

Tratamiento de agua residual industrial de curtiembre por medio de la electrocoagulación

Tannery industrial wastewater treatment by electrocoagulation

Diego Alejandro Córdoba Adame¹, Javier Augusto Vera Solano²

Recibido: 11 agosto de 2019 Aprobado: 15 noviembre de 2019

Resumen. Este artículo tiene como objetivo principal hacer una recopilación e investigación de las características, avances y desarrollo de la electrocoagulación (EC) en el tratamiento de aguas residuales industriales de curtiembres, y su aplicabilidad en otras industrias que aportan alto contenido de compuestos contaminantes a los cuerpos de agua. Este tratamiento fue patentado hace ya varias décadas, no obstante, en los últimos años ha cobrado mucha relevancia y ha demostrado que el tratamiento de efluentes de curtiembre mediante este sistema es eficiente, al obtener remociones de hasta el 90 % para la eliminación de contaminantes como MO Cr, fosfatos, turbidez, color, SST, SSV, entre otros, además de la baja generación de lodos, su bajo costo, la facilidad de operación y otras ventajas que ofrece ante los métodos convencionales. La eficiencia en este tratamiento es directamente proporcional a la densidad de corriente y tiempo de electrólisis, adicionalmente, todos estos avances son aplicados en industrias de transformación

de lácteos, siderúrgicas y galvanizado, y en estas últimas ha sido eficiente para remover metales pesados como Ni, Pb y Zn.

Palabras clave: Remoción, Contaminantes, Efluentes, Tiempo de electrólisis, Densidad de corriente.

Abstract: This article has as main objective to make a compilation and investigation of the characteristics, advances and developments of electrocoagulation (EC) in the treatment of industrial wastewater from tanneries and its applicability in other industries that provide high content of contaminating compounds to the bodies of water, this treatment was patented several decades ago, nevertheless, in recent years it has gained much relevance demonstrating that the treatment of tannery effluents through this system is efficient obtaining removals of up to 90% for the removal of contaminants such as MO, Cr, phosphorus, turbidity, color, SST, SSV

1 Autor correspondiente: Ingeniero Ambiental. Universidad de Pamplona. Colombia, Pamplona. yeyoalejo97@gmail.com.
ORCID: 0000-0002-3523-235X

2 Magister en Ingeniería Ambiental. Universidad de Pamplona. Colombia, Pamplona. javier.vera@unipamplona.edu.co.
ORCID: 0000-0002-3415-146X

among others, in addition to its low generation of sludge, low cost, ease of operation and other advantages offered to conventional methods; The efficiency in this treatment is directly proportional to the current and time of electrolysis, in addition all these advances are applied in dairy, steel and galvanized transforming instruments, being in the last ones more efficient to remove heavy metals such as Ni, Pb, Zn

Keywords: *Removal, Pollutants, Effluents, Electrolysis time, Current density.*

Introducción

Las actividades diarias del ser humano generan una cantidad de residuos sólidos, gaseosos y líquidos, estos últimos son vertidos en un 80 % a los ecosistemas sin ningún tratamiento [1], [2], según la organización Unicef, 842.000 personas mueren de diarrea al año debido a las condiciones insalubres del agua y solo 5.200 millones de personas tienen servicio de suministro de agua gestionados de forma segura, dicho número equivale al 71 % de la población mundial [3], la Organización Mundial de la Salud indica que el agua contaminada puede transmitir enfermedades como la diarrea, el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea y la poliomielitis, además calculan que la contaminación del agua potable provoca más de 502,000 muertes por diarrea al año [4]; la Fundación Aquae cita que la contaminación de las fuentes de agua es tal que el 4 % de las reservas subterráneas están contaminadas [5]. Una de las principales fuentes de contaminación son las industrias, teniendo en cuenta que la industria manufacturera y de transformación depende altamente del agua [6], dentro de este grupo se encuentran las curtidoras o curtiembres.

Desde la antigüedad, los procesos de tratamiento y teñido de pieles animales para transformarlas en cuero, conocidos como el arte de la piel, generan como subproductos unos compuestos de forma líquida y gaseosa altamente contaminantes para el ambiente, en forma gaseosa, por ejemplo, se libera sulfuro de hidrógeno (H_2S).

En

el caso de este estudio, son de interés los compuestos vertidos a los cuerpos de agua natural, que son compuestos inorgánicos, en su mayoría metales pesados, los cuales varían en cada curtiembre dependiendo de los químicos y tintes que se utilicen en los procesos. Metales como cadmio, arsénico, plomo y cromo (VI) son de mayor importancia, porque tienen la capacidad de acumularse en la cadena trófica y convertirse en un riesgo para la salud humana, la exposición a estos contaminantes presenta efectos mutagénicos, carcinogénicos y teratógenos, inmunosupresión, mala condición corporal y alteraciones en la reproducción cuando hay exposición crónica a dosis bajas [7].

A partir de esta problemática, surgen métodos de tratamiento específicos para este tipo de efluentes como electrocoagulación, por membrana, fitorremediación, entre otros. La electrocoagulación es una técnica económica que en condiciones óptimas alcanza eficiencias de hasta el 98 % a escala laboratorio; este sistema es eficiente en la eliminación de contaminantes tales como aceites, grasas, metales pesados y especies no tóxicas; degrada coloides, moléculas orgánicas medidos en términos de DQO (demanda química de oxígeno) y DBO (demanda biológica de oxígeno) de forma sustancial [8]. Un subproducto de este proceso es un desecho en forma acuosa (lodo) compuesto por especies químicas de hierro, el cual debe ser tratado de otras formas convencionales para separar la mayor parte del agua y obtener un residuo con el menor volumen posible y fácil de manejar.

Las afirmaciones anteriores dan paso a las incógnitas: ¿se encontrarán evidencias bibliográficas que demuestren que este método alcanza eficiencias mayores o iguales al 90 %? ¿Se podrá utilizar este método en el tratamiento de efluentes de otros tipos de procesos industriales en pro del medio ambiente? En busca de la solución a estas dudas, se planteó como metodología iniciar con una revisión sistemática; se parte de lo general y se avanza hacia lo específico; se analizan las características de las aguas residuales, los diferentes tipos de tratamientos que existen en la actualidad de una forma general, para finalizar

con el estudio a fondo sobre el tratamiento terciario de electrocoagulación, en donde se espera comprobar su eficiencia y versatilidad en el campo de plantas de tratamiento, ya que por su eficiencia se puede convertir en una posibilidad de tratamiento de efluentes para diferentes industrias y plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que manejen contaminantes específicos.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en capítulo I se presenta el agua; en el capítulo II se hace una descripción de la curtiembre; en el capítulo III se explican los tipos de tratamiento. El capítulo IV trata sobre la electrocoagulación, y finalmente, se presentan las conclusiones.

El agua

“El agua es un compuesto con características únicas, de gran significado para la vida, el más abundante en la naturaleza y determinante en los procesos físicos, químicos y biológicos que gobiernan el medio natural” [9 p. 115]. El griego Tales de Mileto creía que el agua era el principio de todas las cosas existentes [10], mientras tanto Empédocles, y luego Platón y Aristóteles, la consideraron como uno de los cuatro elementos básicos del Universo.

En el año de 1775, el químico francés Macquer obtuvo algunas gotas de agua por combustión del hidrógeno, 3 años después escribió que el agua es una sustancia inalterable e indestructible [11], años más tarde, el químico inglés Henry Cavendish demostró que el agua es un resultado de la combinación del llamado ‘aire inflamable’ con el oxígeno presente en la atmósfera ‘aire vital’ [12], muchos científicos han aportado al descubrimiento de la composición de este compuesto, pero fue el químico francés Lavoisier quien dio sus nombres actuales al oxígeno y al hidrógeno, este último quiere decir “productor de agua” [13].

Este compuesto tiene algo muy característico como lo son su punto de ebullición y congelación, si bien compuestos químicos semejantes a ella (H_2S , H_2Se Y H_2Te), llama la atención que al evaluarlos se concluye que su punto de ebullición debería estar en $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y congelación a los $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, en su lugar de hacerlo encontramos su punto de

ebullición a los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ dependiendo del nivel del mar, mientras que su punto de congelación a los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por otra parte, es posible encontrar a altitudes entre 2.000 y 3.000 metros gotas de agua súper frías con temperaturas entre 0 y $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9].

Desde el punto de vista químico es excepcional su importancia puesto que casi todos los procesos químicos que ocurren en la naturaleza son disueltos en agua, es un medio de transporte de nutrientes, esta es una cualidad muy importante para la vida en el planeta de forma que para algunos ecosistemas el agua es de utilidad como recipiente de sustancias vitales para su existencia, cabe resaltar otra propiedad como lo es su facilidad para disolver una gran cantidad de sustancias (de ahí que rara vez es pura), este líquido a su vez absorbe la mayor parte de la energía solar en la hidrosfera donde se transforma en calor el cual es transportado o transferido a la atmósfera, como por ejemplo la evaporación de agua de la superficie del océano es transferida cada minuto a la atmósfera jugando un papel importante como regulador del clima en el planeta, las grandes masas oceánicas, por su capacidad calorífica, impiden las variaciones abruptas de temperatura entre el día y la noche o entre el verano y el invierno.

La percepción directa del ser humano mediante el gusto de las sustancias disueltas en el agua ha llevado a calificarlas entre agua dulce y agua salada, esta última es considerada así cuando contiene una concentración de sales mayor a 3.000 mg/L , este término está asociado al agua de mar cuyos valores por lo general oscilan en el rango de 34.000 y 35.000 mg/L , llegando a alcanzar valores de 45.000 mg/L en lugares como el Mediterráneo o el mar Rojo, por otra parte, cuando el agua contiene una concentración de sales menor a 1.000 mg/L se le llama agua dulce [14].

Características físicas

Pueden ser captadas por los sentidos, afectan la estética del agua y su aceptabilidad; estas características son: turbiedad, sólidos solubles e insolubles, color, olor, sabor, temperatura y turbiedad.

Características químicas

El agua puede contener casi cualquier elemento de la tabla periódica, sin embargo, muy pocos son elementos significativos para el tratamiento de agua cruda para consumo; algunas de estas características son: nitritos, nitratos, sulfatos, cloruros, pH, DBO, DQO, etc.

Agua residual

Se caracteriza por haber sido modificada antropogénicamente, las características iniciales del recurso empleado en la actividad se transforman, así como las características de la fuente donde es vertida y la biota del cauce, lo que inhabilita su consumo directo. Estas aguas se clasifican según la actividad y el contaminante que aportan al recurso en:

- Domésticas
- Industriales (las curtiembres pertenecen a la subdivisión de tipo principalmente orgánico)
- Lluvia
- Agrícolas [15]

Respecto a la contaminación que aportan, se puede destacar un grupo de compuestos casi tan amplio como las acciones que el ser humano puede realizar sobre el agua, en el que se encuentran productos químicos como jabones, detergentes, cosméticos, etc.; productos sólidos como papel higiénico, toallitas “desechables” de algodón, plásticos en variedad de tamaños; asimismo, metales pesados y muy contaminantes como el plomo, zinc, mercurio, cadmio, bromo y cromo; además de restos orgánicos procedentes principalmente de la materia fecal y la orina. Las características de cada vertimiento varían según su origen, siendo las industriales las que aportan mayor contaminación; los compuestos emergentes en el agua más comunes son:

- Pesticidas o plaguicidas.
- Productos farmacéuticos [16].
- Drogas ilícitas.
- Hormonas esteroides.
- Compuestos “estilo de vida”.
- Cuidado personal.
- Surfactantes.
- Productos de tratamiento.

- Aditivos industriales y subproductos.
- Retardantes de llama [17].

Curtiembres

La industria de curtiembre se encarga de transformar la piel animal en cuero, como resultado del proceso de estabilización del colágeno presente en ella con agentes de curtido, gracias a la formación de complejos tipo de quelotos. Esto se lleva a cabo con la finalidad de impedir su descomposición y facilitar su uso en la fabricación de productos como: calzado, tapizados, entre otros. Este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas: ribera, curtido, acabado húmedo, acabado seco [18].

En Colombia, los primeros registros de esta actividad económica datan de la década de 1920 en el departamento de Antioquia, en Cundinamarca inició a mediados de los años cincuenta en los municipios de Chocontá y Villapinzón, se establecieron las primeras curtiembres artesanales en las riberas del río Tunjuelito, siendo esta la opción más rentable para trabajar el cuero, después la actividad se trasladó hacia la zona conocida en la actualidad como San Benito, a las afueras de Bogotá D.C. [18], lo cual permitió el desarrollo de esta actividad de forma industrial y desencadenó la problemática ambiental relacionada con malos olores, vapores de solventes y vertimientos al río de los efluentes de las curtiembres que contienen residuos del cuero tratado y de los insumos químicos empleados en el proceso. En la década de los noventa, después de entrar en vigor la Ley 99 de 1993 y la Ley 142 de 1994, las autoridades comenzaron a inspeccionar formalmente estas industrias, para el año 2006 la Corporación Autónoma Regional (CAR) definió la reglamentación sobre los usos del agua en cada uno de los tramos y afluentes del río Bogotá y en el año 2009 la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) estableció los tipos y cantidades de vertimientos a la red de alcantarillado público. En la actualidad, la industria del curtido y recurtido de cueros se clasifica con los códigos 1511 y 1512, según el Código Industrial Internacional Uniforme (CIIU), versión 4.0 [18]. Para el año 2014, en el sector de San Benito se encontraban aproximadamente 265 curtiembres registradas (las cuales representan

del 70 % de las industrias curtidoras del país), que son las productoras del 30 % de la contaminación vertida al río Bogotá [19].

Las industrias curtidoras tienen un consumo elevado de agua debido a que los procesos más importantes para convertir la piel en cuero se efectúan sobre medios acuosos, en promedio se estima un gasto de 10 kg agua/1 kg cuero; este sector consume entre 400 y 1200 L de agua por piel según el proceso utilizado; en los países en vías de desarrollo se llega a alcanzar un valor de 100 m³ por tonelada de piel bruta salada procesada. Por otra parte, se emplean 442 kg de productos químicos por cada tonelada de piel procesada, con porcentajes de contaminación hídrica en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) por etapa, así: en el proceso de ribera contribuye en un 80 %, en el de remojo, 10 %, y en calado y descalado, 10,% (Fig. 1) [18]; además, el efluente presenta rangos de salinidad, amoníaco, colorante sintético de fórmula química estructural derivada de anilinas o azocompuestos, entre otros [20].

El proceso más utilizado es el curtido al cromo, empleado por el 80 % de las industrias del sector, mientras el 20 % utilizan compuestos vegetales; el agua residual que se genera en el proceso de ribera generalmente no es recuperable por la alta concentración de cromo (3-10 g/L), así como por componentes desengrasantes, aminas, sulfuros, sodio y cloruros, compuestos altamente contaminantes [19].

Secuencia del Proceso

Según la “Guía de producción más limpia, para el sector curtiembres de Bogotá” [18] de la Alcaldía Mayor, la gran mayoría de las industrias de curtiembre tienen un proceso productivo similar, como se representa en la Figura 1, con la variante de dosificación y el tipo de insumos químicos, lo cual depende de los proveedores, la calidad de las pieles y el conocimiento del curtidor [18].



Figura 1. Diagrama de flujo del sistema productivo de las curtiembres en Bogotá.
 Fuente: Tomado de [18 p. 65]

Impactos ambientales del proceso de producción de curtido de cueros

La etapa de biodegradación de materia orgánica vertida en efluentes, en el proceso de producción de curtidos de cuero, puede generar una serie de impactos ambientales, como se observa en la Tabla 1, nocivos tanto para la biota de las aguas superficiales como para los seres humanos. Por ejemplo, la formación de ácido sulfhídrico es nociva para la salud, al punto que en una concentración entre 20 y 50 mg/L en el aire causa desde malestar agudo a sofocación y muerte por sobreexposición, esta toxicidad es semejante a la del ácido cianhídrico, el cual, desde una concentración de 50 mg/L en las células receptoras del olfato, provoca un efecto narcótico, por el cual el afectado llega al punto de no percibir el hedor, y a partir de 100 mg/L puede ocurrir la muerte. En cuanto a los restos biológicos, no pueden ser utilizados en procesos de compostaje u otros métodos de reutilización debido a su exposición intensiva a químicos. Teniendo en cuenta que los demás compuestos curtientes como productos químicos fluorados y polímeros, ésteres de ftalato y compuestos orgánicos de estaño empleados como catalizadores son altamente tóxicos, los productos más utilizados como solventes son los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVS), los cuales son sustancias restringidas a nivel internacional por el Convenio de Estocolmo debido a sus impactos negativos en el ambiente y la salud; finalmente, el ineficiente uso de agua para estos procesos genera altos volúmenes de vertimiento diarios a los cuerpos de agua naturales [21].

Tabla 1. Aspectos e impactos de los vertimientos de curtiembres.

Aspecto	Impacto
Cloruro de sodio, ácido sulfúrico, ácido sulfhídrico	Alteración de la biota del efluente
Transformación de ácido sulfúrico a sulfhídrico	Nocivo para la salud humana

Aspecto	Impacto
Ácido cianhídrico	Nocivo para la salud humana
Cromo (VI)	Persistente en el ambiente, cancerígeno

Fuente: *Elaboración propia (2019)*

Legislación

Desde el año 1974 se ha buscado proteger el medio ambiente de los vertimientos, en la Figura 2 se muestra el avance en la normativa colombiana.

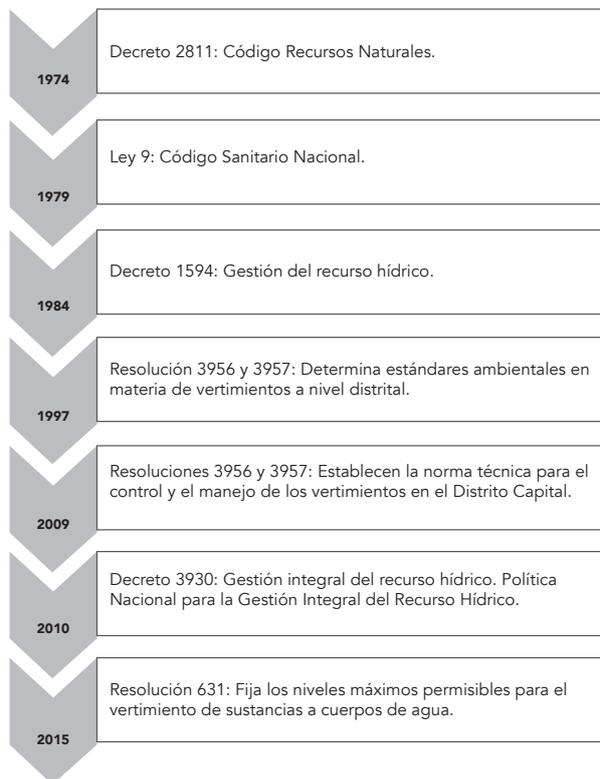


Figura 2. Avance de la normativa de vertimientos en Colombia. Fuente: *Editado por autor, información tomada de [18]*

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) reglamentaron el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y crearon una nueva normativa de vertimientos, la Resolución 631 de 2015, la cual busca garantizar el control efectivo de las sustancias contaminantes que son vertidas en los cuerpos de agua [22].

Tipos de tratamientos

Existe un gran número de tratamientos físicos y químicos para la neutralización, reducción y eliminación de desechos químicos [23], generalmente se pueden ver en una planta de tratamiento convencional de agua residual, la cual está dividida por procesos de acuerdo con los objetivos que se fijan. A su vez, estos procesos están subdivididos por unidades especializadas las cuales se escoge según la necesidad, las características del agua y la capacidad económica de inversión.

Pretratamiento

Su función es remover los sólidos de gran tamaño y las arenas presentes en el efluente de agua de la planta de tratamiento, evitando los daños por corrosión de los equipos involucrados en los diferentes procesos de tratamiento de la planta; en este método se pueden conseguir los siguientes equipos:

- Cribado o desbaste
- Tamizado
- Trampa de grasas
- Desarenador [24]

Tratamiento primario

Es la etapa del proceso que se encarga de eliminar los sólidos en suspensión y agentes patógenos mediante procesos físico-químicos que se mencionan a continuación.

- Sedimentación
- Flotación
- Coagulación-sedimentación
- Filtración

- Tanque séptico
- Tanque Imhoff
- Reactor anaerobio de flujo a pistón-RAP
- Reactor anaerobio de flujo ascendente-UASB
- Lagunas de estabilización (oxidación) [25]

Tratamiento secundario

En este proceso, es el sistema que tiene como objetivo eliminar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y sólidos en suspensión, los más utilizados son:

- Laguna aerobia
- Laguna facultativa
- Lodos activados
- Zanjales de oxidación
- Filtros percoladores
- Biodiscos [26]

Tratamiento terciario o complementario

Conocido también como tratamiento avanzado, en él se alcanzan efluentes finales de mayor calidad, que permiten ser vertidos en zonas muy exigentes o incluso ser reutilizados [27]. Algunos de ellos son:

- Lagunas de maduración
- Electrocoagulación
- Desinfección

Electrocoagulación

A causa de las problemáticas ambientales por los vertimientos de agua residual de la industria de la curtiembre y de otro tipo de industrias, y en la búsqueda de avances en eficiencia y sustentabilidad, se han desarrollado una serie de tecnologías basadas en la electroquímica, como la electrocoagulación, las cuales garantizan ventajas en comparación con los métodos tradicionales de tratamiento puntual. La electrocoagulación no es una tecnología nueva, sin embargo, ha sido poco estudiada y desarrollada, aun así, se ha logrado alcanzar con ella un aprovechamiento importante para tratamientos puntuales de algunos contaminantes, lo cual atrajo el interés científico por la necesidad de entender a fondo el proceso y sus mecanismos [28].

Origen

La electrocoagulación surgió en el año 1906 en Estados Unidos, lugar donde se otorgó la primera patente. Diversos problemas de tipo financiero y de regulación de incentivos causaron tropiezos para que la industria se hiciera con el uso de esta técnica. Cabe resaltar que se conocen desarrollos anteriores de esta tecnología, si bien la primera patente data del año 1906, al otro lado del océano Atlántico años atrás, en 1888 exactamente, se reportó el primer ensayo en Londres por Webster el cual utilizaba ánodos de hierro soluble con una potencia de 1,8 vatios entre los electrodos a una distancia de una pulgada y una corriente anódica de $0,6 \text{ A/pie}^2$ ($6,4583 \text{ A/m}^2$). Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica en el año 1893, que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, condado de Putnam, en el estado de Nueva York. En 1896, en Lousville, Kentucky, se usó una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, en este proceso se utilizaron ánodos de hierro y aluminio. Doce años después, en Santa Mónica, utilizando el proceso de Webster se consiguieron unas reducciones de 40 % de materia orgánica. Bull en el año 1911 electrolizó una salmuera con ánodos de grafito interponiendo una membrana de asbesto entre los electrodos. En el año que iniciaba la Primera Guerra Mundial se utilizó en Nueva York una modificación del proceso de Webster llamado Landreth, en este se adiciona cal para mejorar la conductividad del electrolito. Años más tarde, en 1932, Alemania utilizaría la electrocoagulación con eficiencias del 50 % de reducción de la DBO en aguas residuales. Sin embargo, este proceso falló por el alto costo de la energía y la necesidad de recambiar los electrodos. Otro país que en utilizó la electrocoagulación fue la antigua Unión Soviética (URSS) en el año 1947, utilizaría el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido ferroso siendo capaz de alcanzar 70 a 80 % de remoción para DBO, además, se han reportado procesos para remover partículas dispersas de aceite, grasas y petróleo [29]. Unos años más tarde, en la década de los cincuenta, el profesor Mendía, de la Universidad de Nápoles, hizo uso de esta técnica para la desinfección de las aguas negras de ciudades costeras, en un

procedimiento en el cual mezcló 25 al 30 % en volumen de agua de mar antes de la electrolisis. En Noruega, Foyen combinó 20 % de agua de mar con las aguas residuales en la electrolisis para la remoción de fosfato haciendo uso de electrodos de carbón, sin embargo, este método tuvo problemas de corrosión. En 1971, en Vancouver del norte, se usaron ánodos de aluminio para disolverlos y coagular aguas negras, cabe destacar que este proceso operó a un costo menor que el requerido con alumbre [30].

En las últimas décadas se han reportado trabajos en los que se utiliza la electrocoagulación para eliminar partículas de aceite, grasas y petróleo en tratamientos de agua residual provenientes de procesos de electroplateado, fábrica de textiles y de potabilización del agua en sí [30].

Fundamento

Esta tecnología tiene semejanza con la coagulación, teniendo en cuenta que se caracteriza por que presenta una mayor eficiencia, ventaja que está determinada por los cationes de sacrificio generados, los cuales presentan mayor porcentaje de remoción frente a los provenientes de productos químicos tradicionales como sulfato de aluminio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ o sulfato de hierro (FeSO_4) . Su uso implica utilizar un reactor de electrocoagulación, considerado como una celda electrolítica cuyos elementos conductores de corriente o electrodos son sumergidos en el flujo de agua que contiene los metales o sustancias para remover con el tratamiento, este reactor se aprovecha como un medio electrolítico que puede tener una disposición discontinua o continua. Su funcionamiento requiere una fuente externa de energía eléctrica, que da origen a las reacciones electroquímicas como consecuencia del flujo de electrones entre los electrodos metálicos y los contaminantes presentes en el efluente, lo cual tiene como efecto procesos de reducción en el cátodo y oxidación en el ánodo, de igual modo tiene como resultado iones metálicos y O, el último producido por la hidrólisis del agua. Cuando esto ocurre, los compuestos contaminantes forman componentes hidrofóbicos, los cuales, según su densidad, se decantan o flotan, lo que facilita su

remoción por métodos de separación secundaria. Sobre la base de los iones metálicos a un pH apropiado, se puede formar una amplia variedad de especies coaguladas e hidróxidos metálicos, dando paso a la desestabilización, sedimentación y eliminación de contaminantes disueltos, por ejemplo los metales pesados. Los compuestos más estudiados son: H_3AsO_4 , Ni, Fe, Zn, Cu, Cd, Pb, Cr (VI) y Mg, para los cuales los electrodos más utilizados en este proceso son: Fe^{2+} y Al^{3+} , con los cuales se han reportado altos porcentajes de remoción [31].

Proceso de electrocoagulación (EC)

De acuerdo con [28], los procesos físicos y químicos que ocurren durante la electrólisis permiten la remoción de los contaminantes, los cuales se describen así:

En los electrodos se generan iones positivos y negativos gracias a las reacciones que en ellos suceden, el ánodo provee iones metálicos, a este electrodo se le conoce como de sacrificio gracias a que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolver. Los iones cumplen la función de desestabilizar la carga que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua, cuando la carga se neutraliza, desaparecen los sistemas que permiten que las partículas estén suspendidas, y así que se formen agregados de los compuestos para dar paso al inicio de la coagulación [28].

Los electrodos que generan iones desencadenan los procesos de eliminación de los contaminantes, procesos que se pueden dar por dos vías: reacción química y precipitación, o procesos físicos de agregación de coloides, que a partir de su densidad decanta o flota. Las principales reacciones que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, ionización y formación de radicales libres. Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua-compuestos contaminantes, que llevan a la eliminación de la carga contaminante del agua.

La ley de Faraday es la que rige el proceso de electrocoagulación. Según esta ley, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y a su vez el total de moles de sustancias formadas está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema. A diferencia de los procesos convencionales, en la electrocoagulación es formado el coagulante in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio.

Según explicó Mohllah, en este proceso intervienen tres etapas: la primera es la formación de la coagulante in situ mediante la oxidación electrolítica del metal del ánodo, seguidamente se desestabilizan los contaminantes y, por último, se forman los flóculos por agregación de partículas del contaminante o su adsorción en el coagulante [32].

Este proceso es afectado por diferentes factores, entre los más importantes se encuentra la naturaleza y concentración de contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad, y estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación de coagulante [28].

Ventajas y Desventajas

El proceso de electrocoagulación ofrece grandes ventajas y a su vez se encuentran algunas desventajas, a saber:

Ventajas

- Costos de operaciones menores en comparación con los métodos convencionales de tratamiento.
- Maquinaria sencilla, pequeña y de fácil operación.
- No requiere almacenamiento, ni uso de equipos químicos.
- Genera lodos compactos, en menor cantidad, menor impacto por la disposición de estos residuos.
- Producción de flóculos de gran tamaño en comparación a los métodos convencionales. [33]
- Efectividad en remoción de un amplio rango de contaminantes.

- Permite la limpieza y reciclaje del agua.
- La transmisión de corriente permite la excitación de las partículas más pequeñas de los contaminantes, lo que aumenta la coagulación.
- Reduce la contaminación de los cuerpos de agua naturales.
- Aporta un resultado de agua con menor cantidad de sólidos disueltos, y permite reutilizarla con un costo menor de tratamiento.
- Puede generar agua potable, incolora e inodora.
- La remoción de los contaminantes ocurre gracias al arrastre a la superficie por burbujas, lo cual facilita su eliminación.
- Menor generación de sales y residuos [28], [30]

Desventajas

- Se hace necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos residuales tienen alto contenido de hierro y aluminio dependiendo del material de los electrodos de sacrificio.
- Se convierte en un tratamiento costoso, si en la región la tasa de electricidad es alta.
- La formación de oxígeno en el ánodo se puede convertir en una capa que impide la transmisión de electricidad, lo que disminuye la eficiencia del tratamiento [28].

Diseño

A partir de la revisión bibliográfica, se deben tener en cuenta los parámetros que afectan el diseño del reactor de electrocoagulación, en el siguiente orden:

- Área de la celda: porque de ella depende el volumen de agua para tratar.
- Tipo de electrodo: los materiales más utilizados son el hierro, y con mayor efectividad el aluminio, para determinar la distancia entre placas.
- Variabilidad de la solución: de acuerdo al pH y la conductividad [34]
- Número de celdas
- Flujo de entrada
- Forma de operación: tipo Batch o proceso continuo

- Tiempo de residencia
- Materiales de construcción
- Relación voltaje e intensidad de corriente de la fuente de poder de corriente y su capacidad [35]

El reactor se diseña contemplando tres regiones:

- Región superior, llamada zona de flotación, para la disposición de lodo de flotación o lodo menos denso y la espuma.
- Región media de reacciones electroquímicas, llamada zona de reacción, en donde se encuentran los electrodos.
- Región inferior, llamada zona de sedimentación, donde se depositan los lodos más densos [35].

Los electrodos en la electrocoagulación

La ubicación de los electrodos (cátodo, ánodo) es de forma paralela en el tanque, un ejemplo de ello se muestra en la Figura 4, donde: a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo; b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie [36].

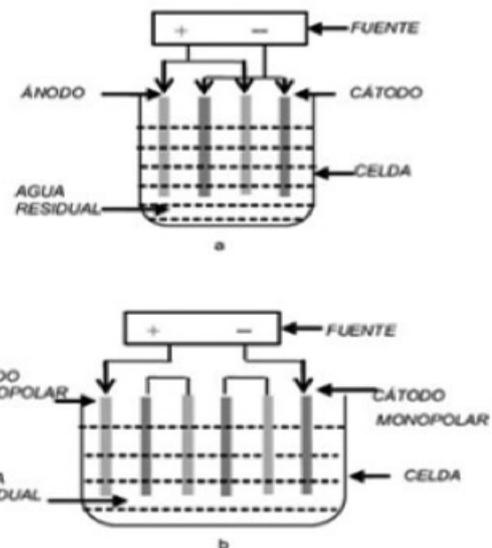


Figura 4. Reactores para electrocoagulación tipo Batch.
Fuente: [36]

Factores que afectan el proceso

- *Temperatura*: aunque los efectos de este factor en el proceso no han sido muy investigados, de acuerdo con [36] se encontró que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60 °C punto donde se hace máxima, para seguidamente decrecer [36].
- Densidad de corriente (se puede controlar), la cual determina la cantidad de iones de hierro o aluminio (Fe^{+2} y Al^{+3}) liberados por los electrodos (dosis de coagulante y velocidad de generación de burbujas), esta define la distancia entre los electrodos [36].
- Presencia de NaCl: la sal aumenta la conductividad del agua residual, la presencia de los iones de cloruro reduce el efecto adverso de los iones HCO_3^- y $SO_4^{=}$, si hay presencia de iones carbonatados o sulfatos pueden conducir a la sedimentación de Ca^{+2} y Mg^{+2} y generar una capa insoluble que cubre los electrodos, aumenta el potencial entre ellos y así decrece la eficiencia de la corriente. Se recomienda mantener la cantidad de Cl^- del 20 % [36].
- pH: su efecto se refleja en la eficiencia de la corriente y se relaciona con la disolución del hidróxido del metal, teniendo en cuenta que la eficiencia del proceso depende de la naturaleza del contaminante y con una mejor remoción en un pH cercano a 7. Sin embargo, el pH neutral genera un alto consumo de energía, gracias a la variación de la conductividad. El agua residual ácida después de un proceso de electrocoagulación puede incrementar el pH, mientras que en agua residual alcalina ocurre el efecto contrario [36].

Costo

Hay estudios que analizan minuciosamente los costos de tratamiento mediante la electrocoagulación por etapas del proceso, como se observa en el ejemplo de la Figura 5.

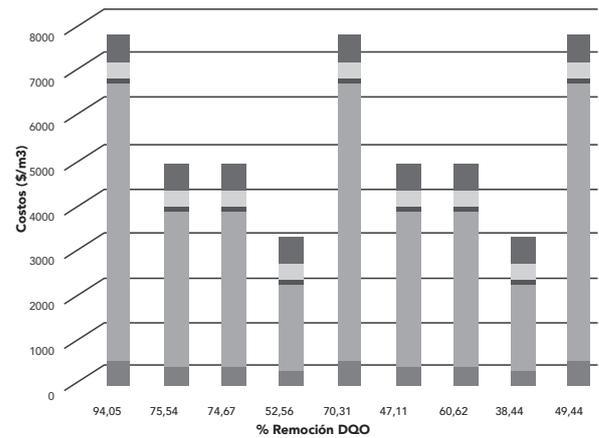


Figura 5. Costo de operación de la electrocoagulación para diferentes porcentajes de remoción de DQO. Fuente: [37]

En la Figura 5, se muestra que para el 2008 los gastos de tratamiento en una industria de electrocoagulación se sintetizan de la siguiente manera:

- Para el montaje del reactor con capacidad de tratamiento de 1 m³/h se requirió: fuente de voltaje (400 A), \$14.332.500; celda electroquímica, \$9.000.000; bomba, \$2.800.000; tubería y accesorios, \$1'000.000; centrifuga, \$111.159.200; subtotal: 138.159.200; si se incluye el diseño, los planos, montaje e instalación, el total asciende a \$207.238.800, lo cual es relativamente más económico si se lo compara con los costos del montaje para coagulación química: \$297'588.060.
- Los costos de insumos para la operación en el año fueron, en el caso del consumo de energía en la zona industrial en Medellín, \$/Kw-h 256,42; hierro 1.913,4; ácido sulfúrico \$/g 3.747.
- Mayores costos de operación (7.475,15 \$/m³) se atribuyen a una remoción del 94,1 % de DQO y pH de 5, siendo la más alta remoción,

obteniendo los menores costos en este pH considerando que en ellos se obtuvieron buenos porcentajes de remoción.

- Los mayores costos observados, considerando los porcentajes de remoción, se obtuvieron en rangos de pH de 7 y 8.
- El menor costo de operación (3.183,57 \$/m³) se les atribuye a rangos de pH en el efluente de 5 y una remoción de DQO de 52,56 %, teniendo en cuenta que para un pH de 7 se obtuvo un costo similar (3.171,92 \$/m³) por un porcentaje de remoción de 38,4 %.
- La Figura 5 muestra que los costos de energía eléctrica son los más representativos, y corresponden entre el 60 y 80 % del valor total por ensayo, lo cual está ligado al porcentaje de remoción, si se comparan los costos de desgaste de electrodo no alcanzan a ser el 10 % y los costos por tratamiento de lodos son cercanos al 7 % [37].

Además, en [37] se habla de costos de tratamiento por \$114,79 x m³, reactivos por \$2.078,00 x m³, y operarios \$1.750,00 x m³, con un total de \$3.942,30 x m³.

Al comparar la coagulación química y la electrocoagulación para la remoción de arsénico del agua con un caudal constante para tratar (año 2012), el consumo fue de 0,607 kWh/m³ y 0,7375 kWh/m³ respectivamente, considerando para el año 1,34/ kWh. En el caso de la coagulación química, para la remoción más alta de arsénico con un 99 %, el costo más bajo fue de \$1,19 x m³, mientras que en el caso de la electrocoagulación para obtener un porcentaje de remoción de 97% en hierro y 94% en arsénico, el gasto fue de \$1,67 x m³, teniendo en cuenta que en este último método se genera menor cantidad de lodo residual por m³ de agua tratada (0,0019 m³ de lodo por m³ de agua residual tratada). Al hacer la comparación, será menor el costo de tratamiento de los mismos, teniendo en cuenta que la coagulación química genera en promedio 0,02 m³ de lodo por m³ de agua residual tratada [38].

Antecedentes

A continuación, se presentan algunos antecedentes de investigaciones realizadas sobre electrocoagulación en agua de curtiembre y otras industrias:

- Se utilizaron electrodos de hierro y aluminio; se analizaron los efectos del pH inicial, densidad de corriente y consumo de energía: pH inicial de 7,0 con una densidad de 28 mA/cm², para un proceso de 60 minutos con una eficiencia de eliminación de DQO y COT (carbono orgánico total) de 72 y 57 % con electrodos de aluminio y de 69 y 60 % con electrodos de hierro; se registró un consumo de energía mínimo para la eliminación más alta de DQO y COT, la cual fue de 0,37 y 0,69 kWh/m³. El proceso de EC no depende del material del electrodo sino de la etapa de proceso de curtido [39].
- Este artículo [40] se basa en la investigación del rendimiento de un proceso híbrido de electrocoagulación/electrólisis para eliminar DQO, NH₃-N, Cr y color; la densidad de corriente y el tiempo de electrólisis se analizaron para optimizar el proceso con electrodos de aluminio o hierro, la EC fue integrada luego con la electrodiálisis (ED). La EC con electrodos de aluminio integrado con ED obtuvo eficiencias de eliminación para DQO, NH₃-N, Cr y color de 92, 100, 100 y 100 %, respectivamente, la conductividad tuvo un valor de 0,371 mS/cm a 45 minutos; para EC con electrodos de hierro integrada con ED, las eficiencias fueron 87, 100, 100 y 100 % respectivamente para los parámetros de eliminación, con una conductividad de 1,5 mS/cm a 75 minutos.
- En otro estudio [41] se encontró que la aleación de aluminio (duraluminio A-U4G) era más eficiente que el aluminio puro para la eliminación de DQO y cromo. Se usaron muestras de 2 L para cada prueba de electrocoagulación con contenido de cromo de 7 g/L y 6 g/L de DQO. La celda de electrocoagulación (20 x 10 x 5 cm) contaba con placas de electrodos de 15 x 7 cm, con una distancia entre ellas de 2 cm, la densidad de corriente utilizada fue 200-400 A/m² con variaciones de voltaje de 2 a 3 V. La eficiencia aumentó con la densidad de corriente

- y el tiempo de electrólisis, con electrodos de duraluminio se obtuvieron rendimientos de cromo del 93, 95,4 y 99,7 % después de 360 minutos a densidades de corriente de 200, 300 y 400 A/m², y con electrodos de aluminio las eficiencias fueron 75, 93 y 99 % a 200, 300 y 400 A/m².
- En este trabajo se usó, como reactor de electrocoagulación, un tanque cúbico elaborado de plexiglás, con un volumen efectivo de 2,5 L, se pusieron en el tanque 10 placas metálicas diseñadas de hierro de 11 x 7 cm y 2 mm de grosor, también se utilizaron electrodos de matriz bipolar y monopolar en el reactor. El pH óptimo fue 6, la concentración inicial de cromo fue 500 mg/L. El experimento se desarrolló a diferentes tiempos de EC, el voltaje utilizado fue 30 V, y se encontró que 25 minutos es el tiempo óptimo; el aumento en el tiempo de prueba condujo a un aumento del porcentaje de remoción, sin embargo, también implica un aumento en la energía consumida, la velocidad de rotación adecuada del imán es de 100 rpm. Este experimento obtuvo valores de remoción del 99,96 % en Cr III [42].
 - En [43], el principal objetivo de los experimentos fue investigar los efectos de los diversos parámetros operativos, como la densidad de corriente, el tiempo de duración, la concentración inicial de fosfato, la temperatura, el pH, las concentraciones de NaCl y el tipo de electrolito. Los rangos fueron: 10-150 mg PO₄/L para inicial de fosfato, un rango de pH entre 3-10, 0,5-5,0 de NaCl/L para electrolitos de apoyo, 2 g/L para los otros electrolitos de soporte y una densidad de corriente entre 1,13-4,54 mA/cm². La remoción de PO₄ fue de 85 y 95 % a densidades de 1,13 a 4,54 mA/cm².
 - En este trabajo [44] se examinó la eficiencia de la EC y la adsorción en términos de eliminación de DQO, disminución de la turbidez y cantidad de cromo residual VI. Se mezclaron 5 g de carbón activado con 500 mL de efluente de curtidura para luego agitarse durante 2 h y 30 minutos. La EC se realizó en una celda de 800 mL, los electrodos fueron de aluminio, el efluente se trató a una corriente de 1,5 A, la duración de la electrólisis fue de 2 h y 30 min. El Cr VI se determinó de acuerdo con el método Balasubramanian. La concentración final de Cr con EC fue de 53 µg/L y con adsorción (AD) fue de 175 µg/L, mientras que uniendo los dos métodos alcanzó una concentración final de 19 µg/L que representa un 92 % de eficiencia, la remoción de DQO tuvo una eficiencia de 75 % con EC+AD y turbidez de 96,1 %.
 - Se utilizaron electrodos de Al y Fe, se evaluó la distancia entre electrodos, la densidad de corriente, velocidad de agitación. Los electrodos de aluminio fueron más efectivos en la remoción de cromo, con un pH de 4,52 y a 28 °C se encontraron las condiciones óptimas de eliminación de cromo, la concentración inicial de Cr 3596 mg/L, el espacio del electrodo = 0,5 cm, la velocidad de agitación = 382,3 rpm y densidad de corriente = 57, 87 mA/cm², a estas condiciones de operación alcanzaron remociones de 99,76% de Cr III, el 64 y 61% de carbono orgánico (COT) y DQO respectivamente, los autores aconsejan utilizar electrodos de aluminio [45].
 - En [46], se tuvo el objetivo de tratar el suero resultante de los procesos de transformación láctea, que normalmente es vertido en los efluentes y aumenta, por tanto, las cargas de DBO₅, hasta un valor de 37,5 kg de O₂/t de leche tratada. Se tomaron las muestras de análisis y de tratamiento del tanque de homogenización de la industria, se utilizó un reactor discontinuo a escala prototipo con capacidad de depurar 2 L de agua residual, con electrodos de hierro y aluminio con forma de placas rectangulares dispuestas en paralelo, y conectadas a una fuente de voltaje de corriente continua. Para cada una de las muestras se realizaron 4 repeticiones, se comprobó que los mejores porcentajes de remoción se obtienen en condiciones iniciales de pH 5, densidad de corriente 43,23 y 32,43 A/m² y tiempo de proceso de 15 minutos, estas remociones fueron de 93,99 y 75,73, % respectivamente.
 - Debido a la gran cantidad de agua residual generada por la industria láctea, en el año 2016 se realizó una investigación enfocada a su tratamiento por medio de la electrocoagulación, fundamentada por tres factores: tiempo, número de placas y voltaje del sistema, se alcanzaron eficiencias de remoción de DQO, DBO₅ y SS

- del 82, 82 y 76 %, respectivamente [47].
- En un proyecto donde construyeron y evaluaron una planta piloto de electrocoagulación como tratamiento de ARI galvanera para reúso, se puso en práctica un prototipo en la universidad para remover metales pesados como Cr, Pb y Zn, se trataron 10 L y se obtuvieron eficiencias de remoción en Cr (51,65 %), Ni (18,09 %), Pb (50 %) y Zn (47,37 %). Los parámetros fueron: pH, 3,18; conductividad, 21,83 mS/m, y temperatura, 48,5 °C [48]. (
 - En [49], los investigadores utilizaron un sistema de EC de corriente continua, y encontraron que la densidad de corriente óptima, para la eliminación de DQO, sulfuro y grasas de aceite en el agua residual del tambor de encofrado, fue de 35, 35 y 3,5 mA/cm², respectivamente, a los 10 minutos de electrólisis y con pH 3; se obtuvieron eficiencias de 82 % para DQO, para sulfuro, 90 % y para grasas y aceites, 96 %, con un consumo medio de energía de 5,768 kWh/m³ de DQO, 0,524 kWh/m³ de sulfuro y 0,00015 kWh/m³ de aceite y grasas. (engil, Kulac, & Özacar, 2009)

Conclusiones

La industria del cuero es reconocida como una de las que más aporta a la contaminación de las aguas por el alto grado de productos químicos que utiliza, lo que genera importantes volúmenes de residuos y efluentes líquidos con una combinación considerable de compuestos orgánicos e inorgánicos que hacen que su tratamiento sea más complejo, de ahí que sea necesario buscar técnicas como la electrocoagulación para el tratamiento de los efluentes de este tipo de industrias.

- El análisis de la bibliografía consultada permite ver que el método de electrocoagulación (EC) es muy eficiente y eficaz, y que ha alcanzado porcentajes de remoción iguales o mayores al 90 % en DQO, Cr, fosfatos, turbidez y color, en las investigaciones que lo emplean, lo cual responde el primer interrogante planteado en este artículo.
- El cromo es un elemento que debe ser eliminado del agua residual por ser cancerígeno; la ventaja que ofrece la electrocoagulación es la remoción

de altos porcentajes, lo que se evidencia en las investigaciones que trataban agua residual industrial como la de curtiembre.

- La electrocoagulación muestra ventajas en comparación con los métodos convencionales como la coagulación química, la EC es evidentemente más económica cuando se aplica en escalas significativas debido a la reducción de subproductos como los lodos residuales, lo que disminuye los costos para su disposición final.
- Aunque es un método que se usa desde hace décadas, la electrocoagulación es muy versátil y adaptable a diferentes procesos. En la actualidad se ha convertido en un tema de investigación, por sus beneficios en cuanto a eficiencia, capacidad de manejo, operación y su ventaja económica; también ha sido utilizada en otros tipos de aguas residuales, como las de la industria láctea.

Referencias

- [1] Unesco, Programa Mundial para la Evaluación de los Recursos Hídricos, *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017: Aguas residuales, el recurso desaprovechado*. Francia: Unesco, 2017.
- [2] ONU, "Agua", Naciones Unidas, 22 de marzo de 2017. Disponible en: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>
- [3] Organización Mundial de la Salud, Unicef, "Agua", 14 de junio de 2019. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- [4] OMS y UNICEF, *Organización Mundial de la Salud*. 14 de junio de 2019. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- [5] Fundación Aquae, "Agua y contaminación", 2017. *Fundacion Aquae*. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/sostenibilidad/agua-y-contaminacion/>
- [6] Unesco, *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos*

- Hídricos 2019. No dejar a nadie atrás*, París: Unesco, 2019.
- [7] V. M. Fernández Pantoja, Proyecto de grado, Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Pasto, Nariño, 2018. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/0055366824441f6497291>
- [8] S. Tuset, "La electrocoagulación, un tratamiento económico y eficaz para las aguas residuales", *Condorchem envitech* [blog], 14 de octubre de 2013. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/electrocoagulacion-aguas-residuales/>
- [9] M. García, F. D. Sánchez, R. Marín, y H. Guzmán, "Agua", en *El Medio Ambiente en Colombia*, IDEAM, agosto de 2001, pp. 114-189. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap4.pdf>
- [10] Fundación Aquae, "Tales de Mileto: 'El agua es el principio de todas las cosas'", Fundación Aquae. 2015. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/historia-del-agua/el-agua-principio-de-todas-las-cosas-que-existen-tales-de-mileto/>
- [11] M. Batisse, "El extraño caso del H₂O". *El Correo de la UNESCO*, febrero de 1978. Adaptado para *Uruguayeduca*. 2017. Disponible en: <https://uruguayeduca.anep.edu.uy/sites/default/files/2017-12/El%20extra%c3%b1o%20caso%20del%20H2O.pdf>
- [12] B. Herradón, "Lavoisier y el oxígeno (1776)", en *Los avances de la Química*, 19 de abril de 2012. Disponible en: <http://www.losavancesdelaquimica.com/blog/2012/04/19-de-abril-de-2012-lavoisier-y-el-oxigeno/>
- [13] F. A. Castro, "Cien años de análisis de las aguas mineromedicinales", *Balnea*, núm. 5, 15 de abril de 2013. Disponible en: <https://revistas.ucm.es/index.php/ANHM/article/viewFile/41745/39781>
- [14] M. García, F. D. Sánchez, R. Marín, y H. Guzmán, "Agua", en *El Medio Ambiente en Colombia*, IDEAM, agosto de 2001, pp. 114-189. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap4.pdf>
- [15] Fibras y Normas de Colombia S.A.S., "Aguas residuales: Clasificación y características" [blog], 2018. Fibras y normas de Colombia S.A.S. Ingeniería en Aguas. Disponible en: <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/aguas-residuales-clasificacion-y-caracteristicas/>
- [16] J. P. Rodríguez Miranda, A. R. Cifuentes Cetina, y J. K. Ávila Viatela, "Remoción de sustancias disruptoras endocrinas 'levonorgestrel' en fuentes hídricas", *Revista Logos, Ciencia y Tecnología*, vol. 8, núm. 1, pp. 183-197, jul.-dic. de 2016. Disponible en: <http://revistalogos.policia.edu.co/index.php/rict/article/view/305/html>
- [17] M. J. Gil, A. M. Soto, J. I. Usma, y O. D. Gutiérrez, "Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos", *Producción + Limpia*, vol. 7, núm. 2, pp. 52-73, jul.-dic. 2012.
- [18] Alcaldía Mayor de Bogotá. Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). "Guía de producción más limpia, para el sector curtiembres de Bogotá. Enfoque en vertimientos y residuos", 2015. Disponible en: <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/24732/3987253/Guía+de+producción+ más+ limpia+ para+ el+ sector+ curtiembres+ de+ Bogotá.+Enfoque+ en+ vertimientos+ y+ residuos.pdf>
- [19] D. M. Laguna Grajales y C. A. Manrique Beltrán, *Tratamiento de las aguas residuales del proceso de teñido de cuero en bombo por electrocoagulación- sector de San Benito*. Tesis de grado, Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2014.
- [20] S. G. Álvarez, M. Maldonado, A. Gerth, y P. Kuschik, "Caracterización de agua residual de curtiduría y estudio del lirio acuático en la recuperación de Cromo", *Inf. Tecnol.*, vol. 15, núm. 3, pp. 75-80, 2004.
- [21] Greenpeace, "Cueros tóxicos. Nuevas evidencias de contaminación de curtiembres en la Cuenca Matanza-Riachuelo", 2012. Disponible en: <http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2012/contaminacion/Cueros-Toxicos-Riachuelo.pdf>

- [22] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución 0631 de 17 de marzo de 2015". Minambiente. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
- [23] J. A. Vera Solano, "Tratamientos de evaporación para la reducción de residuos químicos generados en los laboratorios de química general de la Universidad de Pamplona", *Cuaderno Activa*, núm. 6, pp. 89-97, julio de 2014). Disponible en: <http://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/218/208>
- [24] Comisión Nacional del Agua, Conagua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Zonas Rurales, Periurbanas y Desarrollos Ecoturísticos*. México: Comisión Nacional del Agua, 2016.
- [25] T. Orozco, 2017, Unilibre.
- [26] J. Rodríguez Gamarra, "Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades", *Tesis uson*. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/capitulo4.pdf>
- [27] Secretariado Alianza por el Agua, *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. alianza por el agua, Monográficos Agua en Centroamérica, n.º 3, 2014.
- [28] A. P. Restrepo Mejía, A. Arango Ruiz, y L. F. Garcés Giraldo, "La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas", *Producción + limpia*, vol. 1, núm. 2, pp. 58-77, 2006.
- [29] Á. Arango Ruiz, "Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: desarrollo y potencial de aplicación", *Journal of Engineering and Technology*, vol. 3, núm. 1, pp. 78-98, 2014.
- [30] Á. Arango Ruiz, "La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales", *Lasallista de Investigación*, vol. 2, núm. 1, pp. 49-56, 2005.
- [31] G. E. Acosta Niño, C. A. Coy Barrera, A. Bourdón García, y E. Cuervo, "La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales", *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 9, núm. 2, 2013.
- [32] E. Betancourt y S. Domínguez, "Electrocoagulación", Universidad Central del Ecuador. *monografias.com*, Diciembre de 2013. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos99/electrocoagulacion/electrocoagulacion.shtml>
- [33] S. Lalangui, "Electrocoagulación: ventajas y desventajas para procesos industriales", Universidad Central del Ecuador, 2007. *monografias.com*, Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos99/electrocoagulacion-ventajas-y-desventajas-para-procesos-industriales/electrocoagulacion-ventajas-y-desventajas-para-procesos-industriales.shtml>
- [34] K. E. Beltrán González, "Diseño conceptual y construcción de un electrocoagulador controlado por LABVIEW", Trabajo de pregrado de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2015.
- [35] A. J. Cazco Sánchez y S. A. Jarrín Flores, "Diseño, construcción y análisis de los parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación", Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [36] E. Weinhold y C. Martínez, *SlidePlayer*. Tratamiento de aguas residuales por métodos electroquímicos, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, abril de 2012. Disponible en: <http://slideplayer.es/slide/5569521/>
- [37] Á. Arango Ruiz, L. F. Garcés Giraldo, S. Molina Gallo, y J. S. Piedrahíta Arias, "Análisis de costos de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea". *Producción + Limpia*, vol. 3, núm. 2, pp. 10-22, jul.-dic. 2008.

- [38] S. Pérez Castrejón, M. L. Rivera Huerta, A. Martín Domínguez, S. L. Gelover Santiago, M. Piña Soberanis, A. Gómez Rojas, C. Hernández Yáñez, y J. E. Cortés Muñoz, "Comparación técnico-económica entre coagulación química y electrocoagulación para remover arsénico del agua", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 3, pp. 5-22, 2012.
- [39] A. de la Luz-Pedro, E. F. Martínez Prior, M. H. López-Araiza, S. Jaime-Ferrer, A. Estrada-Monje, & J. A. Bañuelos, "Pollutant Removal from Wastewater at Different Stages of the Tanning Process by Electrocoagulation". *Hindawi, J. Chem.*, vol. 2019, Article ID 8162931, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2019/8162931>.
- [40] A. Deghles & U. Kurt, "Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process", *Chem. Eng. Process. Process. Intensif.*, núm. 104, pp. 43-50, 2016.
- [41] S. Elabbas, N. Ouazzani, L. Mandi, F. Berrekhis, M. Perdicakis, S. Pontvianne, M. N. Pons, F. Lopicque, & J. P. Leclerc, "Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for the electrode", *J. Hazard. Mater.*, núm. 319, pp. 69-77, 2016.
- [42] T. Shahriari, G. N. Bidhendi, N. Mehrdadi, & A. Torabian, "Removal of Chromium (III) from Wastewater by Electrocoagulation Method", *KSCE J Civ Eng.*, núm. 18, pp. 949-955, 2014.
- [43] A. Shalaby, E. Nassef, A. Mubark, y M. Hussein, "Phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes" *Am. J. Environ. Eng. Sci.*, vol. 1, núm. 5, pp. 90-98, 2014.
- [44] Y. A. Ouaisaa, M. Chabania, A. Amranec, & A. Bensmailia, "Integration of electro coagulation and adsorption for the treatment of tannery wastewater – The case of an Algerian factory, Rouiba", *Procedia Engineering*, núm. 33, 98-101, 2012.
- [45] E. Gilpavas & I. D. Gómez García, "The removal of the trivalent chromium from the leather tannery wastewater: The optimisation of the electro-coagulation process parameters", *Water Sci. Technol.*, vol. 63, núm. 3, pp. 385-394, 2011.
- [46] U. Lasalle, "Tratamiento de aguas", *Ingeniería Química*, pp. 180-186, 2019.
- [47] P. López y A. Harnisth, "Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea", *Enfoque UTE*, vol. 7, núm. 1, pp. 13-21, 2016.
- [48] N. B. Morales Posada & G. E. Acosta Niño, "Electrocoagulation system as treatment of galvanic wastewater", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 20, núm. 1, pp. 33-44, 2010.
- [49] I. A. Sengil, S. Kulaç, & M. Özacar, "Treatment of tannery liming drum wastewater by electrocoagulation", *J. Hazard. Mater.*, vol. 167, núm. 1-3, pp. 940-946, 05 Feb. 2009.