



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA AGUAS CONTAMINADAS
POR RESIDUALES”**

Trabajo de Investigación para optar el grado académico de:

BACHILLER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presentado por:

Ana Paola Velásquez León

Asesor:

Fernando Javier Chávez Zegarra

Lima – Perú

2019



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°021-2020-DACIA-DAFCA-U.CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 15 de enero de 2020

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **Eficiencia de la electrocoagulación para aguas contaminadas por residuales**, presentado por:

- Velásquez León Ana Paola

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **Eficiencia de la electrocoagulación para aguas contaminadas por residuales** con N° de registro de la carrera: **043-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Fernando Javier Chávez Zegarra** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese,

Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca,
Director Académico de Carrera
Ingeniería Ambiental



“EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA AGUAS CONTAMINADAS POR
RESIDUALES”

Velásquez León, Ana Paola ¹; Chavez Zegarra, Fernando Javier ²

¹ Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur, Panamericana

Sur Km 19, Villa el Salvador

Paola.velasquez.leon97@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación teórica y bibliográfica, tiene como objeto evidenciar la eficiencia del tratamiento fisicoquímico conocido como electrocoagulación para aquellas aguas contaminadas o residuales, producto de un mal uso o del desecho de las actividades humanas. La electrocoagulación es un proceso electroquímico el cual a través de la corriente eléctrica que llega a los electrodos sumergidos provoca un efecto floculación y coagulación, consecuentemente se logra eliminar aquellos agentes contaminantes del medio acuoso. Las reacciones que ocurren son de óxido-reducción y se dan sin la aplicación de reactivos químicos logrando una eliminación física por defecto de la electrodisolución de los ánodos de sacrificio y la formación de productos de hidroxiquetales como coagulantes, que conllevan al proceso de flotación con ayuda del cátodo. Las reacciones químicas que ocurren en el proceso de electrocoagulación dependerán del material que conforma los electrodos, comúnmente son de aluminio (Al) y hierro (Fe), sin embargo, se pueden utilizar otros metales que realicen el mismo trabajo. El grado de eficiencia de este sistema de electrocoagulación se mide de acuerdo al porcentaje de remoción aquellas sustancias o parámetros que afectan la calidad del agua tales como partículas suspendidas, metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos. Es importante precisar que los mejores resultados se han dado gracias al control en condiciones óptimas, puesto que se ha visto que la eficiencia de la electrocoagulación se ve afectada cuando el pH del agua se encuentra por debajo de 6 o por encima de 8. En cuanto a los beneficios que se han logrado reportar, se tiene un aprovechamiento comercial importante en el tratamiento puntual de algunos contaminantes, así como también gran diferencia en cuanto a la eficiencia en comparación con otras técnicas alternativas de tratamiento de aguas. Así mismo, se ha identificado que a pesar de los buenos resultados que se pueden obtener, aun no se han desarrollado proyectos de inversión o instalación de este sistema a escala industrial.

Palabras clave:

Eficiencia, Electrocoagulación, Tratamiento, Aguas, Residuales, Contaminadas, Parámetros y Remoción.

ABSTRACT

In the present work of theoretical and bibliographic research, its purpose is to demonstrate the efficiency of the physicochemical treatment known as electrocoagulation for those polluted or residual waters, product of a misuse or disposal of human activities. Electrocoagulation is an electrochemical process which, through the electric current that reaches the submerged electrodes, causes a flocculation and coagulation effect, consequently it is possible to eliminate those pollutants from the aqueous medium. The reactions that occur are of oxide-reduction that without the application of chemical reagents is achieved a physical elimination by default of the electrodisolution of the sacrificial anodes and the formation of products of hydroxiquetal as coagulants, which lead to the flotation process with the help of the cathode. The chemical reactions that occur in the electrocoagulation process will depend on the material that makes up the electrodes, usually aluminum (Al) and iron (Fe), however other metals can be used to perform the same work. The degree of efficiency of this electrocoagulation system is measured according to the percentage of removal those substances or parameters that affect the water quality such as suspended particles, heavy metals, organic and inorganic compounds. It is important to point out that the best results have been obtained thanks to the control under optimal conditions, since it has been seen that the efficiency of electrocoagulation is affected when the pH of the water is below 6 or above 8. to the benefits that have been reported, there is a significant commercial use in the timely treatment of some pollutants, as well as great difference in efficiency compared to other alternative techniques of water treatment. Likewise, it has been identified that in spite of the good results that can be obtained, there have not yet been investment projects or installation of this system on an industrial scale.

Keywords:

Efficiency, Electrocoagulation, Treatment, Waters, Residuals, Contaminated, Parameters and Removal.

REVISIÓN TEÓRICA

1. Aguas Contaminadas

Se denomina aguas contaminadas aquellas que, en su composición se encuentran agentes químicos, físicos y microbiológicos que afecta la calidad de esta y puede traer una serie de consecuencias negativas para los seres vivos y el ecosistema.

Los cuerpos de agua continentales o marítimos como mares, lagos, ríos y quebradas son contaminados en la actualidad en su mayoría por actividades antropogénicas (descargas industriales, domésticas, actividades agrícolas o ganaderas, residuos sólidos, entre otros). El caso de contaminación por vertimientos de aguas residuales sin tratamientos previos, es común en los países más industrializados como Estados Unidos, Alemania y China principalmente, que alcanzan la producción de un 80% y más de los desechos peligrosos en el mundo (Restrepo, Arango y Garcés, 2006; ONU, 2006). En América del centro y sur, las ciudades son las que albergan al mayor porcentaje de la población (80% aproximadamente), siendo las que generan mayor contaminación del recurso hídrico y que impactan el resto de los asentamientos humanos. El 80% del agua consumida se transforma en aguas residuales, las cuales tienen que ser tratadas porque se pueden volver una fuente de contaminación primaria para los cuerpos de agua. Sin embargo, se determinó que el 70 % las aguas residuales producidas son vertidas sin ser tratadas previamente (Yee-Batista, 2013; Larios, Gonzales y Morales, 2015).

El desarrollo de técnicas e implementos para procesos de recuperación del agua, van desde metodologías tradicionales hasta los últimos inventos tecnológicos y técnicas innovadoras, las cuales compiten tanto en eficiencia, como en costo para un mejor manejo y operación de acuerdo a las necesidades y requerimientos de las plantas de

tratamiento (PTAR). La recuperación, reutilización y recirculación del agua se ha vuelto indispensable en los últimos años, de tal manera se busca tratar aquellas fuentes de aguas contaminadas al igual que las aguas residuales y efluentes de industrias. Estos tratamientos deben ser adecuados, altamente eficientes, con mínimo impacto al ambiente, y de costos accesibles, para lograr beneficios económicos, sociales, culturales, ambientales, y sobre todo mantener un equilibrio (Restrepo, Arango y Garcés, 2006).

2. Aguas Residuales

Las aguas residuales son producto de la utilización del agua en el ámbito doméstico o industrial, es decir, son los residuos líquidos, también conocido como “deshecho líquidos”. Tienen consigo elementos químicos, restos de materiales y residuos líquidos y sólidos, que las contaminan y vuelven inutilizables y provocando cambios en su estado natural físico, químico y biológico. La concentración de químicos y contaminantes provoca una relación estrecha con el tipo de aplicación que se le dé, lo cual dependerá directamente del lugar de proveniencia (OEFA, 2014; Aguilar, 2016).

Son una mezcla compleja de un conjunto de compuestos orgánicos e inorgánicos distintos en concentraciones variadas (Rmalho, 2003). Estas aguas suelen ser enviadas a cuerpos de agua por medio de desagües, alcantarillas, vertimientos. Sin embargo, en algunos casos también son previamente tratadas para luego ser vertidas a la naturaleza (Aguilar, 2016; Pilay, 2018)

La OEFA (2014) las define como aguas que han sufridos cambio en sus características originales por actividades antropogénicas, por lo que se requiere realizar tratamientos previos para recuperar o mejorar su calidad, antes de ser utilizadas de nuevo para el

mismo fin u otros, inclusive antes también de ser vertidas en algún cuerpo natural de agua o descargadas a un sistema de alcantarillado contratado.

Las aguas residuales son generadas por la acción del hombre de introducir materias contaminantes, diversas fuentes de energía y condiciones que de manera directa o indirecta; implican alteraciones en la calidad original del agua y su función ecológica, de acuerdo a los usos y aplicaciones por los que pasa.

La clasificación o caracterización de estas, es importante para el manejo y control, ya que, de acuerdo a sus características, se elegirán los tratamientos o técnicas a utilizar para lograr. La clasificación que utiliza la OEFA para identificarlas se divide en tres tipos, aguas residuales domésticas (ARD), aguas residuales industriales (ARI), aguas residuales municipales (ARM) (OEFA, 2014).

Las aguas residuales domésticas, también conocidas como aguas servidas, son aquellas que tienen origen residencial o comercial, estas contienen residuos fisiológicos, detergentes y desechos de la cocina. Se componen fundamentalmente de materia orgánica soluble o coloidal y sólidos en suspensión (Ramalho, 2003).

Las aguas residuales industriales son aquellas que provienen de empresas, industrias grandes, pequeñas o medianas, pueden ser de Industrias de Textil, Industrias de curtido, Industrias Químicas, Industrias de Explosivos, Industrias Mineras, Industrias Agrícolas, entre otras. La composición de estas dependerá del tipo de industria y el proceso en el que el agua sea utilizada (Feng et. al, 2016; OEFA, 2014). En algunos casos se encontrarán altos niveles de metales como Cu, Ni, Hg, Zn, As, Cd, Pb, y Cr (AlJaberi, 2018), también residuos sólidos, e inclusive químicos de alta toxicidad (Carocci et al., 2016).

Las aguas residuales municipales son la mezcla de drenajes pluviales con aguas residuales domésticas o industriales. Estas pueden contener residuos sólidos de gran tamaño, inclusive animales muertos, basura de las calles, entre otros (United States Environmental Protection Agency, 2004).

3. Tratamientos de las Aguas Residuales

Los tipos de tratamiento de Aguas Residuales pueden ser Físicos, Químicos o Biológicos (los más conocidos), sin embargo, se han ido desarrollando nuevas técnicas, tecnologías, procedimientos y operaciones que combinan diferentes los diferentes tratamientos para obtener resultados de mayor beneficio, con menor impacto ambiental y una mejor manejo y gestión (Salgot and Folch, 2018).

Los Tratamientos Físicos fueron los pioneros, los primeros métodos para la eliminación de los sólidos (Poma y Quispe, 2016) de manera rápida y sencilla, son aquellos que no incluyen químicos o reactivos para la recuperación del agua residual, dentro de los procesos más comunes está el desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, la flotación y la filtración (Meen and Luhar, 2018; Salgot and Folch, 2018).

Los Tratamientos Químicos son aquellos que involucran la aplicación de reactivos para generar reacciones químicas que crean cambios en los contaminantes para ser eliminados con rapidez (EPA, 2004; Poma & Quispe, 2016), y ayuden a tratar y mejorar la calidad del agua, algunos ejemplos son la precipitación química, transferencia de gases, la adsorción, la desinfección, decoloración y la eliminación de sustancias inorgánicas disueltas (Salgot and Folch, 2018).

Los Tratamientos Biológicos son aquellos que utilizan microorganismo, en especial bacterias, constan en provocar una descomposición bioquímica en el agua residual para

generar estabilidad en los productos finales, este proceso puede darse de manera aeróbica, anaeróbica o ambas (Poma & Quispe, 2016).

El agua recuperada por los diferentes tratamientos, tiene diferentes fines y aplicaciones posteriores, donde depende la calidad que se logre será uno de los principales factores que determine su futuro. Los enfoques tecnológicos que incluyen los aspectos sanitarios, socioeconómicos y legales, así como también por el uso de nuevas herramientas de control, son trascendentales para un adecuado manejo y recuperación de estas aguas tratadas (Maxwell, 2016; Salgot y Folch, 2018)

4. Indicadores de calidad para Aguas Residuales

Los indicadores que se deben analizar para el monitoreo de los efluentes provenientes de la formación de aguas residuales para una PTAR tienen fijados Límites Máximos Permisibles de acuerdo al parámetro, los cuales han sido indicados y publicados en el D.S. N° 003- 2010-MINAM. Por tanto, se encuentra establecido en las normas y las políticas ambientales y sanitarias que es necesario monitorear aquellas las aguas residuales que ingresan (afluentes), así como también las aguas residuales que salen, en otras palabras, aquellas aguas tratadas (efluentes). Se toman en cuenta los siguientes indicadores (OMA y MVCS, 2007; MVCS, 2009):

- La concentración en mg/L de los Aceites y Grasas
- La concentración en NMP/ 100 mL de los Coliformes Termotolerantes
- La concentración en mg/L de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- La concentración en mg/L de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- La unidad de pH

- La concentración en mL/L de la Sólidos Totales Suspendidos
- El grado de Turbidez en UNT
- La temperatura en C0

5. Bases conceptuales de los parámetros del Agua Residual:

La calidad de las Aguas Residuales depende de diversos parámetros que la componen, donde tienen que ser medidos cuantitativamente para la determinación del estado en el que se encuentren. Los parámetros comúnmente tomados en cuenta son los siguientes:

5.1. Aceites y Grasas (A y G)

Las concentraciones de A y G presentes en el agua se dan principalmente por vertimientos de efluentes de industrias alimentarias y petroleras, parque automotriz y motores acuáticos, industria comercial, al igual que por uso doméstico (Chavalparit and Ongwandee, 2009). Sin embargo, existen más fuentes que originan su acumulación y que afectan la calidad del agua y su naturaleza. Su determinación no es específica, de manera que incluye un grupo de compuestos con características parecidas o similares como los aceites las grasas, también los ácidos grasos y los hidrocarburos e inclusive los jabones y sus derivados (Esquirva, 2016).

5.2. Coliformes Termotolerantes

Las fuentes de agua al encontrarse contaminadas por desechos y excretas de animales y personas provocan incrementos en la cantidad de organismos patógenos. (Montiel et al., 2005). La concentración de CTE se determina

mediante el control y conteo indirecto de los tubos múltiples de fermentación, señalado con el Número Más Probable (NMP) por cada 100 ml de agua (APHA, 1998).

5.3. Conductividad

La conductividad del agua dependerá de la transmisión de corriente eléctrica por efecto de la presencia de material ionizable presentes (Rigola, 1998). Es un parámetro del agua que mide la concentración de iones y sales disueltas, para la determinación de este se aplica el Método Conductimétrico (APHA, 1999; Fernández J., y Dolores M., 2000), el cual, de acuerdo con las instrucciones del fabricante debe ser calibrado el medidor con una solución estándar de conductividad, que por lo general es cloruro de potasio o cloruro de sodio. Paso que se realiza previamente a la medición de la muestra (Vyasa y Jethoob, 2015).

5.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

El parámetro de DBO para la medición de la calidad del agua que permite establecer la carga orgánica presente. Es considerado uno de los ensayos más importantes en la determinación de la materia orgánica en aguas naturales, contaminadas y residuales. El DBO5 se realiza durante los 5 días, donde se aplican metodologías microbiológicas en condiciones aeróbicas a temperatura ambiente para describir el comportamiento de los microorganismos frente a la materia orgánica. El DBO pasa por un proceso de incubación y de electrometría para la obtención de su resultado (Navarro y Gaitan, 2007).

5.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El DQO es el parámetro del agua que mide la cantidad de oxígeno semejante a la concentración de materia orgánica, prueba usada para determinar la concentración de oxígeno (mg O₂/l) necesaria para oxidar los componentes del agua (Rojas, 2017). Para su determinación, se utiliza el método del reflujo con dicromato, el cual mantiene una relación directamente proporcional con la concentración de DBO₅ (Lodoño, Giraldo, y Gutiérrez, 2010).

5.6. pH

El pH de una disolución determina la acidez o alcalinidad, la cual indica presencia de iones hidronio [H₃O]⁺ presentes (Aguilar, 2015; Arango, 2012)

5.7. Sólidos Totales Suspendidos

Los sólidos suspendidos (SS), es la medición de los sólidos no disueltos que al pasar por un filtro son retenidos. Se pueden determinar por decantación o filtración, mediante el método gravimétrico (Rigola, 1998).

5.8. Turbidez

La turbidez es el impedimento de la trasmisión de luz a través del agua, a causa de materiales insolubles en suspensión o en coloides, las cuales son difíciles de decantar. Estas partículas absorben o reflejan la luz y de acuerdo a su composición, y su concentración aumentan o disminuyen la transparencia del agua. Las unidades del sistema internacional son UNT (Rigola, 1998).

6. Electrocoagulación

La electrocoagulación es una de las tecnologías que se aplican como tratamiento para la recuperación de efluentes y aguas contaminadas por causas antropogénicas o naturales.

Método simple y eficiente que involucra energía eléctrica y coagulación (An et. al, 2017). Es un proceso electroquímico, funciona en base a corriente eléctrica, la cual permite la eliminación de agentes contaminantes en el medio acuoso (Aguilar, 2015; Ozay, et. al., 2018). El tratamiento electroquímico de contaminantes en el agua aplicar de diversas maneras. Están las reacciones directas de óxido-reducción utilizando reactivos químicos, o liberando sustancias químicas que provocan una eliminación física (Feng et. al, 2016). La electrodisolución de los ánodos de sacrificio y la formación de productos de hidroxiquetales como coagulantes, mientras que la producción sincrónica de hidrógeno en el cátodo facilita el apartamiento y separación del contaminante con el proceso de flotación (An et. al, 2017). Este proceso puede eliminar varios tipos de contaminantes en aguas residuales, como partículas suspendidas, metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos debido a su alta capacidad de eficiencia (Walsh, 2001; Fekete, 2016; Riyanto and Hidayatillah, 2014).

Este proceso utiliza la electricidad para crear un campo que permita que los electrodos reaccionen con el agua residual para absorber, coagular y remover contaminantes, por lo que se considera como un método autocatalizador que no necesita la inducción de químicos o microorganismos para la producción del lodo, aun si se compara con otras técnicas convencionales (Bazrafshan et. al, 2015; AlJaberi, 2018).

6.1. Historia

En los últimos veinte años, se ha ido incrementando estudio y la investigación en una tecnología para remover contaminantes en el agua, conocida como electrocoagulación, la cual inicia desde principios del siglo XX, como una opción para solucionar la problemática de aguas afectadas, contaminadas, residuales y

alteradas de fuentes naturales como antropogénicas; al igual que la falta de abastecimiento de las plantas y mal manejo de los tratamientos (Restrepo, Arango y Garcés, 2006). Hoy en día se continúa con la investigación y evaluación del comportamiento de este sistema de tratamiento, considerándose así una rama altamente activa y con un gran campo de estudio en cuanto a su eficiencia y optimización de sus materiales, equipos, tamaño, condiciones de su operación y diseño, al igual que su valoración técnica y económica. Sin embargo, a pesar de los números experimentos, investigaciones y publicaciones realizadas, aún no se encuentra debidamente desarrollada esta área, tampoco ha sido exitosamente difundida a nivel global. Todavía se encuentran incógnitas acerca de los modelos de ampliación en el diseño y operación del reactor a escalas industriales, puesto que todavía se mantiene en una escala a nivel laboratorio y prototipo (Hakizimana et al., 2017).

Este sistema presenta un gran número ventajas según la literatura, en comparación con los procesos alternativos, al igual que también presenta desventajas como toda tecnología. No obstante, la falta de modelos sistemáticos no le permite considerarse como una tecnología de aguas residuales, hace falta inversión para hacer viables los proyectos y prototipos (Hakizimana et al., 2017).

6.2. Eficiencia de la Electrocoagulación

La eficiencia de la electrocoagulación permite que existan deferentes usos y aplicaciones para la recuperación, remoción y reutilización de diversas aguas residuales y aguas contaminadas (Holt, Barton, y Mitchell, 2005). La medición de

la eficiencia de este proceso inicia con el ideal de optimizar la eliminación de la turbidez en las aguas residuales (Ibáñez et al., 1998), seguidamente se amplió con la eliminación de A y C de los efluentes (Ibáñez et al., 1997) y la disminución de la concentración de carga orgánica, de esta manera es como se comienza con la medición de su eficacia (Escobar, Soto-Salazar, Toro, 2006). Luego paso a optimizarse y remover residuos de petróleo, químicos residuales de textilería (Chen, 2000). En la actualidad se tratan aguas con pH básicos o ácidos, aguas con concentraciones de metales y demás contaminantes (Escobar, Soto-Salazar, Toro, 2006).

6.2.1. Eficiencia influenciada por variaciones de pH

EL pH es un factor que puede afectar el rendimiento de la electrocoagulación (Piña et al., 2011), no obstante, los diversos estudios también muestran que la electrocoagulación puede neutralizar el pH de las aguas residuales, por consiguiente, se puede obtener un resultado favorable en la neutralización de las aguas residuales con pH que superen los rangos admisibles. (Chen, X., Chen, G., and Yue, P. L. 2000). La eficiencia en cuanto a la eliminación de A y G, DBO y DQO, en función del influyente pH. Se ha descubierto que en la mayoría de los casos el pH menor a 6 o mayor a 8, afecta la remoción de otros contaminantes o parámetros fisicoquímicos del agua disminuye considerablemente, disminuyendo en un rango de 10 a 20 % su eficiencia (Arango, 2012).

6.2.2. Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos

El elemento sílice, la arcilla, el carbón y más materiales que se encuentra de manera suspendida en agua alcanzan hasta un 98% (Arango, 2012) en un pH 7 – 7.5 de eficiencia de su remoción en el mejor de los casos, y un 96.59% a un pH de 6.06 (Chavalparit y Ongwandee, 2009)

6.2.3. Eficiencia en la remoción de DBO y DQO

El porcentaje de eficiencia en la remoción del DBO5 y de DQO se puede alcanzar hasta 92% en aguas residual bajo condiciones óptimas de pH, tiempo y corriente eléctrica adecuada (Moreno, 2018), sin embargo, se han reportado as casos que reportan un grado de remoción entre 76% y 86 % (Aguilar, 2015; Poma y Quispe, 2016)

6.2.4. Eficiencia en las A y G

La eficiencia de remoción en la concentración de aceite y grasa en aguas residuales puede llegar hasta un 94% (Chen, X., Chen, G., and Yue, P. L. 2000). Se ha calculado que generalmente esa eficiencia fluctúa en un rango de 95 y 99% donde han sido aplicadas a industrias alimentarias especialmente (Arango, 2012).

6.2.5. Eficiencia en los metales

La electroflotación y la electrocoagulación en conjunto son una alternativa muy eficiente y poderosa para la eliminación del cromo de las aguas residuales industriales (Restrepo, Arango y Garcés, 2006). Este es altamente efectivo para descontaminar las aguas de metales solubles por descargas industriales y por otras cargas de más contaminantes. Por ejemplo, el cromo (+6) en el agua es un alto contaminante, el cual es utilizado en industrias de producción de Cr +6, en la metalúrgica, curtiembres y la industria agrícola (fertilizante y pesticida). Debido al grado de toxicidad es que el cromo necesita métodos altamente regulados para su remoción, que pueden ser por degradación biológica, también por adsorción, e inclusive por precipitación química, siendo estos los más conocidos (Chen, Chen y Yue, 2000).

Bajo condiciones óptimas como un pH de 7 se pueden alcanzar valores máximos de remoción de cobre hasta un 80% (Escobar, Soto-Salazar, Toro, 2006). En cuando a otros metales pesados como arsénico, cadmio, cromo, níquel y zinc también pueden ser removidos hasta un entre 95 y 99% (Arango, 2012).

6.3. Proceso de la electrocoagulación

Ocurren reacciones químicas en sucesión gracias a los electrodos que constituyen los iones (positivos y negativos), donde se disuelven el ánodo que contiene a los iones metálicos y el cátodo permanece parejo (Piña, et. al, 2011).

Se produce una desestabilización de las partículas contaminantes del agua hasta que son neutralizadas y desaparecen, a través de la formación de los agregados y la coagulación (Restrepo, 2006; Aguilar, 2015).

Los metales de aluminio y hierro que contienen Al^{3+} ó Fe^{2+} respectivamente, funcionan eficazmente como coagulantes para el proceso de floculación de partículas, formando largas cadenas por efecto de él ion de aluminio que se encuentra hidrolizado, el cual se encarga de adsorber o separar el contaminante del agua (Piña, et al., 2011, Ozay, et al., 2018).

6.5. Reacciones químicas

Las reacciones químicas que ocurren en el proceso de electrocoagulación dependerán de los electrodos (material), siendo el Aluminio (Al) y el Hierro (Fe) los utilizados con mayor frecuencia, sin embargo, también se pueden utilizar otros metales, que alcancen los mismos resultados o similares (Aguilar, 2015, Ozay, et al., 2018).

El electrodo de hierro es quien representa al ánodo, el cual permite la formación dos tipos de coagulantes in situ en la reacción fisicoquímica; hidróxido férrico $Fe(OH)_3$ o el hidróxido ferroso $Fe(OH)_2$. Una vez formados los hidróxidos de hierro ocurre la aglomeración de coloides (carga negativa) a los que se les suma los contaminantes por medio de atracciones electrostáticas o formaciones de complejos (Restrepo, 2006; Aguilar, 2015).

De esta manera los iones Al^{3+} junto con los iones OH^- reaccionan reacciones y dan lugar a $Al_2(OH)_2^{2+}$ y $Al(OH)_2^+$ (reacciones monoméricas), $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ (reacciones

poliméricas), las cuales precipitan para formar $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$. Esta es sustancia de carácter gelatinoso amorfa, la cual atrae aquellas contaminantes presentes en el agua, gracias las propiedades absorbentes (Restrepo, 2006; Aguilar, 2015).

6.6. Celda Tipo Batch

También conocido como reactor de Tipo Batch para la electrocoagulación es la parte principal de esta técnica que debe estar bien diseñada para ser aplicable para eliminar contaminantes de aguas residuales con alta eficiencia (Salman, 2014; Poma y Quispe, 2016). El diseño del reactor consta de dos electrodos conductores que se sumergen en un recipiente lleno de un líquido conductor de electricidad llamado electrolito. Cuando la corriente se aplica a los electrodos, la celda se ejecuta y la velocidad de reacción se controla dependiendo de la polaridad de estos electrodos electrónicos (Kabdaşl et. al., 2012; AlJaberi, 2018).

La celda de la electrocoagulación, también conocida como reactor de electrocoagulación de escala piloto o laboratorio, suele estar construida con planchas de acrílico transparente para observar las reacciones y los cambios que se efectuaran por el tratamiento. Tienen la forma de una especie de pecera, donde se realiza una conexión eléctrica para la modular los electrodos en la posición correcta para que la electricidad generada por la fuente de energía (Batería de 12 V). Los electrodos son acomodados linealmente en forma paralela, para generar un campo magnético que mejore los resultados del tratamiento. La celda Tipo Batch se caracteriza por formar tres zonas visibles una vez terminado el tratamiento eléctrico que recibe el agua residual (Aguilar, 2015), y estas son las siguientes (Fig. 1):

- La zona de reacción: área donde se encuentran inmersos los electrodos y se produce el proceso de electrocoagulación.
- La zona de sedimentación: área donde ocurre el proceso de precipitación de los lodos capaces de sedimentar.
- La zona de flotación: área de acumulación de lodos con capacidad de flotación.



Figura 1. Esquematización del orden de las Zonas en las que se divide la Celda de Tipo Batch para el tratamiento de electrocoagulación.

Nota: Elaboración propia.

6.6. Antecedentes de la aplicación del tratamiento de electrocoagulación

En la Universidad Nacional Del Centro Del Perú de la Región de Huancayo, se realizó una investigación en el 2016 donde se aplicó el método de electrocoagulación para las aguas de urbanas a nivel laboratorio, donde se

buscaba remover los contaminantes, aplicando los principios de la coagulación en base a un reactor electrolítico. Se utilizó una densidad de corriente óptima de 32,72 A/m² y un tiempo de 20 minutos. Los resultados obtenidos por este proyecto fueron muy altos, puesto que los porcentajes de remoción son de 89,5% y 79,6% para conductividad eléctrica y turbiedad respectivamente, 85,9% y 75,3% para DBO y DQO respectivamente, 93,8 % para aceites y grasas, 95,3% para sólidos totales, 91,0% para sólidos suspendidos, 91,3% para sólidos disueltos, 70,3% para dureza total, 91,3% para dureza cálcica, 91,9% para cloruros, el 100,0% para coliformes totales y por ultimo 98,9% en escherichia coli (Poma y Quispe, 2016).

En el 2015 se desarrolló en el Instituto de Investigación Científica de la Universidad de Lima un proyecto de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio, que fue publicado por Instituto de Investigación (RIIGEO), donde se removieron contaminantes de aguas residuales, alcanzado resultados de un 87 % de eficiencia medio de remoción de DQO, un pH neutral de 7.12, bajo una intensidad de corriente $I = 5$ A, con un tiempo de tratamiento de 15 minutos. El proyecto comprobó que a escala laboratorio se pueden obtener resultados óptimos en el tratamiento de aguas residuales que cumplen la normativa ambiental vigente del Perú (Aguilar, 2015).

6.7. Beneficios

Los beneficios de la aplicación del método de la electrocoagulación, aunque no es una tecnología nueva, ha sido poco estudiada y desarrollada. Pese a esto, ha

logrado alcanzar un aprovechamiento comercial importante en el tratamiento puntual de algunos contaminantes, ubicándose como una técnica con mayores ventajas comparativas con respecto a las tecnologías tradicionales de tratamiento. Por esta razón en los últimos años ha cobrado interés científico, pues se necesita entender a fondo el proceso y sus mecanismos (Restrepo, Arango y Garcés, 2006).

El proceso de electrocoagulación (EC) tiene ventajas que incluyen la simplificación del diseño y la operación de la electrólisis (ET) en menor del tiempo estimado, además se generan lodos estables que se almacenan en la parte inferior de la celda o del sistema de tratamiento, que pueden ser posteriormente removidos. Por este motivo es que se le considera un proceso versátil con gran capacidad y eficiencia en cuanto a la remoción de contaminantes presentes en el agua.

Otra ventaja identificada es el costo y la efectividad del proceso, no es necesario añadir reactivos químicos adicionales (incrementan el costo de la operación), por lo que se le considera una alternativa atractiva para enfrentar los posibles inconvenientes de tecnologías convencionales, y alcanzar la calidad del agua requerida que evite un impacto significativo en los cuerpos de agua donde son vertidos los efluentes (Hakizimana, et al., 2017).

CONCLUSIONES

La electrocoagulación como tratamiento para la recuperación de aguas contaminadas o aguas residuales es una alternativa tecnológica con resultados efectivos que logra su cometido de reducir el índice o concentración de aquellos parámetros que afectan la calidad del agua, ya que en todos los estudios experimentales revisados evidenciaban resultados positivos, cumpliendo con los objetivos del investigador.

La eficiencia de la electrocoagulación dependerá de los factores como tiempo de tratamiento, materiales, corriente eléctrica y condiciones óptimas de pH. Un cambio en las condiciones mencionadas puede afectar el resultado, provocando una disminución en el porcentaje de eficiencia en remoción como es el caso del DBO, DQO y los metales pesados.

Existe gran cantidad de investigaciones en cuanto a su eficiencia y optimización de sus materiales, equipos, tamaño, condiciones de su operación y diseño, al igual que su valoración técnica y económica. Sin embargo, a pesar de los números experimentos, investigaciones y publicaciones realizadas, aún no se encuentra debidamente desarrollada esta área, tampoco ha sido exitosamente difundida a nivel global. Hace falta la inversión de este proceso a escala industrial, ya que hasta el momento esto se encuentra a escala laboratorio y prototipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, E. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua*. Lima, Perú.
- AlJaberi, F. Y. (2018). *Electrocoagulation using concentric tubes electrodes reactor for removal of lead from simulated wastewater*, PhD Thesis in Chemical Engineering. University of Baghdad. <https://doi.org/10.1016/j.ijece.2018.09.032>
- American Public Health Association. (1998). *American Water Works Association Y Water Environment Federation. Standard methods for examination of water and waste water*. 20 ed. Washington D.C: APHA
- American Public Health Association. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18 ed. Washington D.C: APHA
- An, C., Huang, G., Yao, Y., & Zhao, S. (2017). *Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review*. *Science of The Total Environment*, 579, 537–556. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.11.062
- Arango, A. (2012). *Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea*. *Producción + Limpia - Enero - Junio de 2012*. Vol.7, No.1 – 59-67.
- Arboleda, J.M. y Herrera, P.J. (2015). *Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor Tipo Batch para la remoción de Cromo Hexavalente (Cr⁶⁺) con electrodos de Aluminio y Hierro en condiciones de laboratorio*. Universidad Santo Tomas; BOGOTÁ D.C.

- Bazrafshan, E., Mohammadi, L., Moghaddam, A.A., Mahvi, A.H. (2015) *Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process a systematic review*, J. Environ. Health Sci. Eng. 13 (74) 1–16.
- Carocci A., Catalano A., Lauria G., Sinicropi M.S., Genchi G. (2016) *Lead Toxicity, Antioxidant Defense and Environment*. In: Gunther F.A., de Voogt P. (eds) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (Continuation of Residue Reviews)*, vol 238. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/398_2015_5003
- Chavalparit, O. and Ongwandee, M. (2009). *Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology*. Volume 21, Issue 11, 2009, Pages 1491-1496 [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62445-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62445-6)
- Chen, G., Chen, P.X., and Yue, L., (2000). *Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater*. Journal of Environmental Engineering 126, 858–863.
- Chen, X., Chen, G., and Yue, P. L. (2000). *Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation*. *Separation and Purification Technology*, 19(1-2), 65–76. doi:10.1016/s1383-5866(99)00072-6
- Deloya, A. (s.f.) *Métodos de análisis físicos y espectrofométricos para el análisis de aguas residuales*. Tecnología en Marcha. Vol. 19-2.
- Díaz, E., Alvarado, A.R., Camacho, K.C. (2012). *El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de*

tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya.

México; Quivera, vol. 14, núm. 1, enero-junio, 2012, pp. 78-97.

Environmental Protection Agency, (2004), "*Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems*", Office of Water Office of Wastewater Management Washington DC 20460.

Esquirva, K. G. (2016). Remoción de Aceites y grasas residuales domésticas usando lodos activados de planta de tratamiento de agua residual en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez en Lima-Perú. UNI, Lima.
<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/5373>

Escobar, C., Soto-Salazar, C., & Inés Toral, M. (2006). *Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater.* Journal of Environmental Management, 81(4), 384–391. doi:10.1016/j.jenvman.2005.11.012

Fekete É., Lengyel B., Cserfalvi T., Pajkossy T. (2016). *Electrocoagulation: an electrochemical process for water clarification*, J. Electrochem. Sci. Eng. 6 (1) 57–65. <https://doi.org/10.5599/jese.218>

Feng, Y., Yang, L., Liu, J. and Logan, B. (2016). *Electrochemical Technologies for Wastewater Treatment and Resource Reclamation.* Environ. Sci.: Water Res. Technol. DOI: [10.1039/C5EW00289C](https://doi.org/10.1039/C5EW00289C)

Hakizimana, J. N., 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. doi:10.1016/j.desal.2016.10.011

- Ibáñez, J.G., Singh, M.M., Pike, R.M., Szafran, Z., (1997). *Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment, Part 2: microscale indirect electrolytic of organic wastes*. Journal of Chemical Education 74, 1449–1450.
- Ibáñez, J.G., Singh, M.M., Szafran, Z., (1998). *Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment, Part 4: color removal of simulated wastewater by electrocoagulation–electroflotation*. Journal of Chemical Education 75, 1040–1041.
- Kabdaşlı, I., Arslan-Alaton, I., Ölmez-Hanc, T., Tünay, O. (2012) *Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review*, J. Environ. Technol. Rev. 1 (1) 2–45. <https://doi.org/10.1080/21622515.2012.715390>
- Larios, J.F, Gonzales, C., Morales, Y. (2015). *Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú*. Vol. 2, Nº 2. Universidad San Ignacio de Loyola- Lima, Perú.
- Lodoño, A., Giraldo, G. I., Gutiérrez, A.A. (2010). *Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Maxwell, S. (2018). *The Water-Energy Nexus in Water and Wastewater Treatment*. J Am Water Works Assoc, 198, pp. 20-24. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2016.108.0121>
- Meena, K. and Luhar, S. (2018). *Effect of wastewater on properties of concrete*. Journal of Building Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.003>
- Ministerio de Vivienda, Saneamiento y Construcción. (2009). Decreto Supremo N° 021-2009.

Montiel, M., Zambrano, J., Castejon, O., Oliveros, C., Botero, L. (2005) *Indicadores bacterianos de contaminación fecal y colifagos en el agua de la Laguna de Sinamaica*, Estado Zulia, Venezuela. *Ciencia*. Vol 13(3):1-12.

Moreno, M. R. (2018). *Tratamiento de Aguas Residuales del Camal Municipal, mediante el Método de Electrocoagulación*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca.

Navarro, M.O. y Gaitan, M. S. (2007). *Demandada Bioquímica de Oxígeno 5 días, Incubación y Electrometría*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia.

Oficina de Medio Ambiente, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2007). *Protocolo de monitoreo de calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de las aguas residuales domesticas o municipales*. Lima, Perú. Recuperado de: <http://www3.vivienda.gob.pe/direcciones/Documentos/anexo-rm-273-2013-vivienda.pdf>

ORGANISMO DE EVALUCION Y FISCALIZACION AMBIENTAL (2014). *Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales*. Lima, Perú. Recuperado de: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. (2006). *Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos: Resumen Ejecutivo Oficial del Informe (WWDR)*. Washington: Banco Mundial Recuperado de: http://www.unesco.org/water/wwap/facts_figures/agua_industria.shtml

- Ozay, Y., Ünşar, E. K., Işık, Z., Yılmaz, F., Dizge, N., Perendeci, N. A., Yalvac, M. (2018). *Optimization of electrocoagulation process and combination of anaerobic digestion for the treatment of pistachio processing wastewater*. Journal of Cleaner Production, 196, 42–50. doi:10.1016/j.jclepro.2018.05.242
- Pérez, L.F. (2017). *Uso de la electrocoagulación para reducir la carga de contaminantes en la planta de tratamiento de aguas residuales Ajeper-Huachipa 2017 II*.
- Pilay, L. D. (2018). *Diseño, construcción y caracterización de un reactor de electrocoagulación tipo Batch*. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19589/1/CD-8986.pdf>
- Piña, M., Martín, A., González, C., Prieto, A., García, F., Guevara, A. y García J.E. (2011). *Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación*. Rev. Mex. Ing. Quím vol.10 no.2. UNAM: México.
- Poma J. R. y Quispe P.A., (2016). *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación*. Huancayo: Peru.
- Ramalho, R. S. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Ed. Reverte. S.A. Barcelona.
- Restrepo A.P., Arango A. y Garcés L. F. (2006) *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*.
- Rigola, M. (1998). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Macombro. Págs. 28- 35.
- Riyanto and Hidayatillah A. (2014). *Electrocoagulation of detergent wastewater using aluminium wire netting electrode (awne)*. Proceeding of International

Conference On Research, Implementation And Education of Mathematics And Sciences 2014. pp. 151–158.

Rojas, M. A. (2017) “Reducción de la DQO del Rio Lacra marca mediante el proceso de electrocoagulación, Chimbote-2017”. Trujillo, Perú.

Salgot, M., and Folch, M. (2018). Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 64–74.
doi:10.1016/j.coesh.2018.03.005.

Salman, A.B. (2014). *Removal of Cadmium from Wastewater by Electrodeposition on Stainless Steel Concentric Tubes Bundle*, Ph.D. Chemical Engineering, University of Baghdad. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2018.04.05>

Vyasa, A., y Jethoob, A.S. (2015). *Diversification in Measurement Methods for Determination of Irrigation Water Quality Parameters*. Department of Civil Engineering, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur -302017. India
<https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.155>.

Walsh, F.C. (2001) *Electrochemical technology for environmental treatment and cleanenergy conversion*, Pure Appl. Chem.
<https://doi.org/10.1351/pac200173121819>

Yee-Batista, C. (2013). *Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas*. Banco Mundial, BIRF – AIF.

Holt, P. K., Barton, G. W., & Mitchell, C. A. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.023>

United States Environmental Protection Agency. (2004). *Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems. Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.154>