

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO POR MEDIO DE UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN UTILIZANDO UN PROTOTIPO DE CELDA ELECTROQUÍMICA TIPO BATCH Y DE SU FACTIBILIDAD FINANCIERA

Alexander Aldemaro Ramírez Ortiz¹

RESUMEN. La frecuente ubicación de pozos mecánicos con presencia de agua con altos contenidos de sustancias que afectan la salud o al abastecimiento de agua potable que justifican la búsqueda de tecnologías alternativas que permitan lograr mayor efectividad en la remoción de diferentes sustancias cobra importancia. Una de estas tecnologías es la electrocoagulación, la cual se estudia en este artículo en cuanto a su eficiencia de remoción de Hierro (Fe) y Manganeseo (Mn), realizando la construcción de un prototipo de celda electrolítica tipo Batch y con el apoyo de un modelo estadístico de desarrollo de experimentos, definiendo las condiciones óptimas de funcionamiento del prototipo para aplicarlas en muestras de agua de dos fuentes subterráneas del municipio de Fraijanes y el nivel de factibilidad financiera de implementación del proceso.

PALABRAS CLAVE: Agua para consumo humano, calidad del agua, remoción de hierro y manganeso, electrocoagulación.

ABSTRACT. *The frequent location of mechanical wells containing water with high content of substances affecting health or water supply that justify the search for alternative technologies that help achieve greater effectiveness in removing various substances becomes important.. One such technology is electrocoagulation, which is studied in this paper in terms of removal efficiency of iron (Fe) and manganese (Mn), performing construction of a prototype batch-type cell with electrolytic application and supported by a statistical model development experiments, defining the optimum conditions for the prototype functioning for application in water samples from two underground source at located municipality of Fraijanes and the level of financial feasibility of implementing the process.*

INTRODUCCIÓN

El presente artículo trata sobre el análisis de factibilidad de la eficiencia de Hierro (Fe) y Manganeseo (Mn) de un prototipo consistente en una celda tipo Batch con aplicación de electrolisis, tecnología denominada "Electrocoagulación". Se adoptó para este un análisis estadístico consistente en un diseño factorial fraccionado, con el que se definieron 32 corridas de laboratorio obtenidas de soluciones madre; las cuales sirvieron, en una fase preliminar, como la base para la definición de las condiciones óptimas de funcionamiento del prototipo. Los factores sobre los cuales se definió el análisis preliminar fueron: voltaje, tiempo de retención, el material del ánodo y la distancia entre los electrodos. Definidos los factores se identificaron las variables de respuesta, que son: conductividad, potencial de hidrogeno (pH) y los porcentajes de reducción de Fe y Mn. Al haber obtenido las condiciones óptimas de funcionamiento del prototipo, se presentó una nueva serie de análisis que generados por un grupo de datos que expresan los valores de eficiencia del sistema con condiciones específicas del experimento; esta última fase fue realizada con agua de una fuente subterránea, del municipio de Fraijanes. La metodología se complementa con un análisis financiero sobre el costo de implementación de esta tecnología. Del análisis de los datos obtenidos se definieron varias conclusiones de las

cuales se consideran más relevantes: (i) la eficiencia de remoción de Fe que es del orden promedio de 45.97 %; (ii) la eficiencia de remoción de Mn que es de 24.27 %, y puede verse como muy eficiente; (iii) el análisis financiero definió que la implementación de este modelo requiere un alto costo de mantenimiento sobre todo por el desgaste de placas. Sin embargo, una exploración enfocada sobre otros tipos de caudales en aguas residuales industriales, donde los volúmenes son menores podría darle mayor rentabilidad al uso de esta tecnología.

METODOLOGIA.**FACTORES Y VARIABLES.**

El proceso de Electrocoagulación adoptado se hace sobre la base de procesos empíricos que considera condiciones de investigaciones similares que en su mayoría se aplicaron en aguas residuales. Sin importar la forma que tenga el prototipo implementado, se identificó que los siguientes factores afectan el funcionamiento, los cuales se tomaron para el diseño estadístico y que se relacionan entre sí.

VOLTAJE. Este factor varía según las condiciones de ubicación de los componentes, el número de electrodos o el volumen de tratamiento, el tipo de material de los electrodos, como de algunas variables específicas de tipo de líquido tratado, como el pH y la conductividad.

DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS. Hace variar la intensidad de corriente, pues entre mayor sea esta, se necesita mayor potencial para la transmisión de los electrones, que a su vez dependerá de la conductividad del líquido.

MATERIALES DE LOS ELECTRODOS. Se debe considerar que la conductividad de los materiales considerados sobre todo en el ánodo, que debe ser alta, y una característica natural entre los metales.

NÚMERO DE PLACAS. La cantidad de placas que se utilicen en el proceso afectan el voltaje necesario y el tiempo necesario para el tratamiento. Este factor define el área de transmisión de los electrones entre placas.

TIEMPO DE RETENCIÓN. El tiempo de retención es un factor que determina el nivel de reducción de los parámetros pero a su vez aumenta el consumo energético del sistema.

En cuanto a las variables que se consideraron afectaría el nivel de respuesta del tratamiento, se encuentran:

1) **pH.** El Potencial de hidrogeno que influye en la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. El pH varía durante el proceso, siendo afectado directamente por el material de los electrodos y de su valor inicial del agua tratada.

2) **CONDUCTIVIDAD.** Que se refiere a la capacidad de transmisión de la electricidad a través del agua tratada, aunque por condiciones de resistencia de materiales, depende indirectamente de la conductividad de los electrodos y del voltaje aplicado.

% DE REMOSIÓN DE Fe Y % DE REMOSIÓN DE Mn. Variables principales de análisis para la aplicación del prototipo. Se adoptó para su cálculo la siguiente fórmula:

$$\%R = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100$$

Donde: %R, es porcentaje de reducción; C_i , la concentración inicial; y, C_f , la concentración final.

ANÁLISIS FINANCIERO ADOPTADO. El análisis financiero de la aplicación de la tecnología estuvo desarrollado sobre la aplicación de la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN), haciendo proyecciones de cinco años en el supuesto de que esta tecnología puede ser utilizada a nivel domiciliario. Se debe de observar de manera especial el consumo de energía eléctrica, el desgaste de las placas luego de la transmisión de electrones y la comparación con un esquema de tratamiento en operación de un sistema de agua potable en funcionamiento de un condominio del municipio de Fraijanes a 20 kilómetros de la Ciudad de Guatemala. Para el cálculo de energía eléctrica fue aplicada la siguiente fórmula:

$$E = \frac{V * I * t}{\text{Volumen de agua tratada} * 1000}$$

Donde: E, es la energía consumida; V, es el voltaje aplicado; I, intensidad de corriente en amperios; y, t, es el tiempo de funcionamiento en horas.

DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO.

Para el diseño del experimento se utilizó por una técnica estadística que sirviera para la optimización del proceso, estimando un modelo de primer orden, en este sentido se aplicó un "Diseño Factorial Fraccionado" 2^{K-P} , ya que se estudiaron los efectos por más de dos factores, investigando la aplicación de todas las combinaciones de niveles de los factores en cada ensayo, corrida o replica. Con la aplicación de esta técnica, se determinó un número total de 32 ensayos de laboratorio, que sirvieron de base para establecer las condiciones óptimas de funcionamiento que serían aplicadas en el sistema de agua potable.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

Los modelos de celdas de electrocoagulación identificados obedecen a diversas formas y consideraciones técnicas, no se ubicó una metodología estándar para su diseño, aunque existen una serie de recomendaciones que han sido incorporadas en la presente investigación. Los modelos de prototipo tipo batch, siguen básicamente el siguiente esquema:

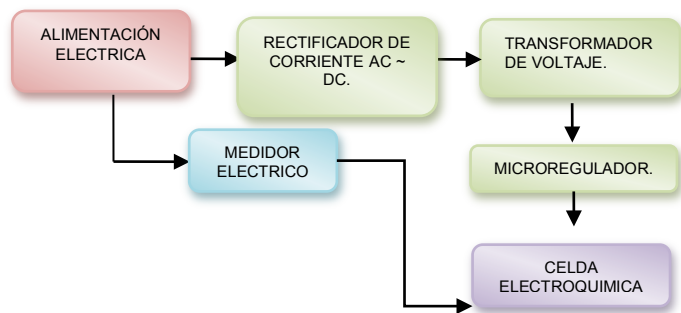


Figura 1. Diagrama de estructura del prototipo.

CELDA ELECTROLITICA. La celda se diseñó en función del volumen a ser tratado, en el presente caso el volumen es de 3.5 litros. El dimensionamiento de la base de la celda es de 14 x 24 centímetros, dimensiones definidas por el área de carga del mecanismo agitador disponible. El material escogido para la construcción fue el vidrio, considerando las propiedades aislantes al calor y de baja conducción eléctrica, que es superior a otros materiales de uso común para la creación de recipientes. A fin de dimensionar adecuadamente la Celda para la distribución espacial de los electrodos se toma en cuenta en la investigación realizada por Arango y Garcésⁱ, sobre la recomendación de que las placas de los electrodos en las celdas no deben ser menores a 1 centímetro; y lo argumentado por Papaleo y Rodríguezⁱⁱ, en su documento de tesis: “las distancias de separación entre placas menores a 1 cm no son recomendables porque aumentan el tiempo del tratamiento”. Además de lo indicado, se ha podido establecer en éstos que debe considerarse una zona libre para que flote espuma y flóculos de baja densidad, como también para aquellos de alta densidad que se precipiten al fondo, considerando espacios de 4 centímetros por sobre y bajo las placas.

NÚMERO Y ESPACIO DE LOS ELECTRODOS. Los electrodos, se definieron por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Número de Electrodos} = \frac{a - 2 \cdot E}{e + s}$$

Donde: a, es el ancho total de la celda; E, es la distancia entre los electrodos; e, es la distancia máxima entre electrodos; y, s, el espesor de las placas. Todas las unidades para el cálculo están expresadas en milímetros.

$$\text{Número de Electrodos} = \frac{240 - 2 \cdot 20}{20 - 1} = 7.62 \cong 8$$

En este sentido el área de contacto nominal de 800 cm², aunque en la práctica ésta se reduce debido a que las placas no se sumergen completamente en el agua, por lo que contó con un área de 565 cm². El segundo nivel adoptado en cuanto a separación de celdas es de 1.5 cm, por lo que se volvió a plantear de la siguiente manera:

$$\text{Número de Electrodos} = \frac{240 - 2 \cdot 20}{15 - 1} = 10$$

Con lo que se contó con un área efectiva de contacto de 682 cm².

MATERIAL DE LOS ELECTRODOS. En cuanto al material para las placas, se consideraron tres criterios: Disponibilidad de materiales en el mercado, Costo y Referencias bibliográficas sobre el desempeño de los materiales en procesos similares. En el mercado de la República de Guatemala, no se pudo encontrar materiales para los electrodos en la presentación o con el nivel de pureza que puedan ser respaldados con certificados, lo cual obligó la utilización de componentes destinados para procesos industriales no relacionados al tema de la electrofloculación.

TIEMPO DE RETENCIÓN. Se utilizaron dos niveles para este factor, de 15 y 10 minutos.

VOLTAJE. Los dos niveles considerados para el análisis fueron 9 y 6 voltios.

PLANTEAMIENTO ESTADÍSTICO FINAL. En consideración de las condiciones identificadas en la tabla 2, se presenta el planteamiento estadístico utilizado, el cual se auxilió del software STATGRAPHICS para la identificación de las condiciones óptimas de funcionamiento.

Tabla 1. Planteamiento final para el análisis estadístico

FACTORES CONTROLABLES	UNIDAD	NIVELES DE MEDICIÓN	NIVEL ALTO	NIVEL BAJO
Voltaje	Voltio	2	9	6
Distancia entre placas	Cm	2	2	1.5
Material del Ánodo	adimensional	1	Cu	Cu
Tiempo de retención	Minutos	2	15	10
Número de placas	adimensional	2	10	8
VARIABLES DE RESPUESTA		UNIDAD		
pH	Unidades de pH			
Conductividad	mS/cm			
% de remoción de hierro	%			
% de remoción de manganeso	%			

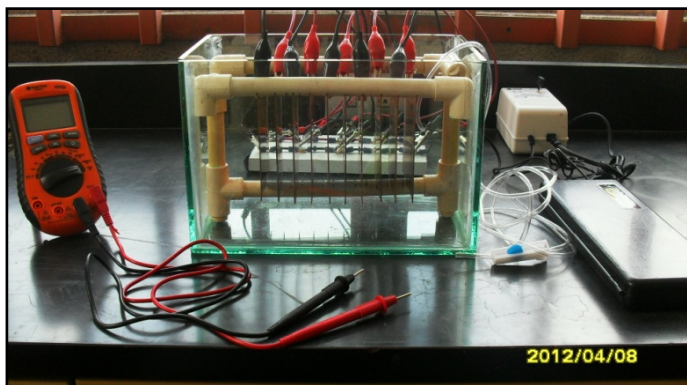


Figura 2. Equipo del Prototipo

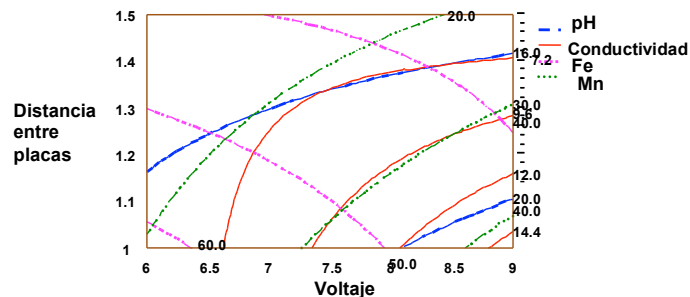
RESULTADOS ANÁLISIS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO.

Para el análisis de los resultados se desarrolló un Análisis de Varianza (ANOVA) para cada serie de respuesta, mostrando el diagrama de Pareto, y la relación con los factores, como la influencia individual sobre la variable de respuesta, graficando los efectos, uniendo los puntos correspondientes de la media de la variable respuesta en el nivel alto de cada factor y la media de la variable en el nivel bajo. Igualmente se exponen los efectos de la interacción y dependencia con otros factores. Se advierte que los datos que se presentan son estadísticas aplicables al experimento presente de manera muy particular, la extrapolación o la consideración de este para explicar el proceso como tal, no sería aconsejable.

En el diagrama de la figura 3, se hace un análisis estadístico de los resultados obtenidos en las 32 corridas de laboratorio con muestras manejadas en forma controlada, luego de la aplicación de la ANOVA sobre cada una de las variables de respuesta propuestas en el

planteamiento original y de todas las posibles combinaciones de los factores controlables identificados y que definió que las condiciones óptimas para este proceso sea de 9 placas y con un tiempo de retención de 12.5 minutos. El proceso de definición de estos resultados se describe de manera más detallada, el cual parte de una serie de ANOVA.

Figura 3. Diagrama de combinaciones de los resultados sobre condiciones controladas



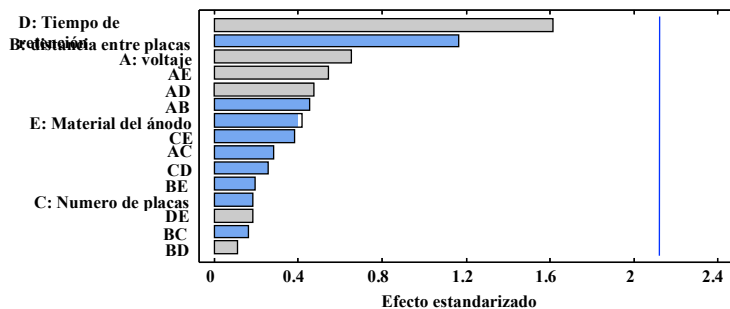
Numero de Placas=9.0, Tiempo de retención=12.5, Material del ánodo=0.5

Tabla 2. Modelo de ANOVA utilizado para las variables de respuesta.

FUENTE	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	-Ratio	P-Value
A: Voltaje					
B: Distancia entre placas					
C: Material del ánodo					
D: Tiempo de retención					
E: Número de placas					
AD					
AE					
BD					
CD					
CE					
Bloques					
Error total					
Total					

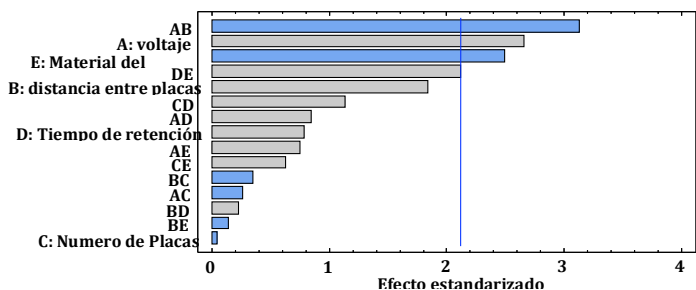
Las condiciones se definieron en función del análisis de la interrelación de los efectos causados por las variables de respuesta que se detallan en los diagramas siguientes:

Figura 4. Diagrama de Pareto estandarizado para aumento del pH



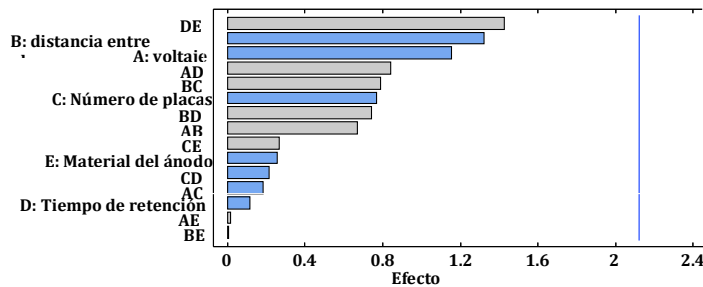
En el diagrama de la figura número 4, se identifican en gris los factores que hacen disminuir la concentración del pH y en azul los que lo hacen incrementar. Se logra identificar que el factor más influyente es el tiempo de retención, seguido de la distancia de las placas.

Figura 5. Diagrama de Pareto estandarizando para disminución de Conductividad



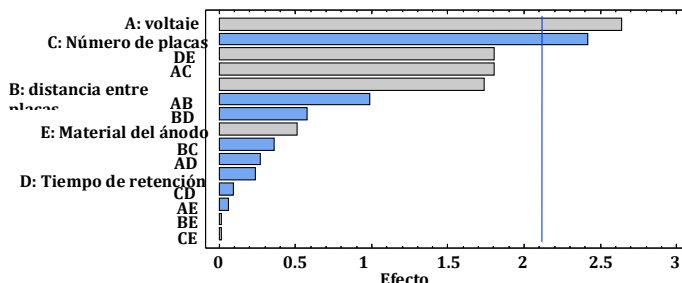
En caso de la conductividad, en el diagrama anterior se identifica que es la combinación de los efectos combinados del voltaje con la distancia entre las placas afectan de manera inversamente proporcional, mientras que el voltaje por si solo afecta sustancialmente a la disminución del valor de la conductividad, en esta misma condición está el tiempo de retención. En cuanto a la distancia de las placas, el efecto es inverso. Una condición es que los cuatros efectos descritos están en el límite o sobrepasan la línea azul que definiría que todos estos factores afectan de manera significativa el proceso.

Figura 6. Diagrama de Pareto estandarizado para reducción de Fe.



La Figura 6, muestra que efecto combinado entre el material del ánodo y el tiempo de retención es lo que más incide en el proceso de reducción del hierro, seguida de una manera inversa la distancia entre placas y el voltaje, aunque ninguno de ellos crea una valoración significativa.

Figura 7. Diagrama de Pareto estandarizado para reducción de Mn.



En la figura 7, en que se presenta el Diagrama de Pareto correspondiente al proceso de reducción del Manganese, se identifican los factores que más influyen en éste, encontrándose que tanto el efecto causado por el Voltaje y el número de placas, son significativamente decisivos para reducción del Mn.

Luego de la definición de las condiciones óptimas de trabajo del prototipo se procedió a implementar el procedimiento en dos pozos mecánicos en dos muestras recolectadas en el condominio Terravista, en el municipio de Fraijanes que se presentan en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Resultados de los ensayos en cuanto a Fe y Mn del pozo No. 1, condominio Terravista

Muestra # 1	Inicial	Final
Ubicación	Oficina de agua	
Hora	8:35 am	
Temperatura	19°C	
pH	6.61	6.51
Conductividad	149.6 uS/cm	157.6 uS/cm
Hierro (Fe)	1.60 mg/l	0.62 mg/l
Manganeso (Mn)	0.50 mg/l	0.20 mg/l

Tabla 4. Resultados de los ensayos en cuanto a Fe y Mn del pozo No. 2, condominio Terravista

Muestra # 2.	Inicial	Final
Ubicación	Zona verde (parque) ubicada frente a lote 6, manzana A, sector 2	
Hora	8:47 am	
Temperatura	18.5°C	
pH	6.15	6.74
Conductividad	150.6uS/cm	151.4 uS/cm
Hierro (Fe)	0.66 mg/l	0.55 mg/l
Manganeso (Mn)	0.40 mg/l	0.10 mg/l

DESEMPEÑO DEL PROTOTIPO EN CUANTO AL TRATAMIENTO DE FE Y MN Y EN LAS VARIACIONES DE PH Y CONDUCTIVIDAD.

Luego de las 32 corridas de laboratorio, la eficiencia en remoción de Fe en la primera muestra del 61.25 %; mientras que en la segunda, de 16.67 %; luego, en el caso del Mn en la primera es de 60 % y en la segunda de 75 %. Se observó que el comportamiento del tratamiento sobre el pH y la conductividad no fue similar a las condiciones de las muestras trabajadas con soluciones creadas en laboratorio. Si bien, en las muestras generadas en laboratorio existió una marcada relación de aumento del pH y disminución de la conductividad, en las muestras tomadas en campo no fue así. Para la muestra de la red suministrada por el pozo #1, el pH bajó y la conductividad subió, mientras que la muestra tomada de la red de distribución del pozo # 2, la tendencia fue similar a la de las soluciones consideradas de manera controlada. Según consideraciones de la Organización Panamericana de la Salud, los valores a los que el sistema llega luego del

tratamiento, indican que para este caso específico los valores que pueden causar problemas de aceptación por generación de manchas en ropa y artefactos sanitarios y de alguna presencia de revestimientos en tuberías que causan taponamientos en las redes.

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD FINANCIERA.

Luego realizar la evaluaciones, el resultado del VAN es de -1790 y el TIR de -19 % para un periodo de 5 años. Tomando en cuenta estos datos no se ve factible la implementación.

Tabla 5. Cuadro Base para el desarrollo del análisis financiero para la implementación del Prototipo.

Costo anuales	US\$	Desembolsos	US\$
Inversión directa e indirecta	388.90	Aporte mensual inicial	152.87
Operación	146.52	Incremento anual	6 %
Mantenimiento	99.69		
Incremento anual	12 %		

CONCLUSIÓN

Desde el punto de vista de eficiencia de remoción de Fe y Mn, la electrofloculación puede ser considerada como una alternativa adecuada para el tratamiento de agua de consumo humano, sin embargo, luego del análisis de factibilidad financiera se concluye que sus costos de operación y mantenimiento, por lo que no es factible, debido al desgaste de sus componente y el alto consumo de energía eléctrica.

RECOMENDACIONES

Explorar la Implementación de un modelo para tratamiento de aguas residuales, por ser el área de investigación con mayores antecedentes bibliográficos con conclusiones positivas, lo que podría darle más opciones de aplicación sobre todo en el área industrial o comercial, donde el tema de la sostenibilidad operativa cuenta con más recursos financieros.

Explorar la posibilidad para el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones de emergencia, donde la aplicación se realiza de manera temporal y el tema financiero es superado contra la priorización del tema social.

Investigar el efecto de tipos de materiales en la elaboración de la celda, como fibra de vidrio para la celda o en cuanto a placas con materiales de costos menores como aluminio o acero.

BIBLIOGRAFÍA

Arango Ruiz, Álvaro; Garcés Giraldo, Luis Fernando. *“Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea”*. Universidad EAFIT. Julio – septiembre, año/vol. 43, número 147-2007. Medellín. 2007.

Arango Ruiz, Álvaro; Garcés Giraldo, Luis Fernando; Restrepo, Ana Patricia. *“La electrocoagulación retos y oportunidades en el tratamiento de aguas”*. Revista Producción + Limpia”. Edición julio-diciembre 2006.

Aristizábal Castrillon, Adriana; Bermudez Agudelo, María Catalina. *Estudio de factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso*. Tesis de Ingeniería Química, Universidad pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química, Medellín, Colombia. 2007.

Hernández Lehmann, Pablo Santiago. *Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación*. Tesis de Doctorado en Ingeniería de Canales, Caminos y Puentes, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, 2011.

Jaramillo Páez, Cesar Augusto; Jaramillo Giraldo, Alexander; Tarborda Ocampo, Gonzalo. *Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en descomposición de aguas residuales*. Revista de Universidad de Caldas, julio – diciembre 2005.

Morales Posada, Nelly; Acosta Niño, Gema. *“Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas*

residuales galvánicas”. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20-1, Bogotá, junio de 2010.

Papaleo Tamayo, Martín Adolfo y Rodriguez, Stephen Enrique. *Diseño y construcción del prototipo de un sistema de electrocoagulación de tratamiento de aguas residuales*. Tesis de Ingeniería Electrónica, Universidad de San Buenaventura Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Energía Electrónica, Santiago de Cali, Colombia, 2011.

Reyes Ávila, Deisy; Mercado Martínez, Iván Darío. *Estudio de tratabilidad por electrocoagulación de los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda*. Tesis de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2003.