la celda (en voltios), I_{celda} es la corriente aplicada (área electroactiva j , en amperios), t es el tiempo de electrocoagulación (en h), V es el volumen agua (m^3) y 0.001 es un factor de conversión para obtener en KWh/m^3 .

La baja conductividad que contiene el agua de la presa de "Burrone" causó que el potencial de celda se dispare y, por lo tanto, se tuvo que añadir cloruro de sodio 0.01M para aumentar la conductividad. En la muestra de la presa de "Burrone" a 7 mA/cm^2 se intentó añadir una concentración de sal más baja 0.005 M; sin embargo, no fue suficiente para levantar la corriente y el potencial de celda se elevó causando un consumo más elevado de energía. Contrario a lo que ocurrió con la presa de "La Purísima" donde a los 7 mA/cm^2 se utilizó una concentración de sal 0.05 M y después se bajó a 0.01 M en la densidad de 5.25 mA/cm^2 y 3.5 mA/cm^2 . Consumos semejantes fueron observados en las concentraciones de 5.25 mA/cm^2 y 3.5 mA/cm^2 para los tratamientos en cada presa donde la concentración de sal fue la misma con un valor de 0.01 M. En la Figura 7 se muestran los consumos energéticos para cada una de las tres densidades de corriente aplicadas.

Cálculo de dosis de aluminio

La dosis de aluminio producida por disolución anódica se estimó mediante la ley de Faraday⁶:

$$mAl = \frac{M * I_{celda} * t}{z * F}$$

⁵ Khandegar, V., Saroha, A.K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent a review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949-963.

⁶ Elabbas, S., Ouazzani, N., Mandi, L., Berrekhis, F., Perdicakis, M., Pontvianne, S. (2016). Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: influence of the quality of aluminium used for the electrode. *Journal of Hazardous Materials*, 319(5), 69-77.

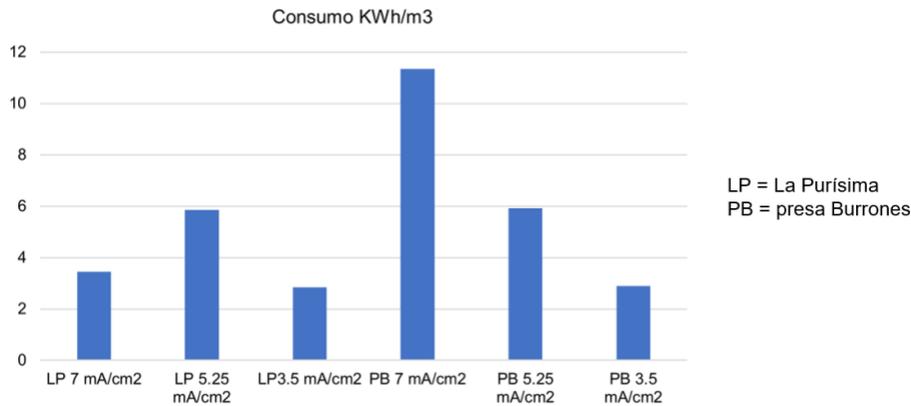


Figura 7. Consumos energéticos para las 3 densidades de corriente utilizadas en el tratamiento del agua de los embalses artificiales.

Donde M es el peso atómico del aluminio (26,98 g/mol), I celda es la corriente aplicada (A), t es el tiempo (s), z es la carga empleada en la ecuación (1) y F es la constante de Faraday (96.485 C/mol). En la Tabla 2 se reportan los valores calculados de la masa de aluminio que se consumieron durante cada experimento.

Tabla 2. Consumo de aluminio en el ánodo de sacrificio.

Presa	Densidad de corriente	Masa Al (mg/L)
a) La Purísima	7 mA/cm ²	64.76
	5.25 mA/cm ²	48.57
	3 mA/cm ²	32.38
b) Burrones	7 mA/cm ²	64.76
	5.25 mA/cm ²	48.57
	3 mA/cm ²	32.32

Cálculo de costos

El costo para el aluminio consumido ($\$_{Al(III)}$ en USD/m³) para el tiempo de electrocoagulación se evaluó con la siguiente ecuación⁷:

$$\$_{Al(III)} = C_{Al(III)} * \$2.008_{USD} * 0.001$$

Donde $C_{Al(III)}$ es la dosis experimental de aluminio al final del proceso de electrocoagulación (mg/L), Q es el caudal volumétrico (L/s), \$2.008 USD/kg es el precio del aluminio en México y 0.001 es un factor de conversión para obtener $\$_{Al(III)}$ en USD/m³.

⁷ Sandoval, M.A., Fuentes, R., Nava, J.L., Coreno, O., Li, Y., Hernandez, J.H. (2019). Simultaneous removal of fluoride and arsenic from groundwater by electrocoagulation using a filter-press flow reactor with a three-cell stack. *Separation and Purification Technology*, 208, 208-216.

En la Tabla 3 se reporta el gasto de aluminio que se consume tomando en cuenta la pérdida de masa calculada previamente donde es importante remarcar que el mayor consumo de aluminio se produce a mayor densidad de corriente. Por último, en la Tabla 4 se resumen los gastos producidos en el reactor por consumo de aluminio y energía eléctrica por cada 20L de agua tratada tomando en cuenta un precio actual de \$2.2232 por cada Kwh.

Tabla 3. Gasto del aluminio en USD

Presas	Densidad de corriente	\$Al (III) en USD/m ³
	7 mA/cm ²	0.130
a) La Purísima	5.25 mA/cm ²	0.084
	3 mA/cm ²	0.059
	7 mA/cm ²	0.130
b) Burrones	5.25 mA/cm ²	0.088
	3 mA/cm ²	0.058

Tabla 4. Resumen de los gastos producidos por la operación del reactor.

Presas	Densidad de corriente	\$kWh	\$Al	\$Total
	7 mA/cm ²	0.1531	2.19	2.343
a) La Purísima	5.25 mA/cm ²	0.2603	1.64	1.90
	3 mA/cm ²	0.1267	1.09	1.216
	7 mA/cm ²	0.5046	2.19	2.695
b) Burrones	5.25 mA/cm ²	0.2638	1.64	1.903
	3 mA/cm ²	0.1285	1.09	1.218

Conclusiones

En este trabajo, se empleó el proceso de electrocoagulación en un reactor de cilindro giratorio para realizar la purificación del agua de dos diferentes presas. Del análisis de resultados se obtuvo que con la mayor densidad de corriente aplicada igual a 7 mA cm⁻² con una generación de dosis de aluminio de 64.76 mg L⁻¹ se alcanza una alta remoción de contaminantes en un corto periodo de tiempo (30 min) para el agua de ambas presas. Por lo tanto, la densidad de corriente y el tiempo de reacción son significativos dentro del proceso de electrocoagulación. Los resultados indican que el proceso de electrocoagulación es efectivo para reducir la carga de contaminantes (principalmente los sólidos suspendidos) del agua de cada presa; de este modo, el proceso de electrocoagulación es una alternativa viable que puede aplicarse a mayor escala.

Bibliografía/Referencias

- Al-Hazmi, H. E., Mohammadi, A., Hejna, A., Majtac, J., Esmaeili, A., Habibzadeh, S., Saeb, M. R., Badawi, M., Lima, E. C. & Makinia, J. (2023). Wastewater treatment for reuse in agriculture: Prospects and challenges. *Environmental Research*, 116711.
- Elabbas, S., Ouazzani, N., Mandi, L., Berrekhis, F., Perdicakis, M., Pontvianne, S. (2016). Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: influence of the quality of aluminium used for the electrode. *Journal of Hazardous Materials*, 319(5), 69-77.

- Ferone, C., Capasso, I., Bonati, A., Roviello, G., Montagnaro, F., Santoro, L., Turco, R. & Cioffi, R. (2019). Sustainable management of water potabilization sludge by means of geopolymers production. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1-9.
- Khandegar, V., Saroha, A.K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent a review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949-963.
- Sandoval, M.A., Fuentes, R., Nava, J.L., Coreno, O., Li, Y., Hernandez, J.H. (2019). Simultaneous removal of fluoride and arsenic from groundwater by electrocoagulation using a filter-press flow reactor with a three-cell stack. *Separation and Purification Technology*, 208, 208-216.
- Tripathi, S. & Hussain, T. (2022). Chapter 7 – Water and Wastewater Treatment through Ozone-based technologies. *Development in Wastewater Treatment Research and Processes*, 139-172.
- Villalobos-Lara, A. D., Álvarez, F., Gamiño-Arroyo, Z., Navarro, R., Peralta-Hernández, J. M., Fuentes, R. & Pérez, T. (2021). Electrocoagulation treatment of industrial tannery wastewater employing a modified rotating cylinder electrode reactor. *Chemosphere*, 264, 128491.