

La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas

Ana Patricia Restrepo Mejía / Álvaro Arango Ruiz² / Luis Fernando Garcés Giraldo³
Línea de investigación: Tratamiento de aguas

Electrocoagulation: Challenges and opportunities in water treatment

RESUMEN

La electrocoagulación es una tecnología limpia emergente que se conoce desde principios del siglo XX y ha sido aplicada en el tratamiento de diversas aguas residuales. Pese a ello, esta tecnología no se ha desarrollado ampliamente y aún falta mucho por investigar sobre sus procesos y mecanismos.

En este artículo se hace una revisión de la electrocoagulación, presentando su evolución histórica, discutiendo los retos y oportunidades de esta tecnología, presentando su potencial de aplicación además de sus ventajas y, finalmente, se plantean los mecanismos de reacción y el diseño y operación de los reactores.

Desde esta perspectiva, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación optimizando los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico.

Palabras clave: Tratamiento de aguas residuales. Electrocoagulación. Electrólisis. Electroodos. Coagulación. Electroflotación.

ABSTRACT

Electro coagulation is a clean technology known since the very beginning of the 20th Century, and has been applied on the treatment of diverse waste waters. Despite this, electro coagulation has not been widely developed and there is still a lot of research to be made concerning its processes and mechanisms.

¹ Ingeniera Química. Magíster en Ingeniería Ambiental. Profesora de la Maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana. / ²Ingeniero Químico. Especialista en Ingeniería Ambiental. Candidato a Maestría en Ingeniería Ambiental. Profesor del Programa Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingenierías de la Corporación Universitaria Lasallista. / ³ Ingeniero Sanitario, Magíster en Ingeniería Ambiental, Especialista en Cuenas Hidrográficas y Especialista en Ingeniería Ambiental. Director del grupo de investigación GAMA Decano Facultad de Ingenierías, Corporación Universitaria Lasallista

In this article we make a review of electro coagulation, showing its historical evolution, discussing about its challenges and opportunities, presenting its potential applications, its advantages and, finally, proposing the reaction mechanisms and the design and operation of the reactors.

From this perspective, electro coagulation turns into an electric and chemical process that can be successful when applied by optimizing the factors that conform it, thus achieving the goal of protecting, keeping and recovering the water resources.

Key words: Waste water treatment. Electro coagulation. Electrolysis. Electrodes. Coagulation. Electro flotation

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la humanidad enfrenta la que quizás sea una de las mayores problemáticas del siglo XXI, y es la necesidad de proveer agua para una creciente población mundial. Se requiere satisfacer las demandas de agua potable, de aguas de riego y de agua para la industria. El panorama es tal que se estima que 1,1 billones de personas, el equivalente a una sexta parte de la población mundial, no tienen garantizado el acceso al agua potable¹ y 2.2 billones no cuentan con servicios básicos de saneamiento.² Entre tanto, la demanda de agua va en aumento en relación con el agua disponible y existe una sobreexplotación de las fuentes, además de contaminación, mal uso y desperdicio por la utilización de sistemas de distribución inadecuados e ineficientes.

Alrededor del mundo los lagos, ríos, canales y otros cuerpos de agua son contaminados por descargas industriales, por la actividad antropogénica o por procesos naturales. En los países en desarrollo un 70% de los desechos industriales se vierten al agua sin tratamiento alguno, contaminando así el agua disponible y más del 80% de los desechos peligrosos del mundo son producidos en los Estados Unidos y en otros países industrializados.³

Muchas regiones del planeta sufren por la escasez de agua, mientras que en otras el problema no es la falta del recurso, sino su mala gestión y distribución, además de los métodos empleados para ello. Es por esto que uno de los mayores desafíos que enfrenta hoy en día la humanidad es el de proporcionar agua, principalmente potable, a la inmensa mayoría de población mundial, siendo una necesidad particularmente crítica en los países en vía de desarrollo debido a factores como la pobreza y, como se dijo anteriormente, a la poca disponibilidad del recurso y su mal manejo.

El uso del agua a nivel mundial se distribuye entre doméstico, industrial y agrícola. Para los países desarrollados 11% se utiliza para fines domésticos, 59% para la industria y 30% para la agricultura, mientras que para los países en vía de desarrollo sólo el 8% tiene uso doméstico, 10% para la industria y el 82% para la agricultura.³ A nivel global el 70% del agua dulce es demandada por la agricultura y el 22% por

la industria.⁴ Es importante resaltar que en la actualidad la población mundial es cuatro veces mayor que hace 100 años, mientras que el consumo de agua se ha multiplicado por 9 y la necesidad de agua industrial por 40.^{5,6}

Frente a esta problemática mundial en torno al agua, los países desarrollados como Estados Unidos y los países de la Unión Europea están experimentando la necesidad de tratar sus aguas residuales para evitar o controlar la contaminación de su recurso hídrico y garantizar su disponibilidad para los diferentes usos. Al mismo tiempo se han visto en la necesidad de desarrollar una serie de estrategias de manejo sustentable del agua.⁷

El reuso y recirculación son operaciones que hacen parte de las estrategias de manejo del agua. Sin embargo es necesario realizar tratamientos a los efluentes. Estos tratamientos deben ser adecuados para el propósito, tener una alta eficiencia, bajos costos y adicionalmente traer ventajas ambientales. Por consiguiente es importante desarrollar técnicas innovadoras que entren a competir técnica, económica y ambientalmente con las tecnologías tradicionales. Dentro de las tecnologías tradicionales se encuentran procesos biológicos y procesos físico-químicos. Los procesos físico-químicos más comunes son: filtración, intercambio iónico, precipitación química, oxidación química, adsorción, ultrafiltración, ósmosis inversa y electrodiálisis, entre otros.

Hoy en día existen una serie de tecnologías emergentes que están basadas en la electroquímica y que actualmente se presentan como alternativas que ofrecen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales. Se puede mencionar en este grupo la electrocoagulación, la electroflotación y la electrodecantación.^{7,8}

La electrocoagulación, aunque no es una tecnología nueva, ha sido poco estudiada y desarrollada. Pese a esto, ha logrado alcanzar un aprovechamiento comercial importante en el tratamiento puntual de algunos contaminantes, ubicándose como una técnica con mayores ventajas comparativas con respecto a las tecnologías tradicionales de tratamiento. Por ésta razón en los últimos años ha cobrado interés científico, pues se necesita entender a fondo el proceso y sus mecanismos.

HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

La electroquímica es una ciencia que nace a finales del siglo XVIII con los trabajos de Galvani y Volta, y ha tenido desarrollos y aplicaciones en múltiples áreas. Podemos mencionar su uso en el arranque de los motores de los automóviles, en procesos de síntesis química y métodos para la eliminación de la contaminación.⁹

La electrocoagulación ha sido una tecnología emergente desde 1906, con la primera patente concedida en Estados Unidos. Problemas de tipo financiero o de regulación de incentivos generaron tropiezos para que la industria adoptara esta técnica, pero se conocen desarrollos anteriores. Desde el siglo XIX, exactamente en 1888, se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster. Su proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, con una caída de potencial de 1.8 vatios entre los electrodos, distantes una pulgada, y una corriente anódica de 0.6 Amp/pie².¹⁰

En 1893, Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica, que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY.¹¹ En 1896 se usó en Lousville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizaron ánodos de hierro y aluminio.^{7,12} En 1908 el proceso Webster se utilizó en Santa Mónica, con reducciones de 40% de materia orgánica.

En 1914 se utilizó en New York una modificación del proceso Webster llamado Landreth. En éste se añade cal para mejorar la conductividad del electrolito. En 1932 fue utilizada la electrocoagulación en Alemania, con eficiencias del 50% en reducción de la DBO de aguas residuales. La falla de estos procesos se dio por el alto costo de la energía y la necesidad de recambiar los electrodos.

En 1947, en URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido ferroso, obteniendo remociones de 70% al 80% para la DBO. Unos años más tarde, en 1958, el profesor Mendía, de la Universidad de Nápoles, utilizó esta técnica para desinfectar las aguas negras de ciudades costeras. En este proceso se mezcló 25% al 30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis. En Noruega, Föyn combinó 20% de agua de mar con las aguas residuales en la electrólisis para la remoción de fosfato, utilizando electrodos de carbón. Aunque la eficiencia del proceso fue buena, hubo problemas de corrosión.¹⁰

Durante las dos últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza el proceso para remover partículas dispersas de aceite¹², grasa y petróleo en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos de electroplateado, textiles y en procesos de potabilización del agua misma¹³, entre otros.

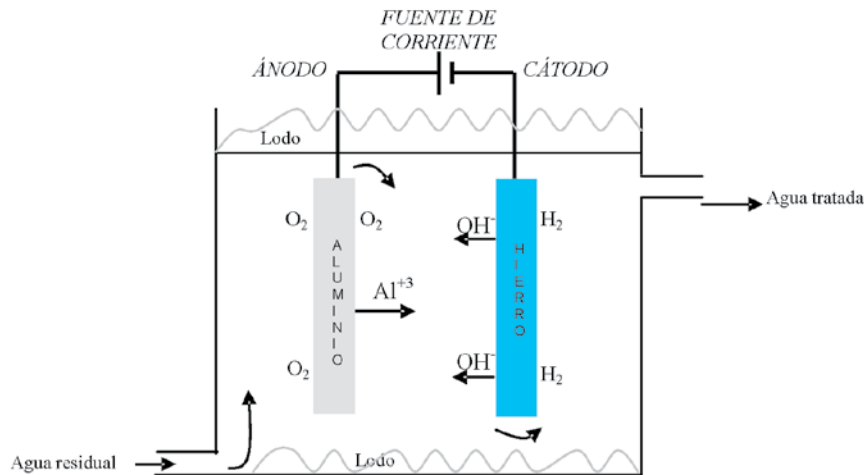
LA ELECTROCOAGULACIÓN

La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico (cuya función es llevada a cabo por corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido contaminado, como se muestra en la figura 1). Podemos entonces

definir la electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados.^{1,8,14}

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados.^{1,14,15}

Figura 1. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro.



Retos y oportunidades

A pesar de que la electrocoagulación es una tecnología que se conoce hace ya más de cien años, no se ha desarrollado una investigación sistemática que pueda predecir el proceso desde su comportamiento químico, reacciones y mecanismos, ni provea las herramientas suficientes para el diseño y operación de los reactores. Es importante aclarar que en las diferentes publicaciones que se han venido haciendo sobre el tema se encuentran una serie de diseños a escalas de laboratorio y piloto, pero no hay diseños de reactores prototipos en uso hoy en día. La literatura disponible básicamente se limita a comparar los trabajos reportados^{2,7,13}. Esto se ha dado en parte por la reputación que ha adquirido la electrocoagulación como tecnología demandante de electricidad, la que puede ser costosa en muchos lugares obligando a que se abandonen sus estudios sin un análisis más detenido, y, por otra parte, a que esta tecnología se ha aplicado

de manera empírica en muchos casos y como tratamiento puntual sobre un contaminante específico.

En los últimos años, y debido a la imperante necesidad de investigar, adaptar e implementar tecnologías eficientes en la remoción de contaminantes de diversas aguas residuales, se ha vuelto a considerar la electrocoagulación como alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos, cobrando un importante interés científico e industrial, hecho éste que permitirá avanzar sobre los escollos que han dejado a esta tecnología rezagada durante varias décadas. Es así como nos enfrentamos al reto de investigar los parámetros que controlan el proceso de electrocoagulación de manera organizada y sistemática, de una forma que permita diseñar el proceso en su totalidad, desde su requerimiento de energía hasta su reactor para así optimizarlo, adaptarlo y aplicarlo, ubicando dicho proceso como una tecnología de punta que brinde sus ventajas en la protección y conservación del recurso hídrico.

Aplicaciones de la electrocoagulación: Se ha aplicado la electrocoagulación para la remoción de diversas aguas residuales. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis (electroflotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante. Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas.^{13, 16, 17}

Una de las aplicaciones más conocidas y populares de la electrocoagulación ha sido el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico^{13, 17-19}, proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante.¹¹

La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes, utilizan en sus procesos cromo (+6), elemento de una alta toxicidad. Las descargas de cromo son muy reguladas a nivel mundial y para su remoción se utilizan métodos convencionales que incluyen adsorción, precipitación química y degradación biológica, entre otros. La electrocoagulación combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo en esta agua residual. Este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5ppm 20.

La industria mecánica, las refinerías, los talleres de reparación automotriz, el transporte y la distribución y almacenamiento de aceites, producen aguas residuales con altos contenidos de elementos propiamente aceitosos y grasos, que se caracterizan por presentar una gran estabilidad química de sus emulsiones aceite-agua. Esto representa una problemática ambiental importante. La electrocoagulación ha mostrado alta efectividad en desestabilizar dichas emulsiones y la consecuente remoción de los aceites y grasas.²¹⁻²³

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria²⁴⁻²⁷, estas aguas se caracterizan por altos contenidos de DBO y DQO además de altos porcentajes de grasas. Una investigación

realizada con las aguas residuales de los restaurantes de Hong Kong, las cuales fueron tratadas por electrocoagulación y electroflotación, mostró remociones de 99 y 88 % en grasas y DQO respectivamente.²⁴

Una de las áreas de aplicación en las cuales se han desarrollado algunos avances importantes de esta tecnología y que incluso ha tenido mayor implementación de la misma, es el tratamiento de las aguas residuales de lavanderías, tintorerías e industria textil, obteniendo eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica, turbiedad y color.²⁸⁻³⁴

La electrocoagulación también ha sido probada en la potabilización de aguas. Es importante resaltar que el paso de la corriente eléctrica a través del agua a tratar tiene efecto desinfectante en cuanto que destruye, en porcentajes por encima del 99%, los microorganismos presentes en el agua.³⁵ En esta misma aplicación se ha venido estudiando la electrocoagulación con buenos resultados en el tratamiento de aguas para consumo humano contaminadas con arsénico, contaminación ésta que puede afectar la salud de la población mundial ya que puede ocurrir en cualquier región o país.³⁶

Otras posibles aplicaciones de la electrocoagulación están dadas en la remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos.³⁷

Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO en aguas residuales domésticas y efluentes de la industria de los colorantes.^{31,35}

Ventajas: Son muchas las ventajas de la electrocoagulación. Entre las más relevantes están:

- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.³⁵
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.⁷
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.³⁵
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.³⁵
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.⁷
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.^{18,35}
- Purifica el agua y permite su reciclaje.

- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.⁷
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.⁷
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.⁷
- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad.^{1,7}

Desventajas: Las principales desventajas del proceso de electrocoagulación son:

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.⁷
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.⁷
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.⁷
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.⁷

Mecanismos y Reacciones

Proceso de electrocoagulación: Durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que permiten la remoción de los contaminantes. Estos procesos se pueden describir de la siguiente manera:

En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos. A este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse.

Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los contaminantes e iniciando así el proceso de coagulación.

Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de contaminantes que se puede dar por dos vías: la primera por reacciones químicas y precipitación y la segunda procesos físicos de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar.

Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres. Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua- contaminantes, que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua.⁷

De acuerdo con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema.⁸

A diferencia de la coagulación química, proceso en el cual el coagulante es adicionado al sistema como agente químico, en la electrocoagulación el coagulante es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio. Como se explicó anteriormente, la producción de iones metálicos se da en el ánodo³⁸ y son los iones que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que hace las veces de coagulante.³⁹

Según es expuesto por Mohllah et al.⁷, se considera que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y, finalmente, se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante.

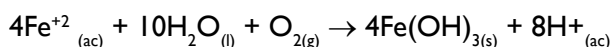
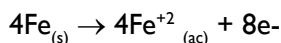
Reacciones involucradas en la electrocoagulación: Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. La bibliografía referenciada trata ampliamente estas reacciones, no sólo para hierro y aluminio, sino también aquellas reacciones que ocurren cuando los electrodos son de otros metales o materiales.

El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad. Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante.

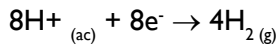
Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ o hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$.^{7,33,39}

Mecanismo I: Formación del hidróxido férrico

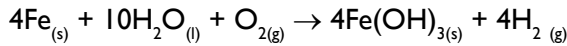
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:

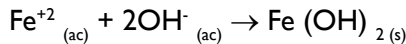
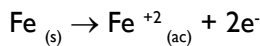


Reacción global:

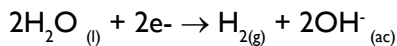


Mecanismo dos: Formación del hidróxido ferroso

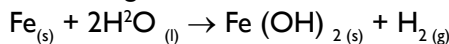
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



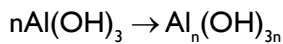
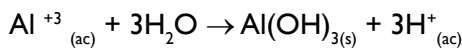
Reacción global:



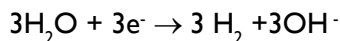
Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas.³⁹

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes.^{7,30,33}

En el ánodo:



En el cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, y otras poliméricas, tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes.^{13,33.}

Diseño y operación del reactor de electrocoagulación

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar.

Analizando el reactor tipo batch, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas,

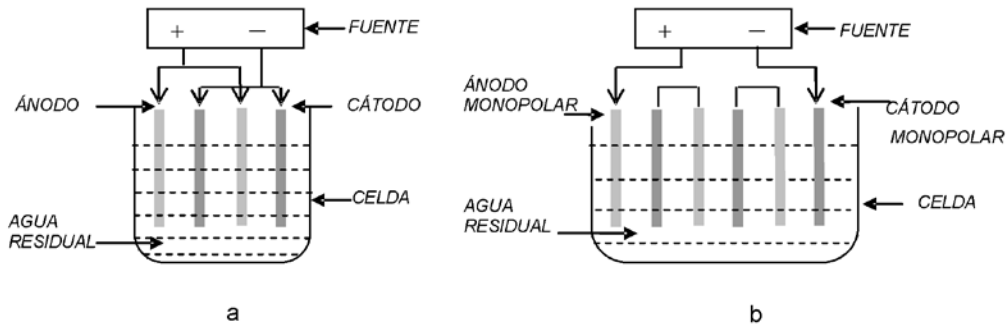
Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso, a saber: flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante, reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación.¹

La separación por sedimentación es la más común. La densidad de corriente empleada en el reactor determina la cantidad de burbujas generadas. Se ha podido observar de la experimentación que a bajas corrientes se producen bajas densidades de burbujas, obteniéndose un bajo flux de momentum hacia arriba que hace que predomine la sedimentación sobre la flotación. Situación contraria se presenta cuando se aumenta la corriente, pues la densidad de burbujas aumenta resultando en un aumento del flux de momentum hacia arriba, favoreciendo la flotación de las partículas contaminantes.^{1,8}

Los procesos que utilizan sólo coagulación pueden combinarse con otras tecnologías para lograr la separación del contaminante. Estas tecnologías pueden ser: flotación por aire disuelto, electroflotación, filtración y clarificación.^{10,24} Estas combinaciones de técnicas de separación con el proceso de electrocoagulación se pueden llevar a cabo integrando ambas tecnologías en el diseño del reactor o se pueden presentar en unidades separadas. Es importante señalar que la combinación de estas tecnologías y su diseño dependen en gran medida de las propiedades y características que tenga el agua residual a tratar y sus contaminantes. Es, además, importante considerar el uso del efluente.

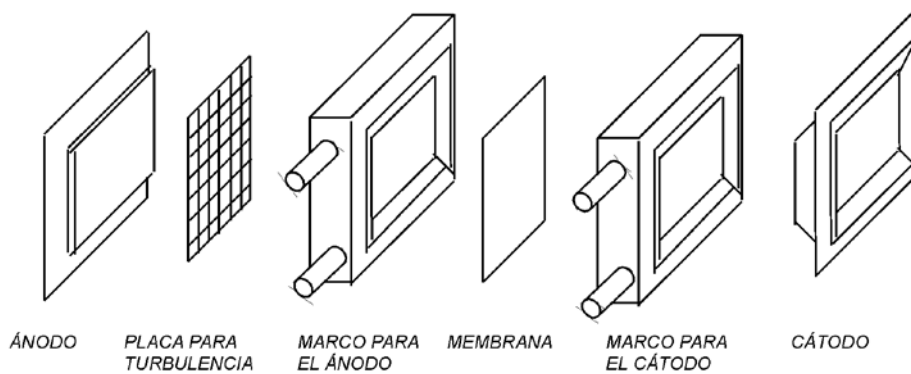
Se ha observado que cuando en el reactor se usan dos placas, una como ánodo y otra como cátodo, no se presenta una buena disolución de iones metálicos. Para mejorar esta disolución se debe aumentar el área superficial de los electrodos, lo cual se logra aumentando el número de placas, disponiéndolas en serie en forma paralela monopolar o bipolar^{17,28} como se muestra en la figura 2.

Figura2. Reactores para electrocoagulación tipo bach:
(a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo,
(b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.



Existen otros tipos de reactores para la electrocoagulación. Uno de ellos es el tipo filtro prensa, constituido por un par de marcos. Uno de ellos soporta el ánodo y el otro el cátodo en forma de placas, de manera que su acople forma una cámara como se muestra en la figura 3.¹⁴ El agua a ser tratada entra por la parte lateral a la cámara y es inducida a flujo turbulento, para incrementar la eficiencia del proceso. Este sistema hace que su operación y mantenimiento sean relativamente simples.¹⁴

Figura3. Reactor tipo filtro prensa



Para la remoción de metales se usa el reactor de electrodo cilíndrico rotativo, en el cual el cátodo gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo, como se muestra en la figura 4.

Esta disposición permite aumentar la transferencia de masa en los electrodos y remover partículas de metal del cátodo. Finalmente, también es usado para la remoción de metales el reactor de lecho fluidizado, mostrado en la figura 5. Éste permite aumentar el área específica superficial, mejorando la eficiencia del proceso.¹⁴

Figura4. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo

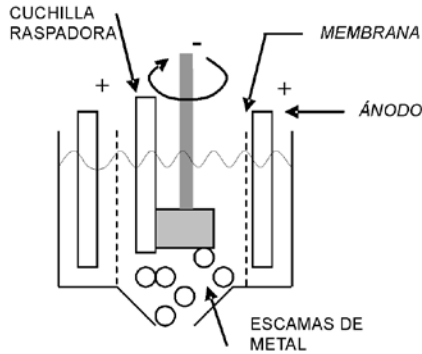
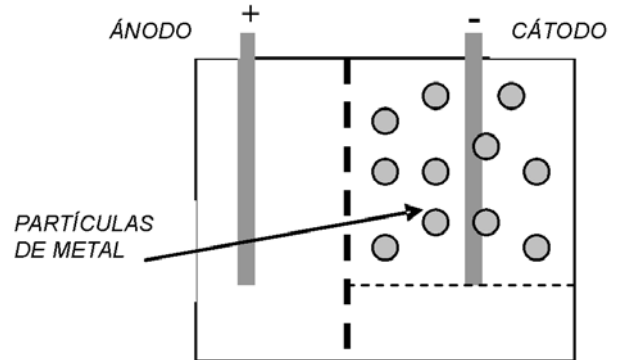


Figura5. Reactor de lecho fluidizado



Los materiales usados en el ánodo deben ser dimensionalmente estables, por ejemplo como el acero que se utiliza en los reactores para la recuperación de metales. Los electrodos más modernos son fabricados de titanio con una pequeña capa de óxidos de metales nobles. Sin embargo, el material más comúnmente utilizado es el aluminio. El cátodo puede ser de metal, grafito, fibras de carbón, acero o titanio.¹⁴

Factores que afectan la electrocoagulación

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso. A continuación discutiremos aquellos que se relacionan más directamente con la efectividad del mismo.

pH. El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido¹⁴. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación^{28, 30, 33, 36, 38} y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar.^{30,33} El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas,^{28,32} efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo.^{28,32,36} En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso.

Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio.^{33,36} En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7.¹⁴ Ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8,³⁶ y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan en un pH de 7.^{30,33}

Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer. Especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH,³⁰ con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH.

Densidad de corriente. Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio.¹

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente.^{22,41} Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso.³⁹

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos.

En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante.³³ Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura.¹⁴

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción.⁷

Conductividad: Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado.^{33,40}

La adición de algunos electrólitos tales como $NaCl$ o $CaCl_2$ generan un aumento en la conductividad del agua residual.^{41,42} Además se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO_3^- y SO_4^{2-} , pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca^{+2} y Mg^{+2} produciendo una capa insoluble depositada sobre los elec-

trodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl^- alrededor del 20%.¹⁴

Temperatura. Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo.

En la tabla I se presenta un resumen de algunas investigaciones, mostrando los valores de las variables más importantes en el proceso y la remoción alcanzada para diversos contaminantes en distintas aguas residuales industriales.

Costos

El proceso de electrocoagulación permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica y ambiental para el tratamiento de las aguas residuales de muchas industrias. El capital y los costos de operación son mucho menores comparativamente con un tratamiento por coagulación química, incluso se puede llegar a recuperar los costos de capital en menos de un año.³⁶ Estos costos dependen del caudal a tratar, de la naturaleza del agua residual, de los contaminantes a ser removidos y de la región o localidad en la que se desea realizar el tratamiento.

Se ha estimado que los costos de operación para tratar por electrocoagulación 1'500.000 GPA (5 GPM) de agua residual con contenidos de TSS, grasas y aceites, y algunos metales como níquel y zinc, es de US\$ 1.500, mientras que los costos para tratar la misma agua residual por medio de coagulación química es del orden de US\$ 45.000, para un ahorro anual del orden de US\$ 43.500 cuando se aplica electrocoagulación en lugar de coagulación química. Estos costos no incluyen transporte y disposición de lodos ni mano de obra.³⁵

Cuando se compara la coagulación con alumbre y la electrocoagulación, este último tratamiento produce 83% menos volumen de lodos que el primero, lo cual representa diferencias significativas en los costos del transporte y disposición final de los lodos.

Los costos de operación dependen en buena medida del material de los electrodos. Por ejemplo, cuando se trata el agua residual de la industria textil por electrocoagulación con electrodo de hierro como electrodo de sacrificio, los costos de operación son del orden de US\$ 0.1 por kg de DQO removido y cuando el electrodo de sacrificio es de aluminio, su costo de operación es del orden de US\$ 0.3 por kg de DQO removido³³. Los costos del electrodo de sacrificio son alrededor del 50% de los costos totales para el hierro, y del 80% para el aluminio.

Tabla 1. Valores de diferentes variables en el proceso de electrocoagulación para distintos contaminantes de diversas fuentes de aguas residuales.

Agua residual	Corriente	Ánodo / cátodo	Parámetro eléctrico	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	pH	Contaminante	Remoción %	Tiempo (min)	Referencia
Colorantes textiles	CD	Al/Fe	$\geq 150 \text{ A/m}^2$	1000-4000	3-6	Turbiedad	98	15	33
						DQO	61-65		
		Fe/Al	80-100 A/m^2	1000-4000	3-7	Turbiedad	75-98	10	
						DQO	47-77		
Electroplateado, industria del Cr, fer-tilizantes e industria de los metales.	--	Fe/Fe	30 A/m^2	1500	5-6	Turbiedad	87	--	20
						DQO	26		
Restaurantes	CD	Al/Al	1,8-6,8V	1290	6,94	Cr ⁺⁶	97	15	14
						DQO	67		
						Grasas y aceites	>97		
Alimentos(gelatinas)	CD	Fe/Al	6,26 A/m^2	1,2Mhos	10,86	SS	90	15	16
						Grasas y aceites	Agua cruda 1195ppm		
						DQO	Agua tratada 115ppm		
						DQO	Agua cruda 3104ppm		
Lavandería	CA	Al/	32V/30A	--	5-9	DQO	70	5	28
						Turbiedad P-fosfato surfactante	90		
Agua consumo humano		Fe/	1,53 A/m^2	--	6-9		>99	20	36
		Al/				37			
		Ti/				>58			
Industria del boro	CD	Al/	1,2-6 mA/cm^2	bajos	8	B	97	--	41
						estireno	Remanente 7%		
Suspensión de látex	CD	Fe/Fe	1,1 A/Dm^2	0,6-1 S/m	6,5-7	vinilo	Remanente 8%	26	38
						color	96		
Industria semiconductores (pulido mecánico químico)	CD	Al/Fe	93 A/m^2	450-470	7,3	Cu	99	< 30	19
						DQO	88,7		
						DQO	76		
Producción aceite de oliva	CD	Al/	75 mA/cm^2	--	4-6	polifenoles	91	25	22
						color	65		

También se ha observado que la densidad de corriente influye sobre los costos operativos, en general el comportamiento depende del material del electrodo gastado. Para la industria textil³³, en el caso del hierro hay un comportamiento lineal de los costos. Para incrementos de densidad de corriente de 50 a 200 A^{m-2} los costos de operación se incrementan del 48% al 62%, mientras que para el aluminio hay una disminución de los costos de operación por kilogramo de DQO removido de alrededor de 100 A^{m-2}.

Finalmente la inversión inicial involucra los costos de la fuente de energía y la celda, además de adecuaciones y otros equipamientos. Este costo inicial es del orden de US\$ 107.000 para tratar 1,5 GPM, y de US\$ 112.000 para tratar 3GPM.³⁵

CONCLUSIÓN

La electrocoagulación es en la actualidad una tecnología emergente que se presenta como alternativa para el tratamiento de aguas residuales, ofreciendo un potencial muy grande en la remoción de muy diversos contaminantes contenidos en las aguas residuales de diferentes fuentes.

Aunque ésta técnica es conocida hace ya algunas décadas y aplicada en muchos casos es aún tema de investigación y experimentación, pues se ha comenzado a recobrar el interés en ella debido a sus potencialidades en la aplicación, facilidad de manejo y operación, versatilidad y adaptabilidad a diferentes procesos y a sus ventajas ambientales y económicas. Es así como el diseño de reactores para la electrocoagulación, la selección de los materiales de los electrodos y las condiciones de operación son aspectos que se deben perfeccionar mediante la investigación, para optimizar los procesos y hacerlos económicamente competitivos.

Sin duda alguna la necesidad de proveer agua para la inmensa demanda mundial y la crisis por el recurso hídrico, constituyen un desafío que requiere atención urgente. La electrocoagulación, como tecnología de alto rigor científico, tiene un significativo valor como parte de la solución global a este problema.

El enfoque que se presenta de esta tecnología es positivo y pretende sentar un precedente y ahondar en todos los aspectos que la hacen completa, pertinente y observada como uno de los mejores modelos, con un gran alcance de aplicación y un muy significativo impacto en la población mundial.

La investigación que se realice en un futuro inmediato del proceso de electrocoagulación tendrá como antecedentes las revisiones y los experimentos que se hayan estructurado para alcanzar su objetivo, la optimización de la tecnología y de las alternativas en el aprovechamiento de las mismas.

Los costos de montaje y operación son fundamentales en la aplicación de esta tecnología. Es por esto que cada caso en particular requiere de un estudio y análisis minucioso de los aspectos técnicos y económicos del proceso.

REFERENCIAS

1. HOLT, Peter K.; BARTON, Geoffrey W. and MITCHELL, Cynthia A. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. In: *Chemosphere* Vol.59, No. 3 (apr. 2005); p.355–367.
2. ORGANIZACIÓN DE ESTADOS IBEROAMERICANOS – OEI. Década por una educación para la sostenibilidad: Nueva Cultura del agua. [on line]. España: OEI, 2006. [citado el 10 de abril de 2006]. Disponible en: <http://www.oei.es/decada/accion06.htm>
3. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos: Resumen Ejecutivo Oficial del Informe (WWDR). Washington: Banco Mundial, 2001. [citado 11 de abril 2006] Disponible en http://www.unesco.org/water/wwap/facts_figures/agua_industria.shtml
4. UNESCO. 2003 año internacional del agua dulce. Hechos y cifras: agua dulce. [on line]. s.l.: UNESCO, 2003. [citado 11 de abril 2006] Disponible en: http://www.wateryear2003.org/es/ev.php-URL_ID=1607&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html
5. ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. El Agua. [on line]. Washington: BVSDE, 2004. [Citado mayo 25 de 2004]. Disponible en <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/e/elagua.html>
6. LIBHABER, Menahem. Manejo sostenible de las aguas residuales urbanas en países en vía de desarrollo. [on line]. En: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL. (24: 2004: San Juan, Puersto Rico). Memorias del XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS. San Juan: AIDIS, 2004. [citado 11 de abril 2006] Disponible en <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/puertorico29/libhaber/parte1.pdf>
7. MOLLAH, M.Yousuf A., et al. Electrocoagulation (EC)--Science and applications. In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 84, No. 1 (jun. 2001); p. 29–41.
8. RAJESHWAR, Krishnan and IBANEZ, Jorge. *Environmental electrochemistry: Fundamentals and Applications in pollution abatement*. San Diego, California: Academic Press limited, 1997. 776p.
9. GONZALEZ, J. et al. ¿What can electrochemistry do for the environmental?. In: *Portugaliae Electrochimica Acta* .Vol.19 (2001); p.171-195.
10. OROZCO JULIO, Alvaro. La densidad de carga del electrolito como parámetro de control del proceso de electrocoagulación. En: *Revista Ainsa*. Vol. 5, No. 2 (1985); p.3-30.
11. ADHOUM, Nafaâ et al. Treatment of electroplating wastewater containing Cu²⁺, Zn²⁺ and Cr(VI) by electrocoagulation. in: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 112, No. 3 (aug. 2004); p.207-213.
12. PETERSON. James W. *Industrial Wastewater Treatment Technology*. 2 ed. Stoneham, Ma.: Butterworth Publishers, 1985. p. 273-302.
13. HOLT, Peter; BARTON, Geoffrey and MITCHELL, Cynthia. Electrocoagulation as a Wastewater Treatment. In: *ANNUAL AUSTRALIAN ENVIRONMENTAL ENGINEERING RESEARCH*. (3: 1999: Castlemaine, Victoria). Proceedings The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event. Castlemaine, Victoria: The Event, 1999.

14. CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. In: Separation and Purification Technology. Vol. 38, No. 1 (jul. 2004); p. 11–41.
15. STEPHENSON, Rob and TENNANT, Bruce. New electrocoagulation process treats emulsified oily wastewater at Vancouver Shipyards. [on line]. Vancouver: Environmental Science & Engineering, 2003. [citado 11 de abril 2006] Disponible en: <http://www.esemag.com/0103/electro.html>
16. MORANTE, Gonzalo. Electrocoagulación de aguas residuales. En: Revista Colombiana de Física. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Vol. 34, No. 2 (2002); p.484-487.
17. JIANG, Jia-Qian, et al. Laboratory study of electro-coagulation–flotation for water treatment. In: Water Research. Vol. 36, No. 16 (sep. 2002); p.4064–4078.
18. MOLLAH, Mohammad et al. Fundamentals, Present and future perspectives of electrocoagulation. In: Journal of Hazardous Materials. Vol. 114, No. 1-3 (oct. 2004); p.199-210.
19. LAI, Chen L. and LIN, Sheng. Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics. in: Chemosphere Vol. 54, No. 3 (jan. 2004); p. 235–242.
20. PING, Gao, et al. Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation– electro flotation without a filter. In: Separation and Purification Technology. Vol. 43, No. 2 (may. 2005); p. 117-123.
21. BERGMANN, H. et al. Electrochemical treatment of cooling lubricants. In: Chemical Engineering and Processing. vol. 42, No. 2 (feb. 2003); p. 105-119.
22. ADHOUM, Nafaâ and MONSER, Lotfi .Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. In: Chemical Engineering and Processing. Vol. 43, No. 10 (oct. 2004); p.1281-1287.
23. CHEN, Guohua; CHEN, Xueming, , and YUE, Po Lock. Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. In: Journal of Environmental Engineering. Vol. 126, No. 9 (Sep. 2000); p. 858-863.
24. WIBLBRETT, Gerard. Limpieza y desinfección en la industria alimentaria. Zaragoza: Acribia, 2000, 349p.
25. CENTRO DE ACTIVIDAD REGIONAL PARA LA PRODUCCIÓN LIMPIA (CAR/PL). Prevención de la contaminación en la industria láctea [on line]. Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, s.f. [Citado en mayo de 2002]. Disponible en http://www.medioambiente.gov.ar/ciplycs/documentos/archivos/Archivo_104.pdf
26. CHILE. COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE - REGIÓN METROPOLITANA. Guía para el control y prevención de la contaminación industrial. Fabricación de productos lácteos. [on line]. Santiago de Chile: La Comisión, 1998. [Citado en mayo de 2002]. Disponible en: www.conama.cl/portal/1255/articles-26238_pdf_lacteos.pdf
27. AYMERICH, Sigfrido. Conceptos para el tratamiento de residuos lácteos. Costa Rica: Centro Nacional de Producción Más Limpia, 2000. p.12.
28. GE, Jiantuan et al. New bipolar electrocoagulation– electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. In: Separation and Purification Technology. Vol.36, No. 1 (apr. 2004); p.33–39.

29. KIM, Tak-Hyun et al. Pilot scale treatment of textile wastewater by combined process: fluidized biofilm process–chemical coagulation–electrochemical oxidation. In: *Water Research*. Vol. 36, No. 16 (sep. 2002); p.3979–3988.
30. KOBYA, Mehmet , CAN, Orhan Taner and BAYRAMOGLU, Mahmut . Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 100, No. 1-3 (jun. 2003); p. 163– 178.
31. BRILLAS, Enric and CASADO, Juan. Aniline degradation by Electro- Fenton- and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater reactor for wastewater treatment. In: *Chemosphere*. Vol. 47, No. 3 (apr. 2002); p. 241–248.
32. MEJÍA ZAPATA, Claudia Isabel y OSORIO ECHEVERRI, Víctor Manuel. Decoloración de aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación. En: *Revista Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia*. Medellín. No. 29 (jun. 2003); p. 115-118.
33. BAYRAMOGLU, Mahmut, et al. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. In: *Separation and Purification Technology*. Vol.37, No. 2 (jun. 2004); p. 117–125.
34. KINÉTICA. Alternativas para Tratamiento y purificación del Agua por el método de electrocoagulación. [on line]. Cuernavaca, México: Revista Cultural Binacional, 2005. [citado en mayo de 2005]. Disponible en: www.geocities.com/seofeo555/Q003.html
35. POWELL WATER SYSTEMS. Powell Electrocoagulation: Sustentable Technology For the Future. [on line] Colorado: Powell Water Systems, 2001. p.2-27. [citado en marzo 16 de 2006]. Disponible en: www.powellwater.com/data/technical%20manual.pdf
36. KUMAR, P. Ratna, et al. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. In: *Chemosphere*. Vol. 55, No. 9 (jun. 2004); p. 1245–1252.
37. KOPARAL, A. Savas and OGUTVEREN, Ulker Bakir. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 89, No. 1 (2002); p. 83–94
38. ZINOLA, C.F. Electroquímica fundamental. Uruguay: DIRAC, Universidad de la República. CSIC, 1999
39. LARUE, O. et al. Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. In: *Separation and Purification Technology*. Vol. 31, No. 2 (may. 2003); p. 177-192.
40. CHEN, Xueming, CHEN, Guohua, and YUE, Po Lock. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. In: *Chemical Engineering Science*. Vol. 57, No. 13 (jul. 2002); p. 2449 – 2455.
41. YILMAZ, A. Erdem et al. The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method. In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 125, No. 1-3 (oct. 2005); p. 160-165.