

Revisión documental de la Técnica de Electrocoagulación: diseño

Darío Julián Armero Santacruz
Estudiante de Ingeniería Ambiental
Universidad Mariana

Introducción

Debido al aumento de la contaminación del recurso agua a nivel mundial, diferentes países se han interesado por realizar tratamiento de aguas para lograr su reutilización y mitigar el impacto que se está generando en la población. Normalmente, uno de los diferentes métodos que se utiliza para el tratamiento de aguas residuales se llama ‘coagulación’; sin embargo, desde el descubrimiento de la electroquímica, ha ido evolucionando, como una nueva técnica denominada ‘electrocoagulación’ (Rajeshwar e Ibanez, 1997).

En dicha técnica, los contaminantes de los efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación; pero, en este caso, las partículas son desestabilizadas de contaminantes que se encuentran suspendidos o disueltos, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales (Chen 2004).

El presente artículo muestra la segunda fase del proyecto “Revisión Documental de la Técnica de Electrocoagulación”, cuyo objetivo es el diseño conceptual de un sistema de tratamiento basado en los fundamentos teóricos de dicha técnica. Los artículos y documentos encontrados en la revisión proporcionaron una gran cantidad de información relevante para la realización y desarrollo del planteamiento propuesto.

Además, considerando los estudios previos, se consiguió una base teórica que respaldó el diseño conceptual de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales; también se presenta algunos

diseños realizados en diferentes investigaciones, con el fin de poder realizar la comparación de dicha técnica.

Problema de Investigación

Descripción de la situación actual y formulación del problema

La aceleración del crecimiento poblacional, los cambios en las prácticas familiares y laborales, y la proliferación de los asentamientos informales que todo esto genera, han ocasionado un reto cada vez mayor para la prestación de servicios; además, la mayoría de las actividades humanas utilizan agua y por ende generan aguas residuales; es decir, a medida que crece la demanda global de agua, el volumen de aguas residuales generadas y su nivel de contaminación se encuentran en constante aumento, como manifiesta la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2015), según la cual, en el año 2030 la demanda mundial de agua y energía aumentará 50 % y 40 %, respectivamente; sin embargo, existe una sobreexplotación de las fuentes, aumento de contaminación, mal uso y desperdicio por la utilización de sistemas de distribución inadecuados e ineficientes. Alrededor de dos millones de toneladas de desechos industriales y químicos, vertidos humanos y desechos agrícolas son arrojados diariamente en aguas receptoras (Restrepo, Arango y Garcés, 2012; UNESCO, 2003).

Es por esto que uno de los mayores desafíos que enfrenta hoy en día la humanidad, es el de proporcionar agua, principalmente potable; por esto, surge la necesidad de tratar las aguas residuales para evitar o controlar la contaminación de su recurso hídrico y garantizar su disponibilidad para los diferentes usos (Mollah, Schennach, Parga y Cocke, 2001).

Según la UNESCO (2016), los países latinoamericanos solo tratan el 20 % de sus aguas contaminadas, a pesar de que cuentan con el

31 % de agua dulce del mundo. Cabe resaltar que Colombia solamente logra tratar el 10 % de sus aguas contaminadas; pese a esto, los sistemas requeridos para la captación, transporte, tratamiento y disposición final de las aguas residuales son deficientes o, en muchos casos, inexistentes (Superservicios, 2013).

Para el año 2013, solo el 26 % de los municipios del país contaba con algún sistema de tratamiento de agua residual. Por otra parte, según la Unidad Ejecutora del Programa del Plan Departamental de Agua La Guajira (UEPPDA, 2017), Nariño cuenta con el 46 % de cobertura en la zona urbana y 3 % en la zona rural, con acceso a un servicio de agua potable; no obstante, la calidad es deficiente, sumada al uso inadecuado del recurso, lo que ha deteriorado progresivamente la calidad del recurso agua (Superservicios 2013; Venegas, 2018).

Por todo lo dicho, surge la necesidad de desarrollar técnicas innovadoras más eficaces y económicas para el tratamiento de aguas residuales; estos tratamientos deben ser adecuados para el propósito, tener una alta eficiencia, bajos costos y adicionalmente, traer ventajas ambientales. A este respecto, se puede mencionar que existe una serie de tecnologías emergentes que están basadas en la electroquímica y que se presentan como alternativas que ofrecen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales; entre ellas están la electrocoagulación, la electro flotación y la electro decantación (Rajeshwar e Ibanez, 1997; Restrepo et al., 2012).

La electrocoagulación se ha aplicado para tratar agua que contiene la pérdida de alimentos, grasas, tintes, partículas suspendidas, entre otros. Así pues, se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación, con el fin de conservar y recuperar el recurso hídrico; además, muchos efluentes líquidos de diferentes procesos han sido tratados por electrocoagulación; sin embargo, aunque no es una tecnología nueva, ha sido poco estudiada y desarrollada (Ping Gao y Feng Shen, 2005; Kobya, Taner Can y Bayramoğlu, 2003) and important process variables such as current density and operating time on the chemical oxygen demand (COD).

Por otra parte, teniendo en cuenta que en el departamento de Nariño las investigaciones o estudios rela-

cionados con la técnica de electrocoagulación para el tratamiento en aguas residuales es escasa o nula (Restrepo et al., 2012), se lleva a cabo este estudio, en el cual a través de revisiones, se propone, como objetivo, el diseño conceptual de un sistema de tratamiento por electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales aplicado en el contexto de la región.

Marco de Referencia

Marco Contextual

El departamento de Nariño se localiza al suroeste del país, formando parte de la región andina; limita al norte con el departamento del Cauca y el océano Pacífico; al sur con la república del Ecuador y el océano Pacífico; al este con los departamentos de Putumayo y Cauca y al oeste con el océano Pacífico.

En cuanto a su ubicación geográfica, Nariño está comprendido entre los 000°21'46"- 02°38'18" de Latitud Norte y 76°50'59"- 79°02'24" de Longitud Oeste. Cuenta con una extensión superficial de 33.268 Km². Su capital es la ciudad de San Juan de Pasto y está constituido por 64 municipios.

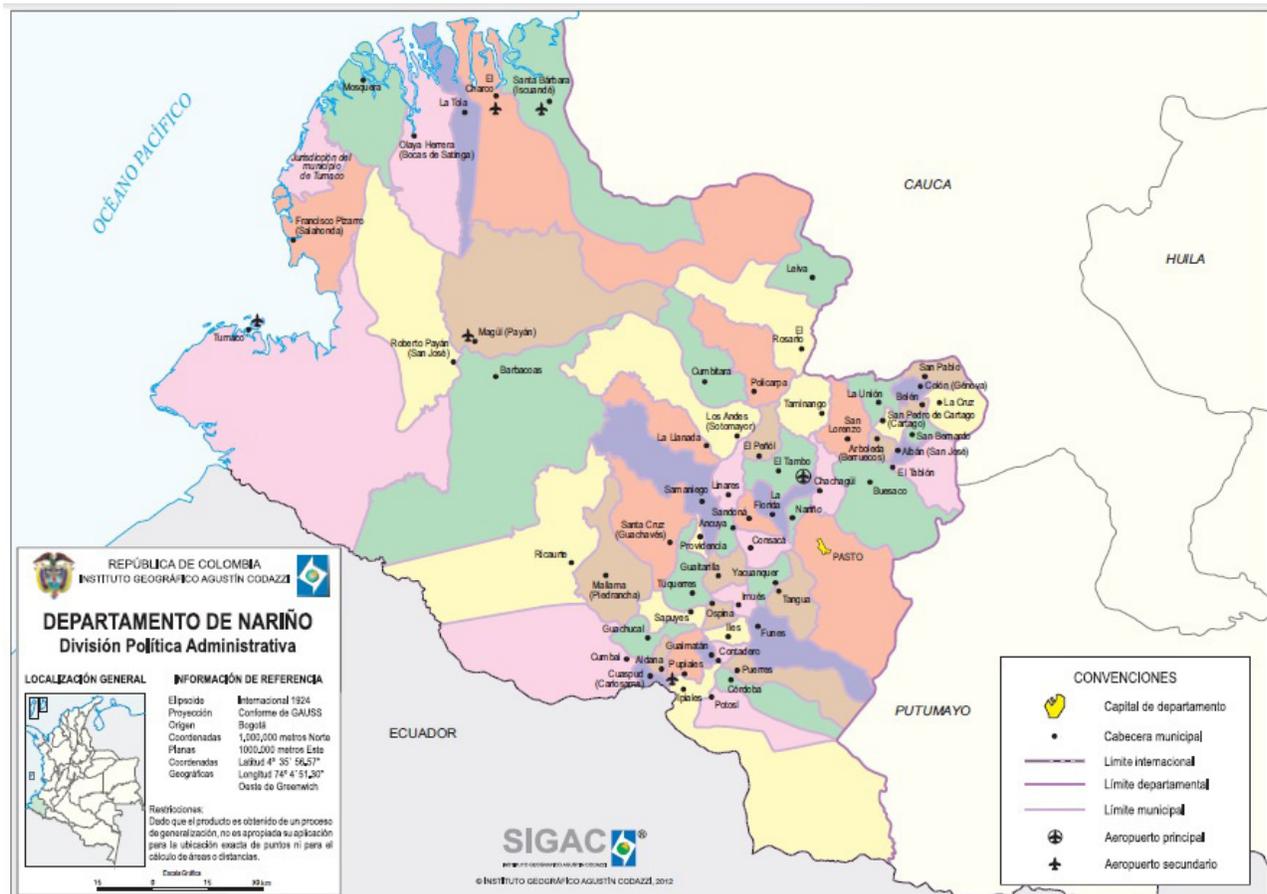


Figura 1. Mapa de ubicación.

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014).

Diseño metodológico de la investigación

Con el fin de proponer el diseño conceptual del sistema mencionado, se hizo una revisión teórica, una vez obtenida la base de datos teórica sistematizada adecuada para la investigación; se procedió a llevar a cabo una caracterización de la tecnología a estudiar, con el objetivo de dar un perfil técnico adecuado, teniendo en cuenta los parámetros más aptos para el diseño de un tratamiento de aguas residuales basado en la tecnología limpia electrocoagulación.

Para evidenciar un diseño adecuado, se presenta una serie de resultados de diferentes investigaciones, como referencias para la implementación de un diseño apropiado.

Presentación, Análisis y Discusión de Resultados

Una de las razones para proponer un diseño es la gran variedad de estudios a lo largo del tiempo, que nos brinda la certeza de asegurar que la electrocoagulación ha sido aplicada en infinidad de experimentos para el tratamiento de diversos contaminantes. Se debe aclarar que en su ma-

yoría son a escala piloto y se ha logrado cumplir con los objetivos propuestos. Para cada una de estas investigaciones, siempre se tiene en cuenta los diferentes parámetros físicos y eléctricos, con el fin de conocer su influencia sobre el proceso y buscar, en consecuencia, mayores eficiencias.

Diseño del prototipo

En cuanto a determinar un diseño para el tratamiento de aguas, se hizo uso de literatura, destacando de cada autor, información que declarase la alta eficiencia de cada arreglo. A continuación, se presenta un piloto preliminar de un sistema de electrocoagulación.

Reactor: para el dimensionamiento del reactor se debe tener en cuenta el flujo del efluente para la determinación de la capacidad de tratamiento. Debido a esto, se debe definir su largo, ancho y altura (Maldonado, Landa y Castillo, 2018). Es de suma importancia tener muy en claro el modo de operación y los objetivos a cumplir, antes de proceder con un diseño estándar, dado que existe variedad de tipos de aguas a tratar (Hakizimana et al.,

2017). Una vez determinada la capacidad volumétrica, se da paso al dimensionamiento de los electrodos. No se encuentra en la literatura una geometría definida para los electrodos debido a que pueden variar según las exigencias del investigador; por lo general se hace uso de figuras rectangulares que pueden cambiar en espesor y

arreglo.

Para determinar la cantidad de electrodos dentro del reactor, se hizo uso del procedimiento matemático tomado por Maldonado et al., (2018):

$$\text{No. de electrodos} = \frac{\text{ancho celda} - 2 * (\text{distancia del electrodo a la cara lateral})}{\text{Distancia max entre electrodos} + \text{espesor del electrodo}}$$

Hakizimana et al., (2017) aclaran que la relación que existe entre área / volumen es esencial para el escalamiento en el diseño de sistema con mayor tamaño, y que estas relaciones poseen un rango de $15 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ y $45 \text{ m}^2 / \text{m}^3$. La variación de ésta implica un cambio en el tiempo de operación y la densidad de corriente necesaria para cumplir con su objetivo de remoción.

Tipos de reactores: el modelo de reactor para la electrocoagulación es influyente en el rendimiento, operación y escalamiento del proceso. El reactor más conocido y destacado por su uso es el de celdas de lote abierto con electrodos de placa (García, Maesia, Viera y Martínez, 2017). De igual manera, existen variaciones de este tipo de reactor; una de ellas es el reactor con cilíndrico con electrodos concéntricamente interno, cuya característica es que su electrodo puede ser remplazado por una varilla metálica.

Otro de estos reactores electroquímicos que posee un filtro en forma de prensa es el que entregó resultados más satisfactorios en cuanto a la eficiencia de remoción de contaminantes, como metales pesados, orgánicos e inorgánicos.

Sistema eléctrico: para la determinación del sistema eléctrico se considera la existencia de dos tipos de corrientes: una directa y una alterna. La corriente directa posee la característica de que su flujo de electrones conserva una sola dirección, convirtiéndola en un flujo continuo (Zuluaiga, 1980). Aunque este tipo de corriente es el más utilizado en los sistemas de electrocoagulación, a menudo presenta un inconveniente: el aislamiento de la superficie anódica debido a la formación de óxido estable por la reacción oxidante, provocando procesos de corrosión, lo que da paso a un proceso conocido como 'pasivación' recubriendo el ánodo y causando la disminución de la eficiencia del proceso de electrocoagulación (García et al., 2017).

En cuanto al tipo de corriente alterna, es una posible alternativa debido a su variación periódica de polaridad, brindando mayor tiempo de operación del sistema y evi-

tando la pasivación del ánodo.

Materiales de electrodos: una vez realizada la consulta bibliográfica, se puede afirmar que en el proceso de electrocoagulación se hace uso de variedad de ánodos y cátodos de sacrificio, dando cabida a la experimentación con nuevos materiales. No obstante, los electrodos más utilizados son: hierro, aluminio, acero inoxidable. En otro estudio desarrollado por Carhuancho y Salazar (2015), los autores hicieron uso de electrodos de zinc, magnesio y grafito, para el tratamiento de aguas residuales de la laguna de oxidación.

Separación de electrodos: la distancia de los electrodos es una variable que influye notablemente en el proceso de electrocoagulación (Robles y López, 2017), debido a que existe una relación directamente proporcional entre distancia de electrodos y resistividad de contaminantes presentes en el fluido, dando por respuesta una mayor eficiencia de coagulación, si la distancia entre ánodo y cátodo es más corta (Mehdi Dolati y Hassan Khorsandi, 2017).

Tiempo de exposición: es otra variable a tener en cuenta al momento de realizar un diseño, dado que, con la cantidad de corriente suministrada se puede determinar los tiempos de exposición, dato influyente para el sistema en su eficiencia. Según Perez Bendezu (2018), el tiempo de exposición nos determina que a mayor valor, mejores serán los procesos de formación de aglomerados; en otras palabras, favorece el proceso de floculación. Unos de los indicadores que determinan la selección de los tiempos de exposición, son la temperatura y el cambio de color del agua (Robles y López, 2017).

Enseguida se presenta los resultados de diseño en otras investigaciones en las que se realizó experimentos para tratar diferentes aguas residuales; se expone los resultados específicos para dichas investigaciones:

Arango Ruiz y Garcés Giraldo (2007) construyeron un reactor tipo Bach para realizar pruebas de tratamiento so-

bre aguas residuales de la industria láctea y obtuvieron los siguientes resultados:

- **Distancia entre electrodos:** para separaciones entre electrodos inferiores a 10 mm los tratamientos son prolongados; hubo atascamientos por deposición de lodo sobre la superficie de los electrodos, impidiendo la circulación del medio acuoso y la generación de turbulencias que favorecieron la coagulación, dando como resultado, bajas remociones de DQO. Para distancias entre electrodos mayores a 10 mm no hubo cambios importantes en el proceso, en comparación con los resultados obtenidos a 10 mm, por lo cual fue elegida como separación óptima.
- **Niveles para los factores pH, densidad de corriente y tiempo:** el análisis de los resultados obtenidos muestra que se obtiene mejores remociones, manteniendo electrodos de sacrificio de hierro (electrodo que se desgasta) a pH bajos y, adicionalmente, con 15 minutos de tratamiento son suficientes.
- **Diseño, construcción y montaje del sistema de electrocoagulación:** el reactor diseñado consta de una celda electrolítica de dos litros en la cual están sumergidos los electrodos, que son placas rectangulares metálicas de hierro y aluminio dispuestas en paralelo y conectadas a una fuente de voltaje de corriente directa que proporciona la corriente eléctrica requerida para la electrocoagulación. La fuente de voltaje posee controles de corriente y voltaje regulables e independientes.
- **Celda de electrocoagulación:** la zona de flotación y la de sedimentación equivalen, cada una, a $\frac{1}{4}$ del volumen total de la celda (2,7 l), y la zona de reacción, a $\frac{2}{4}$ partes.
- **Selección del material de los electrodos, número de electrodos y dimensiones:** los electrodos fueron diseñados como placas rectangulares dispuestas en serie; su número se determinó suponiendo una separación máxima entre ellos de 14 mm, más un espesor de 3 mm para cada placa y un ancho de reactor igual a 140 mm; calculando así, se obtuvo un total de seis electrodos.
- **Fuente de voltaje:** se construyó una fuente con corriente máxima de 25 A y voltaje de 16

V. La fuente tiene dos controles: uno para variar el voltaje y otro para variar la corriente eléctrica; la medición de la corriente eléctrica se realiza con un amperímetro digital, cuya escala es de 0.1 A y el voltaje se mide en un voltímetro digital con escala de 0.1V; todo el equipo tiene conexión a 110 V ac monofásico.

Hernández (2011), por su parte, se trazó el objetivo de realizar un sistema relativamente simple, económico y de bajo consumo energético, que sirviera para ser utilizado en la mejora de la calidad de aguas residuales o aguas normales que circulan por los ríos para, posteriormente, ser utilizadas en diferentes actividades. El trabajo lo realizó en tres fases y obtuvo los siguientes parámetros de diseño:

- En la fase número uno ejecutó el diseño y construcción de un reactor de vidrio, de dimensiones internas útiles de 35×89×3 cm para la electrocoagulación de las aguas en el que instaló dos placas metálicas de aluminio de 54×38,4 cm. La fuente de alimentación fue 0 - 58 VCC, 0 - 9 ACC, 570 W, marca Grelco y una bomba de 900 l/h.
- En la segunda fase construyó cinco celdas de vidrio con electrodos de placas de aluminio en cuatro de ellas, y una celda con electrodos de hierro, así: aluminio de 50 cm de largo x 35 de cm alto x 3,0 cm de separación entre placas; 40 x 37 x 4,7cm; 40 x 18 x 2,1 cm; 40 x 18 x 1,4 cm y placa de hierro de 40 x 17x 2,2 cm.

- Además, realizó un estudio sobre el efecto de la separación entre placas sobre la conductividad, intensidad de corriente, densidad de corriente, temperatura y voltaje. Para ello sometió el agua del grifo del laboratorio, de conductividad alrededor de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a electrocoagulación en celdas con separación entre placas de 10,1; 9,0; 7,4 y 3,25 cm.

	Aluminio-Aluminio	Hierro-Hierro	Aluminio-Grafito	Hierro-Grafito
Turbidez	>80 %	Aumentó	80 % - 92 %	Aumentó
SST	60 % - 85 %	20 % - 60 %	50 %	Aumentó
DQO	61 % - 81 %	51 % - 82 %	42 % - 66 %	33 % - 60 %
Coliformes totales	99,80 %	99,99 %		98,70 %

La segunda fase sirvió como fundamento para el desarrollo de la fase posterior y permitió evidenciar que uno de los parámetros básicos de diseño es la relación de la superficie electrónica sobre el volumen de la disolución (A/V), siendo una medida del potencial para la liberación de coagulante.

La tercera y última fase constaba de la construcción de una planta de tratamiento con capacidad para tratar 144 l/h en flujo continuo. El electro coagulador se construyó en metacrilato con unas dimensiones internas de 27,5 x 49,5 x 49,5 cm. En una primera serie de experimentos se establecería cuatro placas de electrodo, dos cátodos y dos ánodos de aluminio, y tres placas intermedias de acero.

De la misma forma se trabajó en la segunda línea, pero con placas de hierro. Las dimensiones de las placas de aluminio fueron de 250 x 500 x 1,5 mm; las placas de hierro, de 250 x 500 x 1,0 mm, y el espacio entre electrodos de 4,75 cm. Los electrodos fueron conectados a una fuente de alimentación que tenía una salida variable entre 300 V y 10 A.

También se presenta el porcentaje de remoción obtenido para los diferentes parámetros con diferentes configuraciones de electrodo, lo cual fue adaptado de Hernández (2011).

Referencias

Arango Ruiz, Á., y Garcés Giraldo, L.F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea". *Revista de la Universidad EAFIT*, 43(147), 56-67.

Carhuancho, H. y Salazar, J. (2015). *Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas re-*

siduales a nivel de laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales Convicorti en la ciudad de Trujillo - La Libertad (Trabajo de Grado). Universidad Nacional de Trujillo. Recuperado de <http://dspace.unitr.u.edu.pe/handle/UNITRU/3590>

Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41.

García, S., Maesia, M., Viera, J. y Martínez, C. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 267-299.

Hakizimana, J., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. & Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1-21.

Hernández, P. S. (2011). *Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <http://oa.upm.es/7755/>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). *Nariño - características geográficas*. Bogotá, Colombia: Editorial IGAC.

Koby, M., Taner Can, O. & Bayramoğlu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Material*, 100(1-3), 163-178.

- Maldonado, F., Landa, B. y Castillo, K. (2018). Construcción de una celda de electrocoagulación para depuración de agua. *Experiencias Veracruz*.
- Mehdi Dolati, A., & Hassan Khorsandi, S. (2017). Boron removal from aqueous solutions by electrocoagulation at low concentrations. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 5150-5156.
- Mollah, M., Schennach, R., Parga, J.R. & Cocke, D.L. (2001). Electrocoagulation (EC)- Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2003). Agua para todos, agua para la vida: Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. Recuperado de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129556_spa
- (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: Agua para un mundo sostenible - Datos y Cifras. Recuperado de www.unesco.org/water/wwap/0AWWDR.
- (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2016: agua y empleo*. París, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- Perez Bendezu, L.S. (2018). *Uso de la electrocoagulación para reducir la carga de contaminantes en la planta de tratamiento de aguas residuales Ajeper-Huachipa* (Trabajo de Grado). Universidad Cesar Vallejo. Recuperado de <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/24612?show=full>
- Ping Gao, X., Feng Shen, G. (2005). Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation- electroflotation without a filter. *Separation and Purification Technology* 43(2), 117-123.
- Rajeshwar, K. & Ibanez, J. (1997). *Environmental Electrochemistry: Fundamentals and applications and pollution Abatement*. San Diego, California: Academic Press.
- Restrepo, A. P., Arango, Á. y Garcés, L. F. (2012). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, 1(2), 58-77.
- Robles, L. y López, A. (2017). *Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación* (Trabajo de Grado). Universidad de La Salle. Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/315/
- Superservicios. (2013). *Informe técnico sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Unidad Ejecutora Del Programa Del Plan Departamental De Agua La Guajira (UEPPDA). (2017). Plan General Estratégico de Inversiones PGEI 2017-2019. Recuperado de www.minvivienda.org.co/La-Guajira/PGEI-2017-2019.
- Venegas, A. (2018). Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales. Recuperado de <https://www.larepublica.co/infraestructura/solamente-482-de-los-municipios-cuentan-con-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-2611155>
- Zuluaga, J. (1980). Fuentes de electricidad y tipos de corriente eléctrica. Recuperado de repositorio.sena.edu.co/bitstream/unidad_03_fuentes_electricidad_