

# Efecto de la velocidad de flujo y de la calidad del agua en la pasivación de un reactor de electrocoagulación

## Effect of flow velocity and water quality in the passivation of an electrocoagulation reactor

Sara Pérez-Castrejón\*, Silvia Lucila Gelover-Santiago, Alejandra Martín-Domínguez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, 62550 Jiutepec, Morelos, México Tel.: +52(777)3293600 – Fax: +52(777)3194381.  
Correo-e: (e-mail): sara\_perez@tlaloc.imta.mx

### RESUMEN

En los últimos años se ha incrementado el interés por las técnicas electroquímicas para el tratamiento de distintos tipos de agua contaminada y, debido a esto, el desarrollo y la evaluación del desempeño de los reactores ha jugado un papel muy importante en el éxito de éstas tecnologías. En ese sentido, el presente estudio muestra el efecto de la velocidad de flujo ( $v_f$ ) y la calidad fisicoquímica del agua a tratar, sobre la pasivación de un reactor de electrocoagulación. Las pruebas se hicieron a escala piloto en un reactor a flujo pistón, con electrodos de aluminio monopolares operando en forma galvanostática y con cambios de polaridad temporizada. Se fijaron la densidad de corriente ( $i$ ) a 23 A/m<sup>2</sup> y el tiempo de residencia hidráulico (TRH) en 63 segundos. Se exploraron dos velocidades de flujo (0.23 y 0.63 m/s) y se trabajó con dos tipos de agua (agua de pozo ajustada y agua de purgas de una torre de enfriamiento). Los resultados mostraron que para el agua de pozo a una  $v_f$  de 0.63 m/s, la eficiencia promedio de producción de aluminio (EAL<sub>p</sub>) fue del 250% y el voltaje varió entre 3.34 y 3.41 V; con  $v_f$  de 0.23 m/s se obtuvo una EAL<sub>p</sub> de 228% con voltajes que variaron entre 4 y 4.5 V. Por otro lado, al tratar el agua de purgas de torres de enfriamiento a una  $v_f$  de 0.63 m/s, se alcanzó una EAL<sub>p</sub> del 96% sin cambios en el voltaje, mientras que a una  $v_f$  de 0.23 m/s se obtuvo una EAL<sub>p</sub> de 114% con un claro incremento en el voltaje hacia el final de la prueba (de 4.43 V a 11.2 V).

**Palabras clave:** Electrocoagulación, velocidad de flujo, calidad del agua, pasivación

**Keywords:** Electrocoagulation reactor, flow velocity, water quality, passivation

Estos datos mostraron que la velocidad de flujo influye positivamente en la eficiencia del proceso electroquímico, aumentando la producción de aluminio cuando la velocidad es mayor; por otro lado, el reactor presenta menos pasivación con agua de pozo que con el agua de purgas.

### ABSTRACT

In recent years, the interest in electrochemical techniques for treatment of various types of contaminated water has increased, and because of this, the development and evaluation of the performance of reactors play a very important role in the success of these technologies. In this regard, the present study illustrates the effect of flow velocity ( $v_f$ ) and the quality of the water to be treated, on the passivation of the electrocoagulation reactor. The tests were conducted in a pilot scale reactor to plug flow, with aluminum electrodes in a monopolar operating galvanostatic and timed changes polarity. During the study the current densities were fixed ( $i$ ) in 23 A/m<sup>2</sup>, and the hydraulic residence time (HRT) in 63 seconds. Two flow rates (0.23 and 0.63 m/s) were explored, as well as two types of water (well water and water cooling tower blowdown). The results showed that the well water, for a  $v_f$  of 0.63 m/s, had an average efficiency of aluminum production (EAL<sub>p</sub>) of 250% and the voltage ranged between 3.34 and 3.41 V, and with a  $v_f$  of 0.23 m/s a 228% EAL<sub>p</sub> voltages ranging between 4 and 4.5 V. was obtained. Furthermore, by treating the water cooling tower blowdown with 0.63 m/s was reached 96% EAL<sub>p</sub> without changes in voltage, while with a  $v_f$  of 0.23 m/s a 114% of EAL<sub>p</sub> with a clear increase in voltage towards the end of the test (4.43 V to 11.2 V) was obtained. These data showed that the flow velocity influences the efficiency of the electrochemical process, increasing the production of aluminum when the  $v_f$  is higher; on the other hand, the reactor with well water presented less passivation than with water cooling tower blowdown.

### INTRODUCCIÓN

La electrocoagulación (EC) es una tecnología emergente que ofrece atractivas ventajas con respecto a la coagulación química en el tratamiento de agua, entre

\*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia  
(Recibido: Junio 20, 2012,  
Aceptado: Agosto 10, 2012)

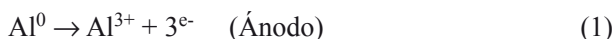
estas se puede mencionar que la electrogeneración del catión coagulante implica menos reactivos químicos adicionados al agua; también es más efectiva en la desestabilización de pequeñas partículas coloidales, promoviendo simultáneamente la oxidación química, la coagulación y la flotación y produciendo menos lodos, lo que la hace más amigable con el ambiente. Otras ventajas de la EC es que la dosis del agente coagulante se controla por el ajuste de la corriente aplicada sobre los electrodos de sacrificio, haciendo que el sistema sea fácilmente automatizable (Wang y col., 2005).

Existen estudios que reportan la EC como una alternativa viable para el tratamiento de agua en sistemas de enfriamiento (Liao y col., 2009; Martín-Domínguez y col., 2009; Shulz y col., 2009); sin embargo, hace falta información sobre condiciones hidrodinámicas que mejoren el desempeño de las unidades y sobre la dependencia de la eficiencia de este tipo de sistemas con la calidad del agua que se quiere tratar.

En su forma más simple la EC se compone de una celda electroquímica con electrodos de hierro o aluminio, a través de la cual se hace pasar una corriente directa (CD) mediante la aplicación de un voltaje específico que depende de las características del agua y del diseño del reactor; debido a la disolución controlada de los electrodos de sacrificio, se puede considerar como un proceso de corrosión acelerado (Moreno y col., 2009).

Esta tecnología involucra múltiples mecanismos que operan sinérgicamente para remover los contaminantes del agua y existen diversas opiniones con respecto al mecanismo clave para la mejor configuración del reactor (Holt y col., 2002). En la eficiencia del proceso interactúan aspectos como: las características fisicoquímicas del agua problema; los fenómenos electroquímicos que dependen del diseño del reactor (densidad de corriente, espaciado y disposición de los electrodos); así como los parámetros hidrodinámicos asociados al régimen de flujo, entre otros (Trompette y Vergnes, 2009).

Existe una gran variedad de materiales de electrodos de sacrificio y su elección dependerá del o de los contaminantes que se quieran retirar del agua. En este estudio se eligieron electrodos de aluminio, porque el objetivo es remover sílice y los hidróxidos de aluminio recién formados tienen una elevada capacidad de adsorber este elemento (Iler, 1979). Durante la electrocoagulación con electrodos de aluminio, suceden principalmente las siguientes reacciones de oxidación e hidrólisis:



Los iones de aluminio generados en el ánodo se combinan rápidamente con las especies producidas por la hidrólisis del agua, para formar numerosas especies hidroxiladas de aluminio. Los mecanismos mediante los cuales estos hidróxidos de aluminio remueven los contaminantes del agua son: 1) la neutralización de las especies cargadas negativamente, que provoca su precipitación; y/o 2) la incorporación de las impurezas en el precipitado amorfo de hidróxido de aluminio, este último se conoce como floculación por barrido. La importancia relativa de estos dos mecanismos depende fuertemente del pH y de la dosis de coagulante (Mouedhen y col., 2008).

Hay aspectos que influyen en la eficiencia de la electrocoagulación y uno de ellos es la pasivación o dificultad de los metales a oxidarse. El aluminio sólido, en contacto con el oxígeno de la atmósfera, desarrolla en su superficie una capa aislante de óxido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que aumenta la resistencia al paso de la corriente cuando se utilizan electrodos con este material. Esta capa de óxido es estable en medio acuoso en un amplio intervalo de pH (4-10). Adicionalmente, en solución acuosa ciertos iones como el sulfato disminuyen la capacidad de oxidación del metal, lo que complica la formación de cationes coagulantes y provoca un mayor consumo de energía eléctrica durante la EC. Por el contrario, el cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) promueve la oxidación por *pitting*<sup>1</sup> (Trompette y Vergnes, 2009) y disminuye la resistencia al paso de la corriente, lo que disminuye los costos relacionados con la aplicación del voltaje.

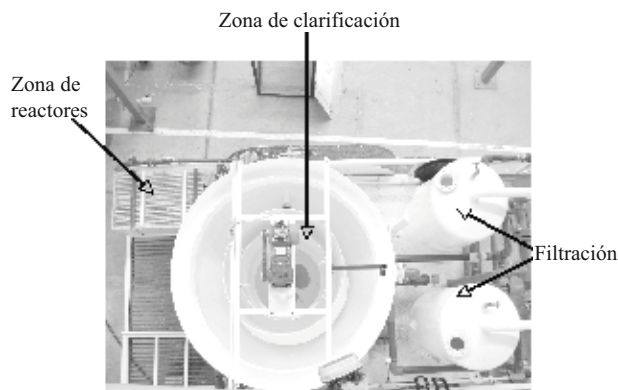
Uno de los retos más importantes que sigue teniendo la implementación de la electrocoagulación a nivel industrial, es precisamente encontrar las condiciones que minimicen la pasivación, para disminuir los costos por limpieza química o mecánica de los electrodos. Por otro lado, durante la EC se buscan condiciones de operación que permitan: 1) la distribución uniforme del coagulante en el seno del líquido, a través de una mezcla eficiente que optimice su contacto con los contaminantes; 2) la eliminación adecuada de las burbujas de gas generadas durante la electrólisis del agua, para evitar que su acumulación sobre las paredes de los electrodos incremente la resistencia de las celdas; 3) El arrastre eficiente de los hidróxidos de aluminio generados *in situ* hacia las unidades de separación, para evitar que se depositen sobre la superficie de los electrodos y provoquen la pasivación de los mismos.

<sup>1</sup> *Pitting corrosion* o *pitting*, en inglés, es una forma de corrosión extremadamente localizada que lleva a la creación de pequeños hoyos en el metal (Nota de los editores)

Bajo este contexto, este trabajo se enfocó en estudiar el desempeño de un reactor de electrocoagulación con dos condiciones hidrodinámicas diferentes, impuestas mediante la velocidad de flujo ( $v_f$ ), y dos calidades fisicoquímicas de agua obtenidas mediante dos tipos de agua distintas, una de pozo y otra de purga de una torre de enfriamiento.

#### MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas se llevaron a cabo en una planta piloto que contenía un reactor de EC construido en Nylacero, además de una unidad de clarificación y un filtro en arena acoplados en línea. El reactor de EC se operó a presión y con flujo pistón en configuración vertical. Los electrodos consistieron de placas rectangulares paralelas de aluminio, de 0.90 de alto x 0.15 de ancho x 0.006 m espesor, conectadas en arreglo monopolar y con 0.5 cm de espaciamiento entre ellas.



**Figura 2. Vista superior de la planta piloto de EC en línea acoplada a clarificación y filtración**

Se fijaron dos parámetros de operación en el reactor, la densidad de corriente ( $i$ ) a  $23 \text{ A/m}^2$  y el tiempo de residencia hidráulico (TRH) en 63 segundos; esto tomando como base resultados obtenidos en estudios anteriores (no mostrados aquí), en donde se observó que a densidades de corrientes por debajo de  $30 \text{ A/m}^2$  se mejora la eficiencia electroquímica en este sistema (Martín-Domínguez y col., 2009) y a tiempos de residencia menores a 90 segundos se reduce la acumulación de flóculos sobre los electrodos.

La corriente directa se fijó utilizando una fuente de poder marca Sorensen, modelo DCS20-150, con inversión de polaridad cada 25 minutos para evitar la pasivación y desgastar homogéneamente los electrodos.

Las velocidades de flujo estudiadas fueron de 0.23 y 0.63 m/s, y para cada una de ellas se calculó la corriente directa ( $I$ ) requerida (de acuerdo con la ley de Faraday) para fijar una concentración teórica de aluminio de 26 mg/L.

Para fijar las dos velocidades de flujo se varió el gasto de operación. Para mantener la  $i$  y TRH constantes se trabajó con 8 pares de electrodos cuando la  $v_f$  fue de 0.23 m/s ( $Q = 10.5 \text{ L/min}$ ) y con 22 pares de electrodos para  $v_f$  de 0.63 m/s ( $Q=30 \text{ L/min}$ ).

En el estudio se usaron dos tipos de agua, la primera proveniente de un pozo con características similares a la de repuesto de una torre de enfriamiento y cuya conductividad fue ajustada a  $1000 \mu\text{S/cm}$  con NaCl. El segundo tipo de agua provino directamente de la purga de una torre de enfriamiento, cuyas características son que tiene alta conductividad y elevada concentración en sales (Tabla 1).

**Tabla 1. Características del agua de estudio**

Tipo de agua	Características fisicoquímicas
Agua de pozo	Silice = 50 mg/L, dureza total ~ 100 mg/L como $\text{CaCO}_3$ , SDT = 450 mg/L, sulfatos = 25 mg/L. Se ajustó la conductividad a $1000 \mu\text{S/cm}$ con NaCl.
Agua de purgas de torres de enfriamiento	Silice 118-120 mg/L, dureza total = 1195 mg/L como $\text{CaCO}_3$ , SDT = 1320 mg/L, sulfatos = 1320 mg/L, conductividad eléctrica entre 1700 y 2200 $\mu\text{S/cm}$ . Diversas sustancias químicas añadidas directamente en la torre de enfriamiento como ajustadores de pH, anti incrustantes, anticorrosivos y biocidas.

Durante las pruebas se hizo el seguimiento de la concentración de aluminio cada hora, cuidando que la muestra se tomara después de 15 minutos de haberse efectuado el cambio de polaridad, con la finalidad de asegurar la estabilidad del sistema. Al finalizar cada prueba el reactor se lavó con una solución comercial anti incrustante al 2%, para eliminar cualquier vestigio de incrustación de los electrodos. Para la cuantificación de aluminio se utilizó el método espectrofotométrico Aluver (8326) de Hach, que se basa en la reacción que ocurre entre la cianina de eriocromo-R ( $\text{C}_{23}\text{H}_{15}\text{Na}_3\text{O}_9\text{S}$ ) y el aluminio. El pH se determinó con un potenciómetro Orion modelo 420A y la conductividad eléctrica con un conductímetro Orion Modelo 145. Estos equipos se calibraban cada vez que se iniciaba un ensayo.

El cálculo de la concentración teórica de aluminio se realizó utilizando la Ley de Faraday para un sistema en continuo:

$$Al_T = \frac{IMM * 1000}{QnF} \quad (3)$$

donde  $Al_T$  es la cantidad teórica del aluminio producido por unidad de volumen (mg/L),  $I$  es la corriente aplicada (amperios),  $Q$  es el flujo de agua (L/s) que pasa por el reactor,  $n$  es el número de electrones involucrados en la reacción de oxidación-reducción (para aluminio  $n=3$ ),  $MM$  es la masa molecular del material del ánodo (para el Al es de 26.98 g/mol) y  $F$  que es la constante de Faraday (96,486 C/mol).

La eficiencia electroquímica en la producción aluminio se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$EAl_p = \frac{Al_T}{Al_p} * 100 \tag{4}$$

donde  $Al_p$  es la concentración de aluminio obtenida en las pruebas.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

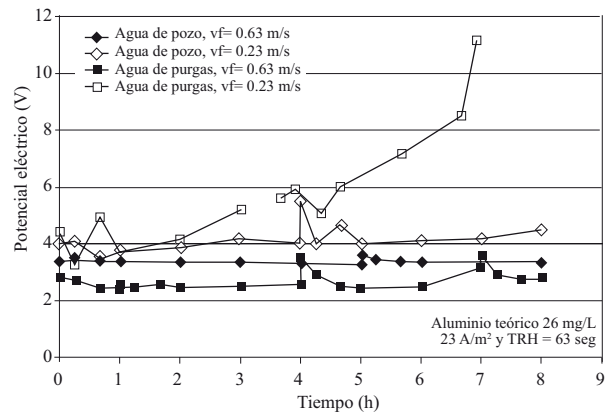
En la Tabla 2 se muestran las concentraciones ( $Al_p$ ) y eficiencias promedio del aluminio producido ( $EAl_p$ ) durante 8 h de trabajo, así como el voltaje inicial y final en cada prueba. Para el agua de pozo se obtuvieron eficiencias electroquímicas por arriba del 220%, llegando al 250% cuando se operó a una velocidad de flujo de 0.63 m/s. Eficiencias mayores al 100% ya han sido observada por otros autores cuando se utilizan electrodos de aluminio (Cañizares y col., 2009; Shulz y col., 2005), pues el aluminio que se obtiene en una celda electroquímica proviene tanto de los procesos electroquímicos (aluminio generado en el ánodo) como de la oxidación química del cátodo. También se observó en estas pruebas que el potencial no sufrió ningún incremento a la velocidad de 0.63 m/s, mientras que con la velocidad de 0.23 m/s el voltaje aumentó solamente 0.5 unidades con respecto al inicial.

**Tabla 2.** *Condiciones de operación y resultados de las pruebas realizadas*

Tipo de agua	Velocidad de flujo (m/s)	Conductividad eléctrica ( $\mu S/cm$ )	$Al_p$ (mg/L)	$EAl_p$ (%)	Voltaje inicial (V)	Voltaje final (V)
Agua de pozo (Repuesto)	0.23	929	59.42	227.6	4.00	4.50
	0.63	978	65.6	250.7	3.41	3.34
Agua de purgas de torres de enfriamiento	0.23	1732	29.88	114.3	4.43	11.20
	0.63	2001	25.25	96.38	2.85	2.83

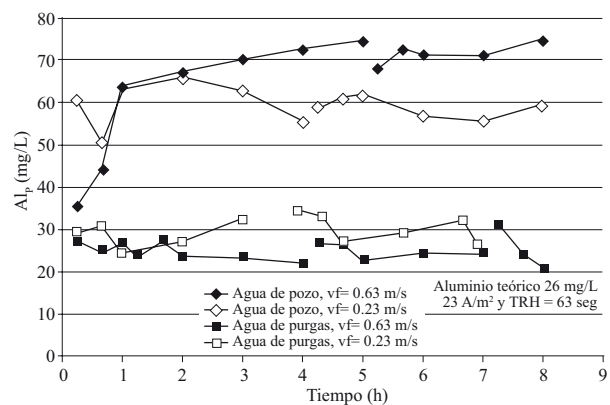
Con el al agua de purgas de torres de enfriamiento la eficiencia electroquímica del sistema disminuyó considerablemente con respecto al agua de pozo y apenas se alcanzó una producción entre 96 y 114%. Esto pudo deberse a la presencia de los aditivos químicos que se añaden normalmente al agua de circulación de las torres de enfriamiento y que precisamente inhiben la corrosión.

Cuando se trabajó a una  $v_f$  de 0.23 m/s, se observó una mayor formación de depósitos sobre la superficie de los electrodos debido al poco arrastre hidráulico y a la mayor concentración de especies incrustantes con respecto al agua de pozo. Esto incrementó la resistencia al paso de la corriente y, por lo tanto, aumentó considerable el voltaje (152% con respecto al inicial). Con la velocidad de 0.63 m/s no hubo variación en el voltaje aplicado (Figura 2), lo que indica que operar a mayores velocidades de flujo permite arrastrar los depósitos y disminuir incrustaciones sobre los electrodos.



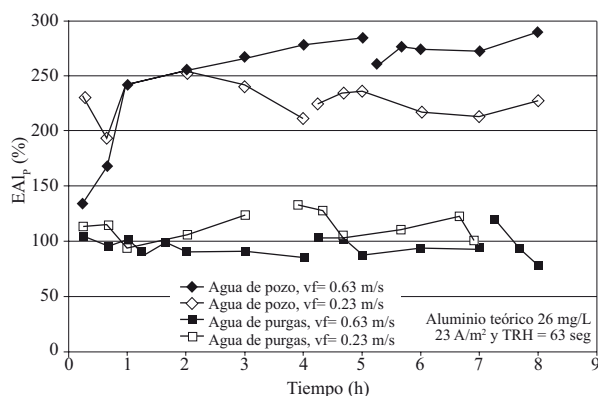
**Figura 2.** *Comportamiento del potencial eléctrico (V) durante el tiempo de prueba*

Cuando los electrodos son nuevos, lo cual coincidió con el agua de pozo, se observa (Figuras 3 y 4) que en la primera hora de operación la eficiencia es baja; esto se debió a que inicialmente los electrodos tienen una capa protectora que se va eliminando conforme se lleva a cabo el proceso de corrosión. También se observa que hay una mayor estabilidad en la producción del aluminio con el agua de pozo que con la de purga y además ésta mejora si la  $v_f$  es de 0.63 m/s.



**Figura 3.** *Comportamiento del aluminio producido ( $Al_p$ ) durante el tiempo de prueba*





**Figura 4. Comportamiento de la eficiencia de producción de aluminio durante el tiempo de prueba**

#### CONCLUSIONES

Las condiciones hidrodinámicas probadas, fijadas a través de la velocidad de flujo, así como la calidad del agua, influyen en el desempeño del reactor. La opción más recomendable para este tipo de reactores es operar a velocidades de flujo elevadas (0.63 m/s). Con respecto a la calidad del agua, energéticamente es más favorable utilizar agua de purgas debido a que demanda menos voltaje para la producción de aluminio; sin embargo, lo produce en menor cantidad que con el agua de pozo. La única condición que presentó pasivación eléctrica fue cuando se mantuvo la  $v_f$  de 0.23 m/s en el agua de purgas.

Aplicar la electrocoagulación al agua de pozo (repuesto), permitió obtener eficiencias electroquímicas más elevadas que con agua de purgas, de donde se deriva que resulta más conveniente tratar el agua de repuesto que el agua de purgas en sistemas de enfriamiento.

#### RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló gracias al apoyo del FSIDTE-CONACYT proyecto CFE-2008-CO7-89054 y del fondo SENER- Hidrocarburos, PROYECTO 138178. Las autoras agradecen la valiosa colaboración del Ing. Agustín Montes-Brito, en la parte de análisis y operación del sistema de electrocoagulación.

#### NOMENCLATURA

$Al_p$	Aluminio producido (mg/L)
$Al_T$	Concentración teórica de aluminio (mg/L)
CD	Corriente directa

EC	Electrocoagulación
$EAAl_p$	Eficiencia de aluminio producido (%)
F	Constante de Faraday (96,486 C/mol)
I	Corriente aplicada (amperios)
i	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )
MM	Masa molecular del aluminio 26.98 g/mol
n	Número de electrones intercambiados en la reacción de oxidación-reducción, para aluminio son 3
Q	Flujo volumétrico (L/min)
SDT	Sólidos disueltos totales (mg/L)
TRH	Tiempo de residencia hidráulico (segundos)
V	Voltaje o potencial eléctrico
$v_f$	Velocidad de flujo (m/s)

#### LETRAS GRIEGAS

$\mu S$	Microsiemens, medida de conductancia eléctrica
---------	--

#### BIBLIOGRAFÍA

- Cañizares, M.P., Carmona, M., Lobato, J., Martínez, F., Rodrigo, M.A. 2005. Electrodissolution of aluminum electrodes in electrocoagulation processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44:4178-4185.
- Holt, P.K., Barton, G.W., Mitchell, C.A. 2002. Mathematical analysis of a batch electrocoagulation reactor. *Water Supply.* 2(5-6):65-71.
- Iler, K. R. 1979. *The chemistry of silica: Solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry*. Ed. John Wiley & Sons. P. 193. 1a ed. Nueva York, NY, EEUU.
- Liao, Z., Gu, Z., Schulz, M.C., Davis, J.R., Baygents, J.C., Farrel, J. 2009. Treatment of cooling tower blowdown water containing silica, calcium and magnesium by electrocoagulation. *Water Science and Technology.* 60(9):2345-2352.
- Martín-Domínguez, A., Gelover-Santiago, S., Villegas-Mendoza, I.E., Pérez- Castrejón, S. 2009. Remoción de sílice de agua para uso en torres de enfriamiento mediante un método electroquímico. En *VIII Congreso Internacional de Ciencias Ambientales, XIV Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, 3er. Congreso del Medio Ambiente*. TBA 339-O. Santa Cruz, Tlaxcala, México.
- Moreno-C., H.A., Cocke, D.L., Gomes, J.A.G., Morkovsky, P., Parga, J.R., Peterson, E., García, C. 2009. Electrochemical reactions for electrocoagulation using iron electrodes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48:2275-2282.
- Mouedhen, G., Feki, M., De Petris Wery M., Ayedi H.F. 2008. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials.* 150:124-135.
- Shulz, M.C., Baygents, J.C., Farrel, J. 2009. Laboratory and pilot testing of electrocoagulation for removing scale forming species from industrial process waters. *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 6(4):521-526.
- Trompete, J.L., Vergnes, H. 2009. On the crucial influence of some supporting electrolytes during electrocoagulation in the presence of aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials.* 163:1282-1288.
- Wang, L.K., Hung, Y.-T., Shammas, N.K. Eds. 2005. *Physicochemical treatment processes*. Vol. 3. Handbook of Environmental Engineering. Humana Press Inc. Totowa, Nueva Jersey, EEUU.