

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## ELECTROCOAGULACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA DEPURACIÓN DE LACTOSUERO RESIDUAL

\* Francisco Prieto García<sup>1</sup>  
Judith Callejas Hernández<sup>1</sup>  
Víctor E. Reyes Cruz<sup>2</sup>  
Yolanda Marmolejo Santillán<sup>1</sup>

*ELECTROCOAGULATION: AN ALTERNATIVE FOR  
TREATMENT OF RESIDUAL WHEY*

*Recibido el 25 de abril de 2012; Aceptado el 12 de octubre de 2012*

### Abstract

The aim of this study was to gather the most relevant and current affairs has on the applicability of the technique of electrocoagulation in removing pollutants in aqueous solutions, as well as the potential to be applied in reducing the very high organic loads presented by the serum derived from the dairy industry in cheese making. A review of electrocoagulation, discussing the challenges and opportunities of this technology, showing its potential application, their advantages and ultimately raised the reaction mechanisms and the design and operation of the reactors. From this perspective, electrocoagulation becomes an electrochemical process that can have successful results in their application by optimizing the factors that shape it, reaching the challenge to protect, conserve and restore water resources. When the whey is also called economic advantage and becomes an aqueous waste is discharged to the canals of sewage, environmental impact magnified by the increase in COD. Apply new techniques to reduce organic loads with high efficiency in this type of waste is a challenge today.

**Keyword:** electrocoagulation; liquid effluents; chemical oxygen demand; zeta potential; efficiency.

<sup>1</sup> Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

<sup>2</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

\* *Autor correspondiente:* Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Ciudad Universitaria. Carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Pachuca, Hidalgo, México. Email: [prietog@uaeh.edu.mx](mailto:prietog@uaeh.edu.mx); [judith\\_callejas@yahoo.com.mx](mailto:judith_callejas@yahoo.com.mx)

## Resumen

El objetivo de este trabajo ha sido recopilar la información más relevante y de actualidad que se tiene acerca de la aplicabilidad de la técnica de electrocoagulación en la remoción de agentes contaminantes en disoluciones acuosas, así como la potencialidad de ser aplicada en la reducción de las elevadísimas cargas orgánicas que presenta el suero derivado de la industria láctea en la elaboración de quesos. Se hace una revisión de la electrocoagulación, 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. Así cuando el también denominado lactosuero no es aprovechado económicamente y se convierte en un residuo acuoso y vertido a los canales de aguas residuales, se magnifica el impacto ambiental por el incremento de la DQO. Aplicar nuevas técnicas de reducción de las cargas orgánicas con elevadas eficiencias en este tipo de residuos, es un reto de actualidad.

**Palabras clave:** electrocoagulación; efluentes líquidos; demanda química de oxígeno; potencial zeta; eficiencia.

---

## Introducción

El objetivo del presente trabajo ha sido realizar una revisión bibliográfica del estado actual sobre el tema de la electrocoagulación, como el desarrollo de una tecnología limpia que puede ser empleada para el tratamiento de lactosuero ácido, residuo de la industria láctea, e incluir la recuperación del fósforo presente en estos residuos.

La electrocoagulación (EC) es una técnica utilizada para el tratamiento de diversas aguas residuales. En este proceso son removidos los contaminantes que se encuentran suspendidos, emulsionados o disueltos en el medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en la fase acuosa a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados. En este caso la función de remoción de los contaminantes es llevada a cabo por la corriente eléctrica aplicada al medio contaminado (Arango *et al.*, 2009) y no se hace uso de un coagulante químico.

La tecnología electroquímica se considera normalmente como una técnica benigna o amiga del medio ambiente. Es muy adecuada para el tratamiento de las aguas residuales de diversa procedencia, recuperación de suelos contaminados, desalación de disoluciones, regeneración de oxidantes, reductores, bases y ácidos, entre otros y para la síntesis de diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos por su gran especificidad y economía. Las tendencias en los últimos, ha permitido observar que la electrocoagulación es capaz de tener una alta eficiencia de remoción de color, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y el logro de un tratamiento más eficiente y más rápido que la coagulación tradicional y a su vez, más económico que otros métodos de tratamiento tales como la utilización de la radiación ultravioleta (UV) y el ozono (Butler *et al.*, 2011).

Además, el empleo del electrón como reactivo no solo evita la utilización de reductores y oxidantes cuyos productos de oxidación o reducción suelen ser contaminantes, sino que también disminuye el número de etapas en la síntesis de diferentes compuestos disminuyendo de esta forma la contaminación originada por el proceso químico. Centrándonos en su aspecto medioambiental, las posibilidades de aplicación de la tecnología electroquímica son muy variadas y reafirman el carácter “verde” de esta tecnología. Según algunos autores la EC es la versión electroquímica de la coagulación química (Chen *et al.*, 2000; Morante, 2002; Adhoum *et Monser*, 2004).

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 se dispersan en el medio líquido; estos iones metálicos tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados (Arango *et Garcés*, 2009).

Los efluentes líquidos de diferentes procesos industriales han sido tratados mediante electrocoagulación, obteniendo resultados alentadores en la remoción de contaminantes (Giménez, 2001; Arango, 2005; Arango *et Garcés*, 2009); hecho que ha despertado el interés de la industria láctea por investigar e implementar esta tecnología en el tratamiento de sus aguas residuales y particularmente para el tratamiento de los residuos de quesería (suero lácteo).

### Aguas residuales

El agua es fundamental para la vida y es además un recurso natural no renovable, patrimonio común de la humanidad, por esto, es un deber hacer un buen uso de la misma. 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. La necesidad de proveer de agua y que satisfaga las demandas de agua potable, de aguas de riego y agua para la industria, crea el reto de investigar y adaptar tecnologías que permitan la protección, conservación y recuperación del recurso hídrico. A nivel mundial existen 1,100 millones de personas que carecen de agua y alrededor de 2,400 millones de personas no tienen acceso a sistemas de saneamiento (GEMS, 2004; Restrepo *et al.*, 2006). Algunas estimaciones muestran que entre cinco y seis millones de personas mueren anualmente por enfermedades transmitidas en agua contaminada y cerca de 1.3 millones de niños menores a cinco años, mueren a causa de enfermedades originadas por un consumo de agua de mala calidad (Cumbre de Johannesburgo, 2002; UN, 2008).

El 59% del consumo total de agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico. El sector productor no sólo es el que más gasta, también es el que más contamina. Más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles (UN, 2008). Estos datos aportan una idea de la importancia que tiene el tratamiento adecuado de los efluentes generados en las industrias, estos tratamientos deben satisfacer aspectos tales como ser adecuados para el propósito, tener una alta efectividad y ser de bajos costos, y adicionalmente traer ventajas ambientales.

El problema en México se agudiza debido al crecimiento de la población, que ya supera los 112 millones de habitantes, así como por la contaminación de sus aguas superficiales y freáticas (Carvalho *et al.*, 2002a; Carvalho *et al.*, 2002b; Valdez *et al.*, 2001; Rubio *et al.*, 2005; de la Mora *et al.*, 2005; Holguín *et al.*, 2006; Espino *et al.*, 2007; Gutiérrez *et al.*, 2008).

Las aguas residuales, tanto las de origen doméstico como las de origen industrial, producen una serie de alteraciones en los cursos y planos de agua debido a los diversos productos que contienen y que los ríos son cada vez menos capaces de asimilar. Los efluentes industriales contienen con frecuencia sustancias que no se eliminan por medio de tratamientos convencionales, bien por estar en concentraciones elevadas, o bien por su naturaleza química, emulsionada o de suspensiones coloidales extremadamente estables.

Entre los procesos convencionales para el tratamiento de aguas residuales se encuentran algunos procesos físicos, químicos, biológicos, biotecnológicos, etc. (Brown, 2001; Farré, 2007). Dentro de ellos la coagulación química, por ejemplo, consiste en la formación de lodos debido a la unión de coloides formando masas de tamaño considerable, para luego separarlas del agua mediante la adición de más químicos como el sulfato de aluminio, cloruro férrico, entre otros (Brown, 2001), mientras que los sistemas biológicos buscan transformar los contaminantes de naturaleza orgánica en nutrientes para los microorganismos del medio, y a su vez los convierten en tejido celular y en diversos gases. Este proceso se lleva a cabo en condiciones aerobias o anaerobias.

Los indicadores de calidad de las aguas se basan en el estudio de factores físico-químicos y se llevan a cabo mediante una toma de muestras de sistemas acuáticos, con la determinación de sus características físicas y análisis de sus componentes químicos. Estos métodos dan información valiosa, pero se refieren únicamente al instante en que se obtuvo la muestra; por tanto, pueden dar resultados muy alarmantes o, al contrario, pasar desapercibidos. No indican el estado anterior al de la toma de muestras ni la capacidad de recuperación natural después de

un aporte contaminante, tanto en el tiempo como en el espacio. Algunos tipos de indicadores físico-químicos son el color, la turbidez, el pH, la presencia de sistemas coloidales y de sustancias disueltas, suspendidas, totales, sedimentables y volátiles.

Cuando se analiza la viabilidad económica de proyectos con efectos ambientales es muy importante no considerar sólo los costes y beneficios internos sino también las externalidades ambientales derivadas, ya que, la mayoría de estos no tienen un precio regulado en el mercado por el impacto ambiental que se tiene (Hernández *et al.*, 2006; Hernández *et al.*, 2010).

El vertido de aguas residuales, según el proceso productivo, será continuo, con una entrada y salida continua de aguas, procesos de transporte, refrigeración, entre otras, o discontinuo, de menor caudal pero mucho más contaminado. Cada tipo de actividad industrial, según el proceso, vierte un agua residual caracterizada por una contaminación tipo determinada. De modo general se conocen los parámetros característicos de cada una de ellas, pero se precisa su determinación detallada para valorar su tratamiento y posterior incidencia en el medio receptor. En la tabla 1 se muestran el origen y las características de los vertidos más importantes y el tipo de industria que los producen y en ella se distinguen los vertidos acuosos con características de emulsiones y suspensiones (Nemerow, 1977).

La presencia de materia en suspensión suele ser indeseable en muchos procesos de tratamiento. La eliminación de estos sólidos suelen hacerse mediante operaciones mecánicas. Sin embargo, en muchos casos, y para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándolos así como tratamientos físico-químicos. En muchos casos parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño ( $10^{-6}$  –  $10^{-9}$  m), lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por tanto tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico. Una forma de mejorar la eficacia de todos los sistemas de eliminación de materia en suspensión es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y a continuación favorezcan la floculación de las mismas para obtener partículas fácilmente sedimentables. Es una operación que se utiliza a menudo, tanto en el tratamiento de aguas residuales urbanas y potables como en industriales. La presencia de materia en suspensión suele ser indeseable en muchos procesos de tratamiento. La eliminación de estos sólidos suelen hacerse mediante operaciones mecánicas. Sin embargo, en muchos casos, y para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándolos así como tratamientos físico-químicos. En muchos casos parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño ( $10^{-6}$  –  $10^{-9}$  m), lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por tanto tienen una velocidad de sedimentación

extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico. Una forma de mejorar la eficacia de todos los sistemas de eliminación de materia en suspensión es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y a continuación favorezcan la floculación de las mismas para obtener partículas fácilmente sedimentables. Es una operación que se utiliza a menudo, tanto en el tratamiento de aguas residuales urbanas y potables como en industriales.

**Tabla 1.** Vertidos importantes de las industrias (Nemerow, 1977)

Industrias que producen vertidos	Origen de los vertidos más importantes	Características
Textiles	Preparado de fibras: eliminación del apresto en el material base.	Muy alcalinos, coloreados, DBO y temperaturas altas, sólidos en suspensión altos.
Lavanderías	Lavado de tejidos.	Alta turbidez, alcalinidad, sólidos orgánicos.
Alimentos enlatados	Extracción del jugo tratamiento de los frutos y vegetales	Gran contenido de sólidos en suspensión, materia orgánica disuelta y coloidal.
Lechera	Dilución de la leche, mantequilla y suero	Alto contenido de materia orgánica disuelta, emulsiones estables.
Bebidas fermentadas y destiladas.	Maceración y prensado de grano, residuo de la destilación del alcohol, condensado de la evaporación de restos.	Gran contenido de sólidos en suspensión orgánicos disueltos que contienen nitrógeno y almidones fermentados.
Azúcar	Aguas de transporte, tamizado y extracción, condensados del evaporador.	Gran contenido en materia disuelto y en suspensión, contienen azúcar y proteínas.
Café	Descarrillado y fermentación del grano de café	Alto DBO y sólidos en suspensión.
Papel	Cocción, refinado, lavado de fibras, tamizado de la pulpa de papel.	pH alto o bajo, color, gran contenido en sólidos en suspensión.
Aceros	Coquización, lavado de los gases de la chimenea y limpieza del acero.	pH bajo, ácidos, cianhídrico, fenol, cascarilla y finos sólidos en suspensión.
Campos de petróleo y refinerías	Lodos de perforación, sales, aceites y algunos gases naturales.	Gran contenido de sales disueltas, DBO alto, compuestos sulfhídricos, emulsiones y sólidos suspendidos.

### Tratamientos para la eliminación de Sólidos Coloidales (SC)

Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa

( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) junto con polielectrolitos orgánicos, cuyo objetivo también debe ser favorecer la floculación.

Los procesos electroquímicos están basados en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Por tanto se utiliza energía eléctrica como vector de descontaminación ambiental, siendo su costo uno de las principales desventajas de este proceso. Sin embargo como ventajas cabe destacar la versatilidad de los equipos, la ausencia tanto de la utilización de reactivos, como de la presencia de fangos y la selectividad, pues controlar el potencial de electrodo permite seleccionar la reacción electroquímica dominante deseada.

Un método alternativo para el tratamiento de aguas puede ser la aplicación de tecnologías electroquímicas. Estas toman como ventaja la química de acoplamiento (generación in situ de oxidantes) con la transferencia de electrones. Se ha probado que estas tecnologías resultan ser limpias, flexibles y una herramienta poderosa que permitirá en un futuro próximo, el desarrollo de nuevos métodos para el tratamiento de aguas, una vez puesta a punto y optimizadas las variables involucradas en estos procesos. Del mismo modo, los tratamientos electroquímicos son, generalmente, caracterizados por un equipo simple, operación sencilla, tiempo de retención breve y adición de químicos insignificante (Giménez, 2001; Drogui *et al.*, 2007).

Las consecuencias de las reacciones que se producen en estos métodos pueden ser indirectas, como en el caso de la electrocoagulación, electroflotación o electrofloculación, donde los productos formados por electrolisis sustituyen a los reactivos químicos. Los beneficios de usar tecnologías electroquímicas incluyen: compatibilidad ambiental, versatilidad, eficacia energética, seguridad, selectividad, disponibilidad para la automatización y efectividad en los costos.

#### La industria láctea y sus residuos

Los procesos que se llevan a cabo en el sector lácteo son muy variados, tanto como los productos lácteos presentes en el mercado. Debido a su complejidad, no es posible generalizar sobre la contaminación generada, que será muy específica de acuerdo al tipo de producto.

En las centrales lecheras se producen diariamente una considerable cantidad de aguas residuales, que suelen oscilar entre 4 y 10 L de agua por cada litro de leche tratada, según el tipo de planta. La mayor parte de éstas proceden fundamentalmente de la limpieza de aparatos, máquinas y salas de tratamiento, por lo que contienen restos de productos lácteos y productos químicos (ácidos, álcalis, detergentes, desinfectantes y otros), aunque también se vierten aguas

de refrigeración que, si no se recuperan de forma adecuada, pueden suponer hasta 2-3 veces la cantidad de leche que entra en la central.

Algunos procesos generadores de efluentes en la industria láctea son (Veisseyre, 1988):

1. Recepción de la leche: Se recibe en cisternas y se termiza a 65 °C para eliminar gran parte de los microorganismos, se enfría a 4 °C y se transporta a los silos de almacenamiento. La limpieza de las cisternas genera residuos donde la cantidad de grasa es abundante, ya que el propio transporte de la leche provoca un desnatado parcial de la misma, que después es difícil de reemulsionar.
2. Estandarización de la leche: La leche es estandarizada en materia grasa, para ello se hace uso de desnatadores, de forma que se consiga el porcentaje de grasa adecuado, aprovechándose la nata producida para la elaboración de mantequilla. En este proceso se suelen producir efluentes con alto contenido en materia grasa.
3. Tratamientos térmicos: *Pasterización*, proceso similar a la termización pero que emplea temperaturas de 75-85°C durante 15 segundos con enfriamiento rápido para la eliminación de microorganismos patógenos; *Esterilización*, mediante tratamiento UHT (ultrapasteurización). La leche es calentada a altas temperaturas (hasta 145 °C) durante un tiempo muy corto (2 a 5 segundos) con enfriamiento rápido. En los tratamientos térmicos se suelen producir depósitos de proteínas que quedan adheridos a las superficies de los intercambiadores de calor y que posteriormente deben ser arrastrados mediante el lavado químico. Estos tratamientos térmicos son comunes para la leche, mantequilla, algunos tipos de quesos, postres lácteos y otros.
4. Producción de queso: Se obtiene como residuo el lactosuero, suero de quesería o suero lácteo. Este residuo presenta ciertos factores de variabilidad, entre ellos se puede señalar la especie de donde proviene la leche, vacuno, ovino, caprino, o mezcla de éstas; el proceso tecnológico de fabricación del queso, con pasteurización ó leche cruda; el corte de la cuajada (para elaboración de quesos blandos, semiduros, ó duros ); la cocción de la cuajada; el prensado; la estación del año en que se produce; las diluciones eventuales; los procesos tecnológicos a que puede someterse el lactosuero para la recuperación de proteínas ó lactosa; la evolución del producto en el curso del almacenamiento, entre otros. El proceso de salado también provoca la emisión de efluentes líquidos, aunque en este caso con escasa materia orgánica pero gran cantidad de sales.
5. Producción de mantequilla: Como en el caso de las queserías, el residuo más contaminante es el suero de mantequerías o mazada, rico en proteínas del suero y lactosa. Su aprovechamiento posterior suele limitarse a la alimentación de ganado.
6. Transporte de los productos lácteos líquidos: La limpieza de los circuitos (tuberías y bombas como medio de transporte) y equipos se suele realizar en varios pasos (Valencia et Ramírez, 2009): Empuje de los restos de leche y productos lácteos con agua. Lavado con sosa diluida (2-3%) a 80 °C para eliminar la materia grasa por saponificación. Las



soluciones de sosa se recuperan en tanques de limpieza, perdiéndose pequeñas cantidades por los empujes. Con el tiempo, la sosa pierde su poder detergente y es necesario renovarla enviando a sumidero la solución diluida (<1%). Lavado con ácido, normalmente ácido nítrico al 1-2%, a 60 °C, que disuelve la materia orgánica principalmente de origen proteico. Al igual que la sosa, cuando está agotado se renueva y se elimina por sumidero. Empuje final con agua para eliminar todos los posibles restos de producto, de ácido o de sosa.

La mayor parte de las aguas residuales lácteas proceden de este tipo de lavados. El uso de ácido y sosa provoca que los vertidos tengan valores de pH muy extremos, que pueden oscilar desde 5 hasta 10.5. En ocasiones también se emplean detergentes y desinfectantes para determinados circuitos (ácido peracético, agua oxigenada, sales de amonio cuaternario, entre otros). La composición general de los efluentes acuosos varía notablemente en función de los productos que fabrique cada empresa láctea y de sus características de diseño. En la tabla 2 se pueden observar los valores promedios de vertidos acuosos de la industria láctea.

De acuerdo a la tabla las aguas residuales provenientes de la industria láctea son ricos en carga orgánica, sólidos, grasas, proteínas y carbohidratos, no así en contenido de fósforo, ya que aquí no se está considerando que el lactosuero vaya a sumidero directamente.

**Tabla 2.** Valores promedios de los residuales acuosos de la industria láctea

Constituyente	Rango	Media
DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	450-4800	1885
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	675-7200	2820
Sólidos en suspensión (mg/L)	24-5700	1500
Sólidos totales (mg/L)	135-8500	2400
pH	5.3-9.4	-
Grasas (mg/L)	35-500	209
Proteínas (mg/L)	210-560	350
Carbohidratos (mg/L)	252-930	522
Fósforo (mg/L)	11-160	50

Fuente: París, 2009

### Lactosuero

El lactosuero es definido como “la sustancia líquida obtenida por separación del coágulo de leche en la elaboración de queso” (Abaigar, 2009; Foegeding *et Luck*, 2002, Del Angel, 2009; CODEX STAN 289-1995, enmienda 2010; Parra, 2009). Es un líquido translúcido verde obtenido de la leche después de la precipitación de la proteína (caseína) (Parra, 2009).

El lactosuero que se libera, corresponde a cerca del 83% del volumen de leche utilizada como materia prima, el cual es exudado desde el interior de la cuajada de queso. Este residuo corresponde al efluente que más contaminación provoca en las queserías si no se tiene un aprovechamiento posterior, ya que contiene gran cantidad de lactosa y proteínas. Por ello es aconsejable que estos sueros no sean vertidos de forma directa al cauce o a la depuradora, pues provocarían un enorme incremento de la DBO y la DQO.

Algunas posibilidades de la utilización de este residuo han sido propuestas, pero las estadísticas indican que una importante porción de este residuo es descartada como efluente, el cual crea un serio problema ambiental (Aider *et al.*, 2009; Arteaga *et al.*, 2009; Miranda *et al.*, 2009), debido a que afecta física y químicamente la estructura del suelo. Lo anterior resulta en una disminución en el rendimiento de cultivos agrícolas y cuando se desecha en el agua, reduce la vida acuática al agotar el oxígeno disuelto (Aider *et al.*, 2009; Parra, 2009) o provoca eutrofización de acuíferos.

El lactosuero es un residuo al que se debe dar una salida que no provoque contaminación. Por ello, en las plantas más modernas se deshidrata para obtener lactosuero en polvo, también puede obtenerse proteína y lactosa en polvo; etc., productos con un alto valor añadido y de fácil venta (Koutinas *et al.*, 2009; Almeida *et al.*, 2009; Parra, 2009; Londoño *et al.*, 2008). Para el criador de ganado porcino y bovino, este residuo constituye una materia prima en la alimentación bajo determinadas condiciones (composición, suministro y precios) (Abaigar, 2009; Peters, 2005).

El suero lácteo es considerado un producto de alto valor nutritivo, específicamente por sus proteínas séricas, que son de muy buena calidad debido a que aportan aminoácidos esenciales que poseen un alto coeficiente de absorción (Arteaga *et al.* 2009). Además, contiene lactosa y un perfil de minerales donde se destaca la presencia de potasio (K), lo que favorece la eliminación de líquidos y toxinas del organismo, dispone también de calcio (Ca), fósforo (P) y magnesio (Mg), y oligoelementos como zinc (Zn), hierro (Fe) y cobre (Cu), formando sales de gran biodisponibilidad para el organismo.

Dados los factores de variabilidad reseñados anteriormente se puede encontrar una gama de lactosueros que fluctúan entre dos tipos extremos: ácidos y dulces. Sus características principales se muestran en la tabla 3.

Un suero ácido se produce cuando el coágulo se forma por la adición de ácidos, presentando un pH próximo a 4,5. Esto es, al alcanzar el punto isoeléctrico de la caseína con anulación de las cargas eléctricas que las mantienen separadas, impidiendo la floculación. Lo que conlleva a una total desmineralización de la micela y a la destrucción de la estructura micelar (gel muy frágil).

Obteniéndose así, un suero muy mineralizado, pues contiene más del 80% de los minerales de la leche. En éste, el ácido láctico secuestra el Ca del complejo de paracaseinato cálcico, produciendo lactato cálcico. El P de la caseína se encuentra bajo la forma de monoéster ortofosfórico de un aminoácido hidroxilado (Alais, 2003).

**Tabla 3.** Origen y principales características de los lactosueros derivados de la elaboración de quesos.

	Lactosueros ácidos	Lactosueros dulces
Origen	Proviene de la fabricación de quesos frescos y de pasta blanda	Proviene de la fabricación de quesos de pasta cocida y prensada
Características	Una parte de la lactosa se ha transformado en ácido láctico y son ricos en Ca y P	Pobres en ácido láctico y en calcio y fósforo

La composición del lactosuero en gramos por kg del producto bruto, se muestra en la tabla 4 (Abaigar, 2009). Ambos tienen altos contenidos de lactosa, proteínas y grasa. Como se puede observar el lactosuero ácido principalmente, sí es rico en fósforo, unas 10-12 veces más que el que puede estar presente como promedio en los residuos acuosos lácteos (ver tabla 1), por lo cual se hace interesante la recuperación de éste como valor agregado.

**Tabla 4.** Composición promedio de los lactosueros dulces y ácidos derivados de la elaboración de quesos

Componentes	Lactosueros dulces (g/kg de lactosuero)	Lactosueros ácidos (g/kg de lactosuero)
Materia seca (MS)	55-75	55-65
Lactosa	40-50	40-50
Grasa bruta (GB)	0-5	0-5
Proteína bruta (PB)	9-14	7-12
Cenizas	4-6	6-8
Calcio	0.4-0.6	1.2-1.4
Fósforo (Fosfato g/L)	0.4-0.7 (1.0-3.0)	0.5-0.8 (2.0-4.5)
Potasio	1.4-1.6	1.4-1.6
Cloruros	2.0-2.2	2.0-2.2
Ácido láctico	0-0.3	7-8
pH	> 6.0	< 4.5
Grados Dornic	< 20°	> 50°

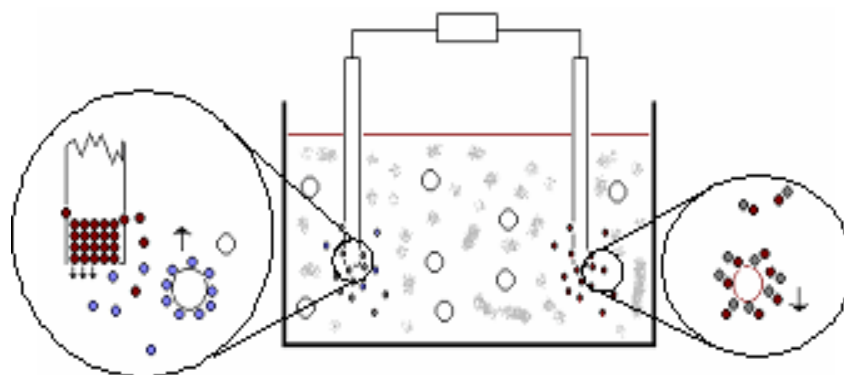
Fuente: Abaigar, 2009

### Electrocoagulación

La necesidad de tratar los efluentes generados por la industria o de controlar la emisión de especies contaminantes al medio ambiente es mayor en nuestros tiempos debido a las exigencias de la normatividad vigente. 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. En ese sentido, la electroquímica ha incursionado en estos campos con éxito debido a que ofrece diferentes opciones que se consideran limpias, ya que no utiliza una gran cantidad de sustancias y que por el contrario ayuda a disminuirlas.

El uso de la electricidad para el tratamiento de agua fue propuesto por primera vez en el Reino Unido en 1889. En 1904 fue patentado el uso de la electrólisis para el tratamiento de agua mineral (Arango *et al.*, 2008). Desde hace algunos años, en países como la ex Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, Estados Unidos, Canadá, Alemania, Brasil y México, se está investigando y aplicando un sistema no convencional para remover los contaminantes de las aguas residuales industriales y domésticas al cual se le ha llamado *Tratamiento Electrolítico de Efluentes*, también denominado *Tratamiento Electroquímico de Efluentes*. El tratamiento consiste en hacer pasar una corriente directa a través de dos electrodos que pueden ser de aluminio, cobre, hierro, titanio, grafito, acero, platino, entre otros, sumergidos en el efluente a tratar (Cristancho *et al.*, 2010).

Entre los métodos de naturaleza electroquímica que más se conocen se encuentran aquellos cuyo principio se basa en la aplicación de una corriente para provocar cambios en la naturaleza nociva de ciertas especies. Pero también puede pasar que esa perturbación provoque cambios en los electrodos, de tal modo que las especies presentes en solución se vean afectadas. Entre estos métodos se encuentra la electrocoagulación.



**Figura 1.** Procesos electroquímicos presentes durante el paso de corriente en un efluente. A la izquierda del dibujo se muestra el proceso de flotación de las partículas suspendidas en el efluente y a la derecha se muestra el proceso de electrocoagulación

Esta metodología aprovecha las reacciones que se producen en el ánodo de una celda electrolítica. Si el material de electrodo es adecuado entonces se podrán generar promotores de coágulos que eliminarán gran parte de las especies presentes en el efluente (figura 1) por flotación y/o coagulación propiamente. Esta metodología se ha aplicado como etapa previa de tratamiento de efluentes y con gran éxito al rompimiento de emulsiones de aceite y agua en las que se desea la recuperación de la fase acuosa.

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 (Morantes, 2002; Jiang, 2002). 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, proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante (Adhoum *et al.*, 2004).

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 (Ping, 2005).

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 grasosos, 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 (Chem *et al.*, 2002; Bergmann, 2003; Adhoum *et al.*, 2004).

La industria metal mecánica de nuestro entorno utiliza en alguna parte de su proceso diferentes fluidos que al combinarse forman una emulsión. Un tipo de emulsión generalmente desechada por esta industria por ejemplo, es la formada por agua y aceite. Esta emulsión es difícil de tratar por métodos convencionales por lo se impone la necesidad de aplicarle un pretratamiento. En ese sentido, se han realizado estudios que permiten romper la emulsión por electrocoagulación, lo cual conlleva a la obtención de una fase acuosa más fácil de tratar. La emulsión tratada contenía 103066 mg/L en Demanda Química de Oxígeno (DQO) originalmente y después de los

diferentes tratamientos, a intensidad variable, se pudo observar una disminución considerable de hasta 98% cuando la intensidad de tratamiento tomaba valores de entre 4 A y 6 A (Montes, 2005; Montes, 2009).

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, 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 (Wiblbrett, 2000).

También ha sido probada en el tratamiento de las aguas residuales de lavanderías, tintorerías e industria textil, obteniendo eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica, turbiedad y color (Kobyta *et al.*, 2003) 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 (Powell Water System, 2001). 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 (Kumar *et Rannar*, 2004).

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. Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO en aguas residuales domésticas (Powell Water System, 2001; Koparal *et Ogutveren*, 2002).

La electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro fue patentada en 1909 en Estados Unidos y fue aplicada por primera vez en una planta de potabilización de agua a gran escala en 1946. Debido al alto costo de inversión y el costo de la electricidad en aquellas épocas, la electroquímica no tuvo mucha acogida en la industria. A pesar de ello, en Estados Unidos y Rusia se realizaron numerosas investigaciones y se logró acumular gran cantidad de conocimiento (Chen, 2004).

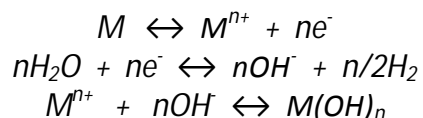
En las últimas dos décadas el tema del medio ambiente ha cobrado gran importancia. Por esta razón la electroquímica ha recuperado la importancia en el tratamiento de aguas (Chen, 2004). A pesar de que la electrocoagulación es una tecnología que se conoce hace ya más de cien años, no se ha desarrollado 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 (Holt *et al.*, 2005; OEI, 2006; Restrepo *et al.*, 2006). 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 (Restrepo *et al.*, 2006).

Como se mencionó anteriormente un método alternativo para el tratamiento de aguas puede ser la aplicación de tecnologías electroquímicas. Estas toman como ventaja la química de acoplamiento (generación *in situ* de oxidantes) con la transferencia de electrones. Se ha probado que estas tecnologías resultan ser más limpias que los tratamientos convencionales. Entre sus ventajas cabe destacar: la versatilidad y flexibilidad de los equipos, tiempos de retención breves, la ausencia tanto de la utilización de reactivos, como de la presencia de fangos y es altamente efectivo en la remoción de un amplio rango de contaminantes, pues controlar el potencial de electrodo permite seleccionar la reacción electroquímica dominante deseada (Arango, 2005; Giménez, 2001).

Las consecuencias de las reacciones que se producen en estos métodos pueden ser indirectas, como en el caso de la electrocoagulación (EC), electroflotación o electrofloculación, donde los productos formados por electrolisis sustituyen a los reactivos químicos.

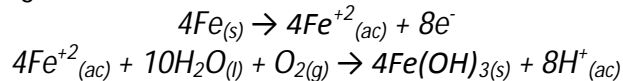
El mecanismo más aceptado plantea que los cationes que son liberados por la disolución del ánodo inducen la floculación de los contaminantes por reducción del potencial zeta ( $pZ$ ). Una corriente que pasa a través del electrodo, oxida el metal ( $M$ ) a su forma catiónica ( $M^{n+}$ ) y simultáneamente el agua es reducida a hidrógeno y el ión hidroxilo ( $OH^-$ ). El hidróxido del metal formado actúa como coagulante de impurezas. El hidrógeno producido en el cátodo forma una espuma que contiene materia orgánica en forma de agregados, que pueden ser retirados por decantación o flotación (Kim *et al.*, 2002). Sin embargo algunos autores plantean la posibilidad de la formación de radicales hidroxilos ( $OH^*$ ) (Adhoum *et Monser*, 2004).



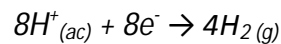
Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso  $\text{Fe(OH)}_2$  o hidróxido férrico  $\text{Fe(OH)}_3$  (APHA, 1998; Dockhorn, 2007; Foegeding, et Luck, 2002).

- Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

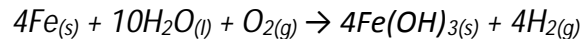
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:

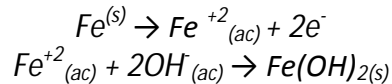


Reacción global:

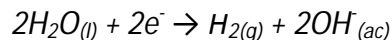


- Mecanismo 2: Formación del hidróxido ferroso

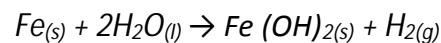
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:

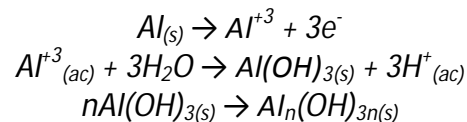


Reacción global:

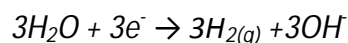


Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas (Foegeding, et Luck, 2002). Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes (APHA, 1998; Dockhorn, 2007; del Angel et al., 2009).

En el ánodo:



En el cátodo:





Los iones  $Al^{3+}$  en combinación con los  $OH^-$  reaccionan para formar algunas especies monoméricas como  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al_2(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_2^+$ , y otras poliméricas, tales como  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$  y  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$  que por procesos de precipitación forman el  $Al(OH)_{3(s)}$ , como se muestra en la reacción de ánodo. El  $Al(OH)_{3(s)}$  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 (Dockhorn, 2007; Barrera *et al.*, 2008).

Estas tecnologías pueden resultar efectivas para la integración a una planta de tratamiento o bien para la sustitución de los procesos convencionales que pueden ser menos efectivos para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos específicos. Un breve resumen de las tecnologías electroquímicas es presentado en la figura 2.

La EC utiliza corriente continua para desprender el catión activo del ánodo de sacrificio, el que reacciona con los iones hidroxilos que se forman en el cátodo, desestabilizando los contaminantes suspendidos, emulsionados o disueltos en medio acuoso. Finalmente, los materiales coloidales se aglomeran para ser eliminados por flotación o por decantación. (Chen, 2004).

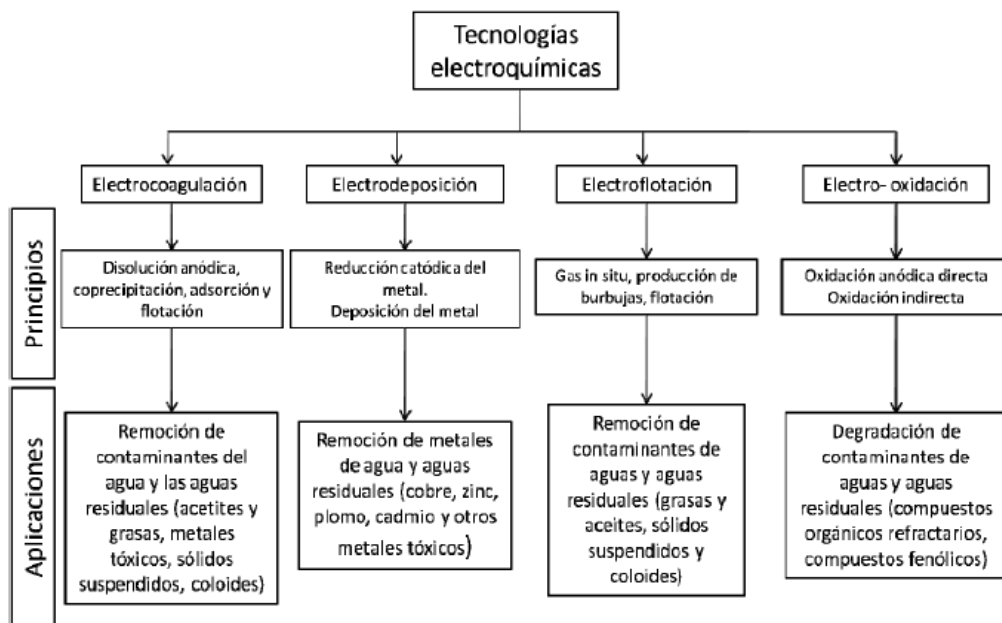


Figura 2. Resumen de las tecnologías electroquímicas (Holt *et al.*, 2005)

Como se puede observar en la figura 3, en la EC ocurren reacciones de oxidación/reducción, ya que se hace pasar corriente eléctrica en el agua residual a través de electrodos de diversos materiales. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes.

En el proceso de EC hay generación de coagulantes *in situ* por la disolución de iones metálicos de los electrodos utilizados. La generación de dichos iones metálicos tiene lugar en el ánodo, en tanto que, en el cátodo hay liberación de burbujas de gases.

Cuando los electrodos son de aluminio la disolución del ánodo produce especies como:  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ , entre otros, los cuales producen espontáneamente los respectivos hidróxidos o polihidróxidos; pues dependen del pH de la solución iónica (Mollah *et al*, 2004). Si los electrodos son de hierro lo que se forma es  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_n$  y polihidróxidos como:  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ,  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$ , y  $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{4+}$ , (Mollah *et al*, 2004). Los hidróxidos y polihidróxidos formados en estas reacciones electroquímicas tienen una gran afinidad por partículas dispersas e iones, lo que permite la coagulación de especies en el medio, formando agregados, partículas sólidas no coloidales y menos emulsificadas como se muestra en las figuras 3 y 4 (Mollah *et al*, 2004; Cañizares *et al.*, 2006; Martínez, 2007; Arango *et al*, 2007; Barrera *et al.*, 2008; Arango *et al.*, 2008; Salut, 1996).

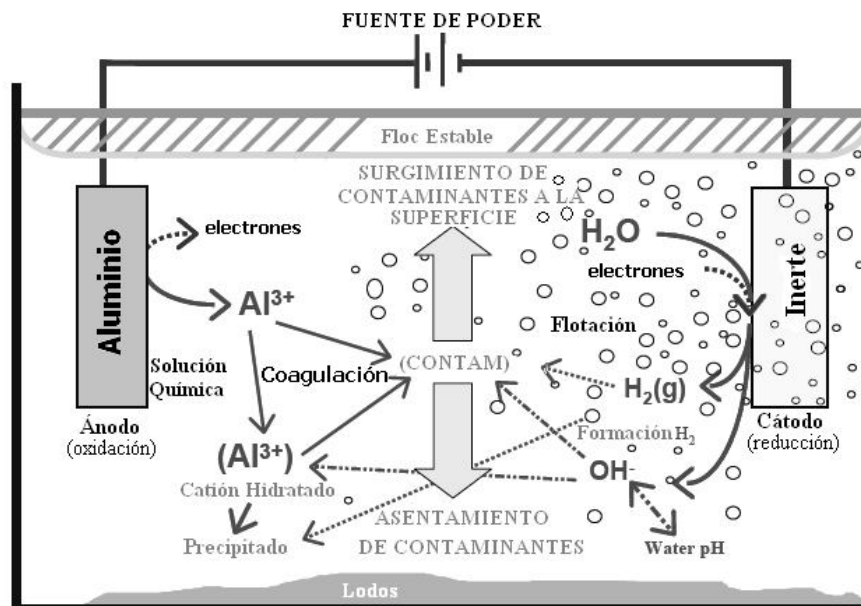
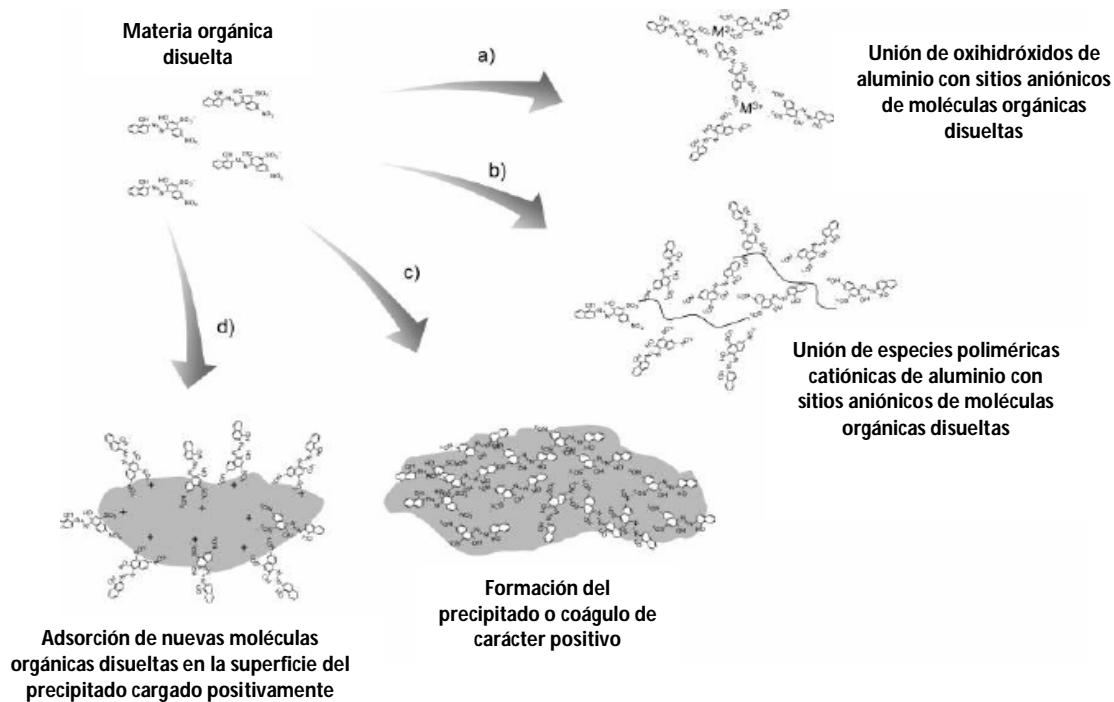


Figura 3. Esquema de una celda electroquímica (Mollah *et al*, 2004)

El agua está sometida a una electrólisis, la cual se ve favorecida por la presencia de sales en disolución, que posibilitan la conducción de electricidad y que están presentes en todas las aguas residuales e industriales. Debido a esto se produce un desprendimiento de hidrógeno y oxígeno gaseoso en sus respectivos electrodos. Estos gases al ascender a la superficie provocan tres fenómenos: separación rápida de coloides del electrodo, evitando que se ensucie (auto limpieza); arrastre de coloides desestabilizados a la superficie formando una nata, posibilitando no sólo una extracción por sedimentación clásica, sino también, por flotación y finalmente, debido a las burbujas de gas se producen corrientes ascendentes y descendentes de la solución ocasionando una mejor superficie de contacto, provocando así un aumento en la eficiencia de desestabilización. Esta agitación “espontánea” evita la agitación “mecánica”.



**Figura 4.** Esquema del mecanismo de coagulación de la materia orgánica disuelta (Cañizares *et al.*, 2006; Martínez, 2007)

#### 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 se discuten 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 oxihidróxidos. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación (Mansouri *et al.*, 2011; Jiantuan, 2004; Kobya *et al.*, 2003; Bayramoglu, 2004; Powell Water System, 2001; Zinola, 1999) y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua o líquido a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. 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 (Bayramoglu, 2004; Kumar *et al.*, 2004). En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7 (Chen, 2004). 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, (Kumar *et al.*, 2004) y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan en un pH de 7 (Mollah *et al.*, 2004; Kobya *et al.*, 2003; Bayramoglu, 2004).

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, (Koyba *et al.*, 2003) 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. La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente (Mansouri *et al.*, 2011; Adhoum *et al.*, 2004). 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.

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio  $Al^{+3}$  o hierro  $Fe^{+2}$ , liberado por los respectivos electrodos. En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante (Bayramoglu, 2004).

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 (Chem, 2004).

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 (Mollah, 2004).

#### 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.

La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl<sub>2</sub> generan un aumento en la conductividad del agua residual (Mansouri *et al.*, 2011). Además se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup> produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos 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 iones Cl<sup>-</sup> alrededor del 20%.

#### 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 (Restrepo, 2009). Las temperaturas superiores al ambiente se usan para beneficiar los efectos sobre la cinética en todos los pasos del proceso del electrodo, incrementando además el coeficiente de difusión, el cambio de densidad de corriente y la velocidad de reacción química (Jaramillo *et al.*, 2005).

#### Tiempo

El tiempo de residencia, indican algunos autores (Ojeda *et Hing*, 2010) determina que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al

ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos. Sin embargo estos mismos autores señalan que sus variaciones resultan estadísticamente menos significativas que las variaciones de pH, ya que éste, está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad (Kps) la cual debe disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene una mayor precipitación de los mismos en la medida que el pH aumenta.

En la tabla 5 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 (Restrepo *et al.*, 2006).

### Conclusiones

En el presente trabajo se ha podido recopilar la información más relevante y de actualidad acerca de la factibilidad de aplicaciones de la técnica de electrocoagulación (EC) en la remoción de agentes contaminantes en disoluciones acuosas. También se ha encontrado información acerca de la potencialidad de la EC para ser aplicada en la reducción de las elevadísimas cargas orgánicas que presenta el suero derivado de la industria láctea en la elaboración de quesos. La EC 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. La EC no requiere de grandes costos ni de reactivos químicos ya que se utiliza el electrón como agente reactivo. La EC se ve afectada por la densidad de corriente, variaciones de pH y concentración del electrolito. Un incremento en la densidad de corriente, valores de pH y concentración del electrolito produce un incremento en la eficiencia de remoción de dichas cargas orgánicas. Se produce un rompimiento de la estabilidad de las emulsiones y suspensiones coloidales con la consecuente coagulación y/o flotación de material orgánico, que permite separarlo por oclusión en los hidróxidos metálicos que se forman.

**Tabla 5.** Resumen de algunas investigaciones de electrocoagulación, mostrando valores de variables importantes en el proceso y la remoción alcanzada para diversos contaminantes en distintas aguas residuales industriales (Restrepo *et al.*, 2006)

Agua residual	Corriente	Ánodo/ Cátodo	Parámetro eléctrico	Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	Contamina nte	Remoción (%)	Tiempo (min)	Referencia
Colorantes textiles	CD	Al/Fe	$\geq 150 \text{ A}/\text{m}^2$	1000-4000	3-6	Turbiedad DQO	90 61-65	15	Bayramoglu, 2004
		Fe/Al	80-100 $\text{A}/\text{m}^2$	1000-4000	3-7	Turbiedad DQO	75-90 47-77	10	
					Cercano a 10	Turbiedad DQO	87 26		
Alimentos	CD	Fe/Al	6.26 $\text{A}/\text{m}^2$	1.2 Mhos	10.04	Grasas y aceites	Agua cruda 1195 ppm Agua tratada 115 ppm	15	Morante, 2002
						DQO	Agua cruda 3104 ppm Agua tratada 931 ppm		
Lavanderías	CA	Al	32V/30A	NR	5-9	DQO Turbiedad, Fosfato	70 90	5	Jiantuan, 2004
Agua consumo humano Industria pulido mecánico y químico	NR	Fe/ Al/ Ti/	1.53 $\text{A}/\text{m}^2$	NR	6-9	As	>99 37 >58	20	Kumar y Ratna, 2004
						Color Cu	96 99		
Producción de aceite de oliva	CD	Al/Fe	93 $\text{A}/\text{m}^2$	450-470	7.3	DQO	88.7	30	Lai y Lin, 2004
						DQO	76		
	CD	Al/	75 $\text{mA}/\text{cm}^2$	NR	4-6	Polifenoles color	91 65	25	Adhoum y Monser, 2004

CD: Corriente directa; CA: Corriente alterna; NR: No reportado

## Referencias bibliográficas

- Abaigar, A. (2009). El lactosuero en la alimentación del ganado porcino. ITG Ganadero. ISSN- 948-5656. 13-17.
- Adhoum, N. and Monser, L. (2004). Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. In: Chemical Engineering and Processing. Vol. 43, No. 10; p.1281-1287.
- Aider, M., Halleux, D. And Melnikova, I. (2009). Skim acidic milk whey cryoconcentration and assessment of its functional properties: Impact of processing conditions. Innovative Food Science and Emerging Technologies 10(3):334-341.
- Alais, Ch. (2003). Ciencia de la leche. Principios de la técnica lechera. Editorial Reverté, S. A. Barcelona, España. Reimpresión Abril 2003. ISBN: 84-291-1815-2:132.
- Almeida, K.E., A.Y. Tamime and M.N. Oliveira. (2009). Influence of total solids contents of milk whey on the acidifying profile and viability of various lactic acid bacteria. LWT - Food Science and Technology 42(2): 672–678.
- APHA, American Public Health Association. (1998). Standar Methods for the examination of water and wastewater. Edición 20 Batilmore: American Water Work Association.

- Arango, A. (2005). La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. Vol 2(1).49-56.
- Arango, A., Garcés, L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Universidad Eafit*, Vol. 43, N° 147:56-67.
- Arango, A., Garcés, L. F. (2009). Influencia de la conductividad eléctrica en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia – Julio-Diciembre*, Vol.4, No.2:54-64.
- Arango, A., López, A., Gil, E. (2008). Tratamiento de aguas residuales del proceso de desengrase de autopartes con fines de reuso. *Escuela de ingeniería. Departamento de ingeniería de procesos. Universidad EAFIT*. ISSN 1692-0694. Medellín. Marzo de 2009. Documento 71- 032009.
- Arteaga, M., Molina, L. H., Pinto, M., Brito, C. (2009). Caracterización de queso Chanco enriquecido con suero lácteo en polvo. *Rev Chil Nutr* Vol. 36, N° 1:53-62.
- Barrera-Díaz, C.; Roa-Morales, G. y Balderas-Hernández, P. (2008). A Comparison of Iron and Aluminium Electrodes in Hydrogen Peroxide-Assisted Electrocoagulation of Organic Pollutants. *Environmental Engineering Science*. Vol. 25. N° 4:529-537.
- Bayramoglu, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. In: *Separation and Purification Technology*. Vol.37, No. 2; p.117–125.
- Bergmann, H. (2003). Electrochemical treatment of cooling lubricants. In: *Chemical Engineering and Processing*. vol. 42, No. 2; p.105-119.
- Brown, T; LeMay, H; Bursten B. (2001). *Química la ciencia central*. Séptima Edición, Editorial Pearson. ISBN:970-170169-0.
- Butler, E., Tse, Y. T., Yu-Li, T., Suleiman, M. (2011). Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Review. Water*, 3:495-525.
- Cañizares, P., Martínez, F., Jiménez, C., Lobato, J., Rodrigo, M. (2006). Coagulation and Electrocoagulation of Wastes Polluted with Dyes. *Environ. Sci. Technol*. 40:6418-6424.
- Carvalho, F.P., Villeneuve, J.P., Cattini, C., Tolosa, I., Montenegro-Guillen, S., Lacayo, M., Cruz, A. (2002a). Ecological risk assessment of 74ork74ial residues in coastal lagoons of Nicaragua. *J. of Environ. Monit*. 4:778-787.
- Carvalho, F.P., González-Farias, F., Villeneuve, J.P., Cattini, C., Hernandez-Garza, M., Mee, L.D., Fowler, S.W. (2002b). Distribution, fate and effects of pesticide residues in tropical coastal lagoons of northwestern Mexico. *Environmental Technology* 23:1257-1270.
- Chen, G.; Chen, X.; and Yue , P. L.(2000). Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. In: *Journal of environmental engineering*. Vol. 126, No. 9; p. 858-863.
- Chen, G. (2004). Electrochemical Technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*. Vol. 38:11-41.
- CODEX STAN 289-1995. (2010). Norma del CODEX para sueros en polvo. Norma del CODEX Alimentarius, Revisión 2003. Enmienda 2006, 2010. Argentina.
- Cristancho, D., Morales, N. B., Garavito, J. Z., Chávez, A. (2010). Descripción del comportamiento de un prototipo para tratamiento electroquímico de aguas residuales industriales. *Revista Academia y Virtualidad. Universidad militar. Nueva Granada*. Vol. 3(1):125-136.
- Cumbre de Johannesburgo, (2002). Cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible. Johannesburgo, Sudáfrica. Informe.
- Del Angel, J.A., Hernández J.M., Jiménez V.M., Musule, R. (2009). Tratamiento de lactosueros, diseño mediante la aplicación de un evaporador solar.
- de la Mora, C., Rubio, A.H., García, V.J. (2005). Índice de Calidad de Agua en el Lago de Chapala, Jalisco, México. En *Contribución al estudio de los Servicios Ambientales. Libro Técnico No. 1. INIFAP. Capítulo II*. 33-54.
- Dockhorn, T. (2007). *Stoffstrommanagement und Ressourcenökonomie in der kommunalen. Abwasserwirtschaft*, TU Braunschweig 74, ISSN 0934-9731.



- Drogui, Patrick; Jean- Francois y Guy Mercier. 2007. Review of electrochemical technologies for environmental applications. *Recent Patents on Engineering*, Vol 1, 3. 257-272.
- Espino, M.S., Rubio, A.H., Navarro, C.J. (2007). Nitrate pollution in the Delicias-Meoqui aquifer of Chihuahua, Mexico. *Environmental Health Risk IV*. WitPress. 189-196.
- Farré, M. J., Doménech, X., Peral, J. (2007). Combined photo-Fenton and biological treatment for Diuron and Linuron removal from water containing humic acid. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 147:167-174.
- Foegeding, E. & P. Luck. (2002). Whey protein products. In: Caballero, B., L. Trugo, P. Finglas (eds.). *Encyclopedia of Foods Sciences and Nutrition*. Academic Press, New York. 1957-1960
- GEMS, (2004). Global Environment Monitoring System. Freshwater Quality Programme. The Great Water Quality Data Drive UNEP's GEMS/Water Programme Launches. Global call to action for Water Quality Monitoring and data from all types of water resources. United Nations.
- Giménez Cisneros, Blanca Elena. (2001). *Contaminación Ambiental en México*. Ed. Limusa. México.
- Gutiérrez, E.R., Rubio-Arias, H., Quintana, R., Ortega, J.A., Gutierrez, M. (2008). Heavy metals in water of the San Pedro River in Chihuahua, México and its potential health risk. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 5(2):91-98.
- Hernández, F., Urkiaga, A., De las Fuentes, L., Bis, B., Chiru, E., Balazs, B. y Wintgens, T. (2006). Feasibility studies for water reuse projects: an economical approach. *Desalination*, 187:253-261.
- Hernández, F., Molinos, M. y Sala, R. (2010). Estudio de viabilidad económica para el tratamiento de aguas residuales a través de un análisis coste-beneficio. *Rect@*, 11:1-25.
- Holguín, C., Rubio, H., Olave, M.E., Saucedo, T.R., Gutiérrez, M., Bautista, R. (2006). Calidad del agua del Río Conchos en la región de Ojinaga Chihuahua: Parámetros fisicoquímicos, metales y metaloides. *Universidad y Ciencia*, 22(1):51-63.
- Holt, P.; Barton, G.; Mitchel, C. (2005). The future electrocoagulation as a water treatment technology. *Chemosphere*, 59(3):358.
- Jaramilo, C. A., Jaramillo, A., Taborda, G. (2005). Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en la descontaminación de aguas residuales. *Revista Universidad de Caldas*, Julio - Diciembre 2005, p.145-158.
- Jiang, J.Q. (2002). Laboratory study of electro-coagulation–flotation for water treatment. In: *Water Research*. Vol. 36, No. 16; p.4064– 4078.
- Jiantuan G. E. (2004). New bipolar electrocoagulation– electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. In: *Separation and Purification Technology*. Vol.36, No. 1p.33–39.
- Kim, S., Poe, L.; Cheng, T. (2002). Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination*, 150:326-332.
- Kobyas, M.; Can, O.; Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 100, No. 1-3; p.163– 178.
- Koparal, A. S. and Ogutveren, U. B. (2002). Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 89, No. 1; p. 83–94.
- Koutinas, A.A.; Papapostolou, H.; Dimitrellou, D.; Kopsahelis, N.; Katechaki, E.; Bekatorou, A. and Bosnea, L.A. (2009). Whey valorisation: a complete and novel technology development for dairy industry starter culture production. *Bioresource Technology*. 100(15):3734-3739.
- Kumar, P., Ratna, E. (2004). Removal of arsenic from water by electrocoagulation. In: *Chemosphere*. Vol. 55, No. 9; p.1245–1252.
- Lai, Chen L. and Lin, Sheng. (2004). Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics. in: *Chemosphere* 54(3):235–242.

- Londoño, M. (2006). Aprovechamiento del suero ácido de queso doble crema para la elaboración de quesillo utilizando tres métodos de complementación de acidez con tres ácidos orgánicos. Perspectivas en nutrición humana. *Revista Perspectivas en Nutrición Humana-Escuela de Nutrición y Dietética-Universidad de Antioquia* 16: 11-20.
- Mansouri, K., Ibrik, K., Abdel, A. (2011). Anodic Dissolution of Pure Aluminum during Electrocoagulation Process: Influence of Supporting Electrolyte, Initial pH, and Current Density. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50:13362–13372.
- Martínez, F. (2007). Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. Memoria para la obtención del grado de Doctor en Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Castilla La Mancha, España, p.24.
- Miranda, O., Ponce, I., Fonseca, P. L., Cutiño, M., Díaz, R. M., Cedeño, C. (2009). Características físico-químicas de sueros de queso dulce y ácido producidos en el combinado de quesos de Bayamo. *Rev Cub Aliment Nutr* 19(1):21-25.
- Mollah M. Yousuf; Morkovsky P; Gomes J.A; Kesmez M; Parga J; Cocke D.L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 114:199-210.
- Montes, A. (2005). Electromicrogravimetric study of the effect of Cl<sup>-</sup> anions on thallium underpotential deposition onto gold. *Mex. Chem. Soc.*, 49, 336-352.
- Montes, A. (2009). Construcción y utilización de un electrodializador en serie para laboratorio, *Química Nova* 32, 493.
- Morante, G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. En: *Revista Colombiana de Física*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Vol. 34, No. 2; p.484-487.
- Nemerow, Nelson L. (1977). *Aguas Residuales Industriales. Teorías, Aplicaciones, Tratamientos*. Ed. H. Blume. España.
- Ojeda, E., Hing, R. (2010). Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza residual de las destilerías de alcohol etílico. *Tecnología Química*, 30(10):38-47.
- Organización de Estados Iberoamericanos – OEI (2006). Década por una educación para la sostenibilidad: Nueva Cultura del agua. España: OEI, 2006. En: <http://www.oei.es/decada/accion06.htm>
- Parra, R. A. (2009). Lactosuero: Importancia en la industria de alimentos. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 62(1):4967-4982.
- París, X. (2009). Obtención de exopolisacáridos de interés industrial a partir de lactosueros y permeatos. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, Facultad de Farmacia. Departamento de Microbiología. España.
- Peters, R. (2005). Economic aspects of cheese making as influenced by whey processing options. *International Dairy Journal* 15(6-9): 537-545.
- Ping, G. (2005). Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electro flotation without a filter. In: *Separation and Purification Technology*. Vol. 43, No. 2; p. 117-123.
- Powell Water System. (2001). *Powell Electrocoagulation: Sustainable Technology For the Future*. Colorado: Powell Water Systems, p.2-27. Disponible en: [www.powellwater.com/data/technical%20manual.pdf](http://www.powellwater.com/data/technical%20manual.pdf).
- Restrepo, A. M.; Arango, A.; Garcés, L. F. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, Vol. 1, No. 2, 58-77.
- Restrepo, H. A. (2009). Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Tesis Doctoral. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. p.9.
- Rubio, A.H., Saucedo, T.R., Lara, C.R., Word, K., Jiménez, J. (2005). Water quality in the Laguna de Bustillos of Chihuahua, México. *Water Resources Management III*. Editors. M. De Conceicao Cunha y C.A. Brebbia. WitPress 155-160.
- Salut, A. F. (1996). Electroflocculation: Removal of Oil, Heavy Metals and Organic. Compounds from Oil-on-water Emulsions. *Filtration and Separation*, Vol. 33, No 295, 96-105.

- UN, 2008. From UN Secretary General Ban-Ki-Moon 's Speech on January 24, 2008 at the World Economic Forum in Davos, Switzerland on the session "Time is running out for water".  
<http://gaia.worldtelevisioncom/wef/worldeconomicforum/2008>.
- Valdez, Z.A., Guzman, A.M., Peniche, C.S. (2001). La problemática del Lago de Chapala: Una lectura desde la perspectiva de las ciencias administrativas. Curso: Chapala, la transición a un milenio. Movimiento cívico todos por Chapala. 6 p.
- Valencia, E.; Ramírez, M. L. (2009). La industria de la leche y la contaminación del agua. Elementos, 73:27-31.
- Veisseyre, R. (1988). Lactología técnica. Editorial Acribia, Zaragoza, España, 376-440.
- Wiblbrett, G. (2000). Limpieza y desinfección en la industria alimentaria. Zaragoza: Acribia, 2000, 349p.
- Zinola, C.F. (1999). Electroquímica fundamental. Uruguay: DIRAC, Universidad de la República. CSIC.