



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

**COMPARACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
POR COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CONVENCIONAL CON
ELECTROCOAGULACIÓN DE LA EMPRESA HOLSAN S.A.S.**

Modalidad Pasantía

**Yuseidy Lisbeth Díaz Velandia
Paula Reina Torres**

**Directora del Proyecto:
Nidia Elena Ortiz Penagos
Ingeniera Química
Mcs. Desarrollo sostenible y medio ambiente**

**Codirector de Proyecto:
Nelly Rincón
Ingeniera Química**

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2022**

COMPARACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CONVENCIONAL CON ELECTROCOAGULACIÓN DE LA EMPRESA HOLSAN S.A.S.

RESUMEN

El presente proyecto contribuye a la evaluación de la eficiencia de remoción y los costos de operación del tratamiento de aguas residuales provenientes del sector hidrocarburos por medio del método de electrocoagulación utilizando un prototipo a escala de laboratorio, frente a la técnica de coagulación-floculación convencional utilizada por la empresa HOLSAN S.A.S. Se realizó un diseño experimental con el fin de determinar los factores que influyen adecuadamente en la electrocoagulación y en la elaboración del prototipo; posteriormente, se evaluaron los parámetros físico-químicos del agua tratada a partir del mejor ensayo obtenido con base en la determinación de turbiedad; finalmente, se compararon dichos parámetros con los obtenidos con los métodos convencionales de coagulación-floculación utilizados por la empresa HOLSAN S.A.S. Se obtuvo que las mejores condiciones para el tratamiento son: dos electrodos de hierro y dos de aluminio ubicados en paralelo, separación de 2 cm entre electrodos e intensidad de corriente de 2 Amperios; sin retirar definitivamente el uso de químicos, pero si reduciéndolo en gran medida.

Palabras Clave: Agua residual, electrodos, intensidad de corriente, electrocoagulación, parámetros.

ABSTRACT

This project contributes to the evaluation of the removal efficiency and operating costs of water treatment from the hydrocarbon sector; by means of the electrocoagulation method evaluated by means of a laboratory scale prototype, compared to the conventional coagulation-flocculation technique used by the company HOLSAN S.A.S. An experimental design was carried out in order to determine the factors that adequately influence electrocoagulation and the development of the prototype, then to evaluate the physicochemical parameters of the treated water from the best test obtained; and finally, to compare these parameters with those obtained with respect to the parameters of untreated wastewater. The best conditions for the treatment are: two iron electrodes and two aluminum electrodes placed in parallel, 2 cm separation between electrodes and current intensity of 2 Amperes; without definitively eliminating the use of chemicals, but reducing it to a great extent.

Key words: Wastewater, electrodes, current intensity, electrocoagulation, parameters.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se han incrementado los procesos industriales en gran medida, incluyendo la exploración y explotación de zonas donde se encuentran reservas de hidrocarburos. Los combustibles fósiles son los más utilizados tanto en transporte, como en procesos industriales; sin embargo, para poder llegar a éstos es necesario el fracturamiento de los suelos y se producen considerables cantidades de aguas residuales complicadas de tratar debido a sus altos compuestos orgánicos y grasos. Por esto, ha surgido la necesidad de tratar dichas aguas y sus respectivos lodos producto del mismo tratamiento.

La empresa HOLSAN S.A.S. ofrece distintos servicios ambientales enfocados principalmente en tratar los residuos sólidos y líquidos, de industrias que trabajan con hidrocarburos. Dentro de los procesos mencionados se requieren elevadas cantidades de químicos y de tiempos de retención en el tratamiento de coagulación-floculación convencional por el alto nivel de contaminantes; por ello se propuso comparar el tratamiento de coagulación-floculación convencional con respecto a electrocoagulación.

La Electrocoagulación es una tecnología utilizada para la recuperación de aguas residuales, e incluso en la remoción de contaminantes de industrias como curtiduría, galvanoplastia, lavandería, textil, combustibles y emulsiones, ya que requieren el uso de sustancias químicas para ser tratadas adecuadamente. Dentro de los ensayos de laboratorio realizados para determinar si esta es una alternativa ambientalmente sostenible, que puede llegar a contribuir con la reducción en la concentración de sustancias contaminantes y a su vez en la disminución de la generación de lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales tratadas por la empresa HOLSAN S.A.S., y provocados por el uso de gran cantidad de químicos; éstos lodos son tratados en la misma empresa por medio de la aplicación de polímeros y, que en ocasiones, se pueden aprovechar en la misma industria para relleno de suelos donde se han realizado excavaciones. Por el contrario, los lodos generados por el método de electrocoagulación se generan en menores cantidades; son más compactos y por ello requieren menores tratamientos; sin embargo, dichos lodos pueden contener altas concentraciones de aluminio o hierro dependiendo del material del electrodo de sacrificio usado en dicho proceso (Arango, 2005).

En este trabajo se evaluó para la empresa HOLSAN S.A.S. si la implementación de esta tecnología alternativa en comparación al tratamiento de coagulación, sedimentación y floculación tiene mayor eficiencia y ahorro en los costos de tratamiento de las aguas residuales provenientes de la explotación de hidrocarburos. Para ello, se realizó un prototipo a escala de laboratorio para poder determinar la eficiencia en costos de operación y eficiencia de remoción de sustancias contaminantes en comparación con los procesos convencionales de tratamiento de agua residual realizados en la empresa HOLSAN S.A.S., principalmente metales pesados e hidrocarburos.

2. OBJETIVOS

2.2. Objetivo general: Comparar el proceso de tratamiento de aguas residuales por coagulación-floculación convencional con electrocoagulación de la empresa HOLSAN S.A.S.

2.3. Objetivos específicos:

- Evaluar el efecto del tipo de electrodos aluminio-aluminio y aluminio-hierro, arreglo en serie y en paralelo de los electrodos, separación entre electrodos y corriente sobre la turbidez obtenida del agua tratada.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos (hidrocarburos, fenoles, metales totales: arsénico, cadmio, calcio, cromo, hierro, magnesio, plomo, selenio, zinc) para el agua tratada a partir del mejor ensayo obtenido según el diseño experimental.
- Comparar los parámetros fisicoquímicos del agua tratada por electrocoagulación con los obtenidos por medio del tratamiento de coagulación-floculación convencional y los costos de operación.

3. MARCO REFERENCIAL:

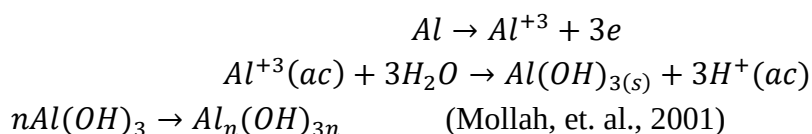
3.1. MARCO CONTEXTUAL:

HOLSAN S.A.S. es una empresa de ingeniería ambiental fundada el 4 de agosto de 1989, que se dedica principalmente al tratamiento de efluentes, así como el manejo y disposición de residuos producidos en el proceso de explotación y perforación de pozos de petróleo y gas natural. También se realiza el tratamiento de los cortes y lodos producidos durante el tratamiento de las aguas residuales, fluidos de perforación, deshidratación de lodos, entre otros servicios relacionados.

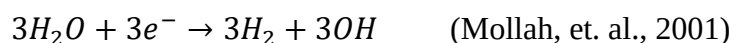
3.2. MARCO TEÓRICO:

Reacciones involucradas en la electrocoagulación:

- **Electrodo de Aluminio:** en el caso de que el aluminio sea el elemento que actúa como ánodo, se obtienen las siguientes reacciones (Mollah, et. al., 2001):



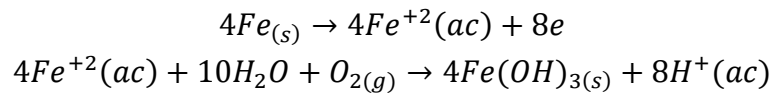
Ocurren en el cátodo las siguientes reacciones:



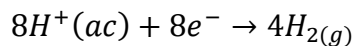
- **Electrodo de Hierro:** para el caso del hierro como ánodo, se han propuesto dos mecanismos para explicar la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso $Fe(OH)_2$ o hidróxido férrico $Fe(OH)_3$ (Mollah, et. al., 2001).

1 Formación del hidróxido férrico

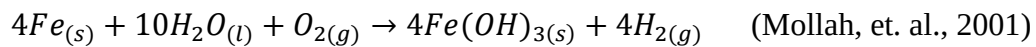
Ocurren en el ánodo las siguientes reacciones:



Ocurren en el cátodo las siguientes reacciones:

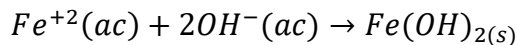
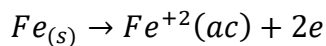


Siendo la reacción global:

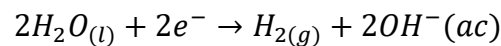


2. Formación del hidróxido ferroso

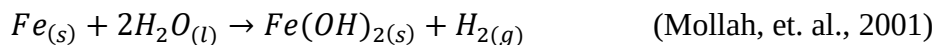
Ocurren en el ánodo las siguientes reacciones:



Ocurren en el cátodo las siguientes reacciones:



Siendo la reacción global:



Luego de formarse el hidróxido férrico, los coloides se agregan, especialmente los que tienen carga negativa, y otras partículas contaminantes interactúan posteriormente con estos agregados y se eliminan mediante la formación de complejos o la atracción electrostática (Mollah, et. al., 2001).

3.3. MARCO CONCEPTUAL:

3.3.1. Recurso Hídrico: El agua es un factor fundamental usado para la determinación del desarrollo social, económico y cultural, a su vez es un elemento básico para la protección de los ecosistemas. Es un recurso poderoso que todo ser vivo necesita para sobrevivir, por lo que es importante preservar y mantener su calidad con el fin de garantizar un entorno saludable para todos (Briseño, 2018).

3.3.2. Agua residual: es cualquier agua cuya calidad tiene un efecto negativo debido a la actividad humana; que, por su calidad, cantidad o disponibilidad, no tiene valor directo para el fin para el que se utiliza o para el que se produce (Zarza, 2017). Por lo que se le deben aplicar uno o varios tratamientos para que no genere ningún tipo de alteraciones en las fuentes hídricas tanto superficiales como subterráneas.

3.3.3. Tratamiento de agua residual: es un procedimiento de limpieza que se lleva a cabo mediante la transformación de elementos físicos, químicos y biológicos. El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es producir efluentes sin carga contaminante y un residuo sólido o lodo que sea reutilizable, el tratamiento inicia por la separación física inicial de los elementos sólidos grandes, como basura, plásticos entre otros. Posteriormente se aplica un proceso de desarenado, seguido de una sedimentación primaria y secundaria según sea el caso; finalmente se realiza una filtración final y si el destino final requiere que sea agua potable se aplica la desinfección por medio de la adición de hipoclorito (América, 2019).

3.3.4. Energía eléctrica: proporciona una fuerza electromotriz, la cual produce una serie de reacciones químicas, donde se obtiene la estabilidad de las moléculas contaminantes, produciendo partículas sólidas menos solubles o coloidales. Seguidamente los contaminantes forman partículas sólidas menos coloidales; luego de esto, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o se suspenden; facilitando su remoción por medio de un método de separación secundario (Barrera, et al., 2014).

3.3.5. Coagulación-Floculación: la coagulación- floculación es un tratamiento donde se adicionan compuestos químicos al agua que se desea tratar, generalmente ayuda a los procesos posteriores de sedimentación y filtración. Para mejorar la eliminación de partículas, por medio de una sustancia soluble que se mezcla con una insoluble mediante reacciones químicas, y la floculación como fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan una contra otras formando así coágulos más y con mejor consistencia (Mazille, & Spuhler, 2020).

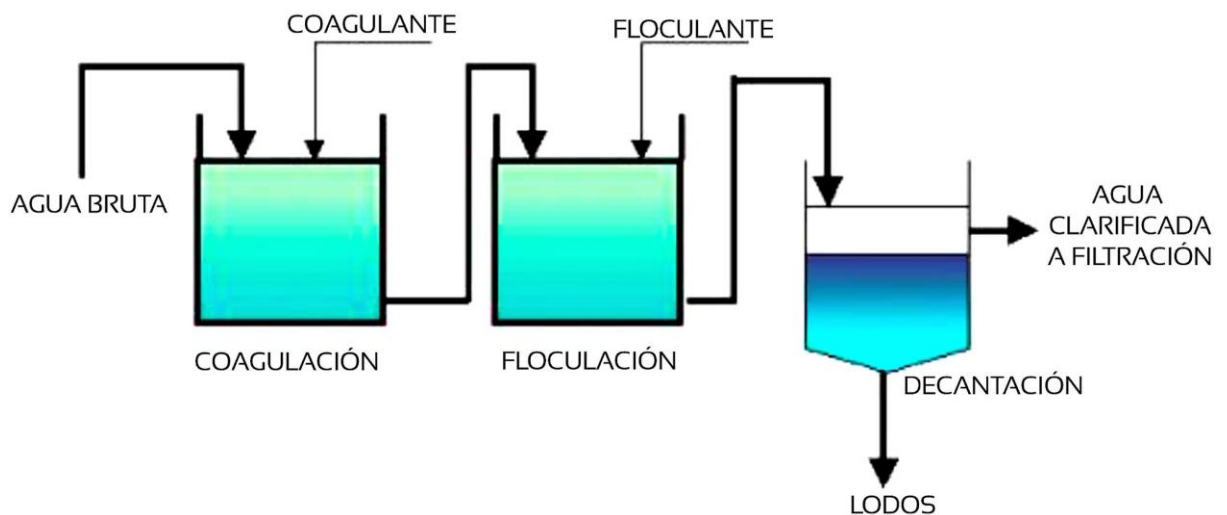


Imagen No. 1: Proceso de Coagulación-Floculación en una planta de potabilización de agua.

Fuente: Sánchez del Castillo, 2016; pág. 20.

3.3.6. Degradación biológica: hace referencia a un proceso mediante el cual se elimina un producto o sustancia mediante su descomposición por acción de organismos vivos (Hongos, Bacterias, Protozoos entre otros) (Curi, et. al., 2006).

3.3.7. Electrocoagulación: es un proceso que parte del principio de la coagulación química, la cual es definida como la adición de compuestos químicos al agua para alterar el estado físico de los sólidos suspendidos, coloidales o disueltos, con el fin de remoción por medio de precipitación o filtración (Mollah, M., 2004). El cuál puede ser aplicado para la disminución y/o remoción de sustancias contaminantes, que contienen las aguas residuales como producto de diversas actividades industriales como textiles, hidrocarburos, químicos, entre otros. Así como de las actividades domésticas de distintas comunidades. La electrocoagulación obtiene los iones del coagulante, ya que son generados por la electro-oxidación del ánodo de sacrificio; a diferencia de la coagulación común. Lo que permite a la electrocoagulación tener una mayor remoción de partículas coloidales de menor tamaño, ya que éstas tienen mayor posibilidad de ser coaguladas por el campo eléctrico que les proporciona movimiento, lo que además tiene ventaja sobre la coagulación tradicional que al generar otras reacciones genera una contaminación secundaria debido a la adición de reactivos químicos; que a su vez también representan una gran inversión económica y dificulta su remoción. Además de ello, es un proceso mediante el cual las partículas contaminantes que se encuentran suspendidas son desestabilizadas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, allí se induce una corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de distintos materiales, con el fin de cumplir la función que realizan los químicos, por ende, es un proceso más eficiente, económico y ambientalmente sostenible (Holt, P., et. al., 2005).

Dicha corriente eléctrica proporciona una fuerza conocida como “electromotriz” que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes, produciendo partículas sólidas menos coloidales o solubles

(Barrera, Cañizares, Fernández, Natividad & Rodrigo, 2014). Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, siendo de esta manera mucho más fácil su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados (Chen, 2004).

En este proceso, el tratamiento se lleva a cabo sin la adición de ningún coagulante o floculante químico. La generación de iones metálicos tiene lugar en el ánodo, mientras que en el cátodo se produce hidrógeno. El mecanismo de la electrocoagulación depende altamente de la química del medio acuoso, fundamentalmente de la conductividad; de igual manera influirán características como el pH, el tamaño de las partículas y las concentraciones de las especies (Parga, Vázquez & Moreno, 2009).

3.3.7.1. Ventajas:

- El agua que pasa por el electro coagulador tiene menos sólidos disueltos que el agua tratada químicamente, es una condición que disminuye el costo al tratar este tipo de aguas residuales para su reutilización (Valdivia, 2013).
- La coagulación electrolítica evita o disminuye en gran medida el uso de productos químicos, por lo que no hay riesgo de contaminación ambiental secundaria debido a la adición de productos químicos y requiere equipos simples y fáciles de manejar (Valdivia, 2013).
- El paso de la corriente eléctrica permite que el movimiento de las partículas más pequeñas del contaminante sea mejor lo que permite la incrementación de la coagulación, por lo que permite que el control de la dosis suministrada pueda ajustar la corriente, por lo que se puede automatizar fácilmente (Valdivia, 2013).
- El proceso de electrocoagulación evita el uso de productos químicos, por ello, no existe la posibilidad de contaminación ambiental secundaria debido a la adición de productos químicos. Por otro lado, este proceso es sencillo de automatizar, dado que el control de dosificación se realiza mediante un ajuste de corriente (Valdivia, 2013).
- El líquido separado por electrocoagulación puede reprocesarse como subproducto, contribuyendo a reusar las aguas residuales tratadas. Este proceso elimina pequeñas partículas coloidales, esto se debe a que el campo eléctrico aplicado genera que las partículas coloidales se hundan más rápido y promueva la coagulación (Valdivia, 2013).

3.3.7.2. Desventajas:

- El electrodo de sacrificio se disuelve en la corriente residual debido a la oxidación y debe ser reemplazado. Los óxidos que se forman sobre el ánodo pueden formar capas que bloquean el paso de la corriente eléctrica, lo que reduce la eficiencia del proceso (Valdivia, 2013).

- Se requiere una alta conductividad para las aguas residuales. Por otro lado, hay que tener en cuenta que esto puede ser un tratamiento costoso en áreas con facturas de electricidad altas (Valdivia, 2013).

3.3.8. Factores que afectan la electrocoagulación:

3.3.8.1. Tipo de electrodos: el material del cual se constituyen los electrodos, deben ser placas de metal preferiblemente debido a que al ser utilizadas como electrodos de sacrificio aportan iones al sistema; dichos iones al ser liberados, aportan la neutralización de las partículas, y a su vez los sistemas de suspensión se desestabilizan y dan paso a la coagulación (Arango, 2005).

3.3.8.2. Intensidad de Corriente: es el parámetro que tiene mayor influencia en la remoción de los diversos contaminantes presentes en las aguas residuales, así como la eficiencia de remoción y el consumo de energía; se ven a su vez afectados debido al incremento de la corriente eléctrica. Al ingresar la densidad de corriente al sistema se puede determinar la cantidad de iones de hierro (Fe) o aluminio (Al) que son liberados por los electrodos; la energía eléctrica requerida puede ser por medio de corriente alterna o corriente directa (Rodríguez & Muñoz, 2019).

3.3.8.3. Conductividad: al aumentar la conductividad eléctrica se incrementa la densidad de la corriente eléctrica, gracias ello se mantiene constante el voltaje alimentado al reactor de electrocoagulación. Al aplicar electrolitos como CaCl_2 o NaCl se genera un aumento en la conductividad del agua residual; que a su vez producen una capa insoluble que se deposita sobre los electrodos que aumentan su potencial (Jiang, et. al., 2002).

3.3.8.4. Arreglo de los electrodos: Se puede dar de forma monopolar (en serie) o bipolar (en paralelo); con respecto a la orientación de los electrodos (placas), ya que, el agua fluye por medio de los espacios entre las placas; donde influyen los tiempos de residencia del reactor, la eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual y la velocidad del flujo. Para ello, se debe considerar el tipo de flujo ya que éste puede ser en lotes (Bach) o continuo (Piña, et. al., 2011).

3.3.8.5. Separación entre electrodos: se debe ajustar de acuerdo al grosor de las placas y delimitar si se requiere mayor o menor distancia de electrodos que por lo general en algunos de los estudios realizados para evaluar un reactor de electrocoagulación; se ha realizado de 1 a 6 cm de separación entre placas, teniendo en cuenta que junto con la intensidad de corriente que se proporciona al sistema y el arreglo de los electrodos, inciden directamente en los parámetros resultantes del agua tratada (Morales & Acosta, 2010).

3.3.8.6. Temperatura: es un factor que incide en la electrocoagulación, en algunos casos de estudio se ha llegado a determinar que la eficiencia de la corriente aumenta inicialmente hasta alcanzar los 60°C ; el incremento de dicha eficiencia es directamente

proporcional al aumento en la destrucción del óxido de aluminio que se encuentra en la superficie del electrodo (Arango & Garcés, 2009).

3.3.8.7. Potencial de Hidrógeno (pH): influye directamente en la eficiencia de la corriente, en diversas investigaciones que se han realizado se ha podido determinar que el pH puede incrementar al tratar aguas residuales ácidas; por otro lado, puede disminuir depende de la naturaleza de los contaminantes contenidos en el agua residual tratada y a su vez en la eficiencia de remoción de los mismos (Arango & Garcés, 2009).

3.4. MARCO LEGAL

3.4.1. NACIONAL:

Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: se establecen los valores máximos permisibles, de los parámetros contenidos en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado. De acuerdo con la actividad por la cual se genera el vertimiento, se clasifican en aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales, que a su vez dependen del proceso productivo ejecutado por empresas y personas jurídicas.

En el caso puntual del presente proyecto se aplican los niveles máximos permisibles para el sector de hidrocarburos, del cual en el artículo No. 11 de la presente resolución; se establecen además de los valores máximos permisibles para esta actividad industrial, cada uno de los parámetros fisicoquímicos de importancia a evaluar. Cabe resaltar que estos valores máximos permisibles aplican para los efluentes que van a un cuerpo de agua.

Decreto 3930 de 2012 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: establece las disposiciones relacionadas con usos y ordenamiento del recurso hídrico, y los vertimientos a cuerpos de agua superficiales, a los sistemas de alcantarillado y/o al suelo. Con el fin de presentar cada uno de los requerimientos indispensables, para obtener el permiso de vertimientos de acuerdo con la actividad industrial realizada, directamente de la autoridad ambiental competente (CAR's, ANLA).

3.4.2. INTERNACIONAL:

Directrices para la calidad del agua potable – Organización Mundial de la Salud: en estas guías se proporcionan las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para gestión del riesgo a sufrir daños que puedan comprometer la seguridad del agua potable. Las recomendaciones deben ser consideradas en el contexto de la gestión del riesgo de otras fuentes de exposición, tales como residuos, aire, alimentos y productos de consumo

3.4.3. DISTRITAL:

Resolución 3956 de 2009 - Secretaría Distrital de Ambiente: se establece la norma técnica, para el manejo y control de los vertimientos realizados a los cuerpos hídricos del perímetro urbano de Bogotá D.C, a su vez fija los índices, factores, concentraciones y/o estándares máximos para el vertimiento.

3.4.4. REGIONAL:

Acuerdo 08 de 2004 – Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca

Mediante el cual se define las concentraciones máximas de vertimiento a un cuerpo de agua generado por la industria de hidrocarburos en áreas de jurisdicción de la CAR; teniendo en cuenta el tipo de tratamiento del efluente (tratamiento fisicoquímico o biológico).

4. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA O PASANTÍA

Para el desarrollo de la pasantía a continuación se presentan los materiales y procedimientos utilizados para su ejecución; dicho trabajo se llevó a cabo dentro de los laboratorios de la Universidad Santo Tomás y las oficinas de la empresa Holsan S.A.S. dentro de la planta ubicada en Tocancipá y Bogotá.

4.1. Montaje Experimental:

Para el desarrollo de las pasantías se realizó un reactor tipo Bach a escala de laboratorio; en la *Tabla No. 1* se muestran los equipos para el diseño experimental y en la *Tabla No. 2* se evidencian las características y dimensiones de diseño de la celda electrolítica:

Tabla No. 1: Materiales y equipos requeridos para el desarrollo del diseño experimental.

EQUIPOS	DESCRIPCIÓN
REACTOR	El reactor de electrocoagulación utilizado para la práctica está elaborado en material de vidrio, tiene forma rectangular con dimensiones de 11 cm de largo x 11 cm de alto x 16 cm de ancho; su capacidad máxima para tratar es de 1,5 L. Cuenta con un borde de acrílico con ranuras cada 0,5 cm que sujetan los electrodos, permitiendo que estos queden a 3 cm del fondo del reactor, se utilizó un volumen de 1 L de agua a tratar en la mayor parte de los ensayos.
ELECTRODOS	Los electrodos empleados son de aluminio y de hierro, cuenta con unas dimensiones de 9 cm de ancho x 8 cm de largo y con 0,1 cm de espesor; dichas medidas se seleccionaron de acuerdo a la revisión bibliográfica, que a su vez depende también del tamaño del reactor. Por otro lado, los electrodos tienen forma de T con el fin de que se puedan sujetar a las pestañas superiores del reactor, los electrodos presentan una superficie de contacto de 40,5 cm ²
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	Es una fuente regulada de corriente continua (DC) de la marca BAKU BK-305D, con un rango de voltaje de 0 a 30 Voltios y un rango de corriente de 0 a 2,2 Amperios
MULTÍMETRO	El multímetro Soporta un máximo de 30V y 2.2 A.
MULTIPARÁMETRO	Se utilizó un espectrofotómetro NANOCOLOR®UV/VIS II, que de acuerdo con sus funciones integradas permite una medición más exacta de color y

	turbidez (NTU), que fueron de las más utilizadas en el presente estudio.
pH- METRO	Se utilizó un pH-metro digital portátil HANDYLAB con el fin de medir el pH del agua a tratar durante el proceso de electrocoagulación.

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 2: Especificaciones de los componentes de la celda electrolítica.

PARTE	DIMENSIONES	
Celda Electroquímica (Reactor tipo Bach)	Altura	11 cm
	Ancho	16 cm
	Profundidad	11 cm
	Ranura para la separación entre electrodos	0,5 cm
Electrodos	Altura	8 cm
	Ancho	9 cm
	Espesor	0,1 cm
Pestañas de los electrodos	Altura	1 cm
	Ancho	2 cm
Fuente de corriente directa	Rango de voltaje	0 a 30 V
	Rango de amperaje	0 A 2,2 A

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, mediante las imágenes 2-5, se muestra el diseño del montaje experimental y sus respectivas dimensiones a detalle:

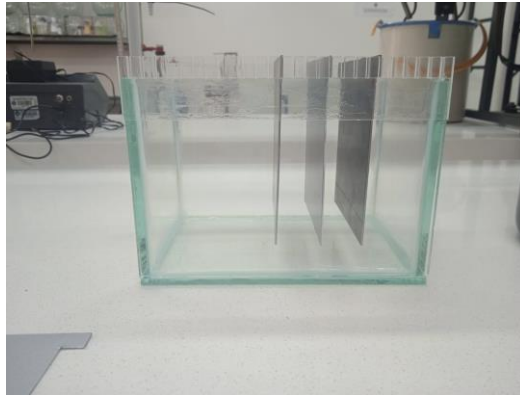
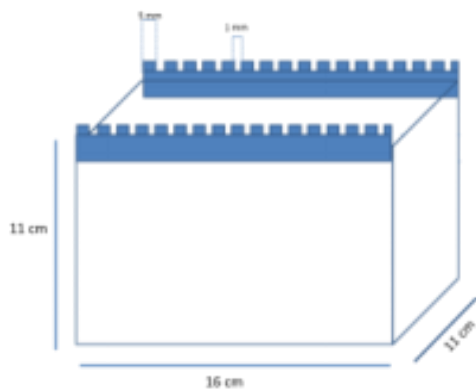


Imagen No. 2 y 3: Esquema del reactor y reactor físico a escala de laboratorio con capacidad máxima de 1,5 L de agua residual a tratar.

Fuente: Elaboración propia, reactor de vidrio.

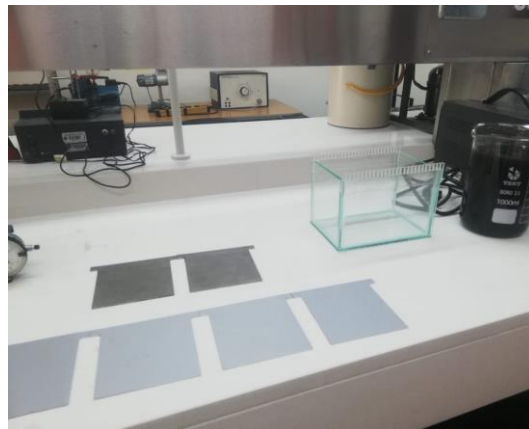
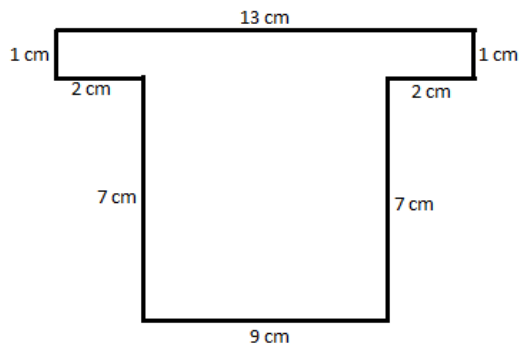


Imagen No. 4 y 5: Esquema de los electrodos y electrodos en físico, 4 de Al y 2 de Fe.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Desarrollo de la metodología:

Para llevar a cabo la verificación de los parámetros propuestos tanto en los objetivos como en el diseño experimental, se tuvieron que realizar varias pruebas preliminares en el laboratorio de la universidad; con el fin de determinar los límites permisibles en los parámetros establecidos de acuerdo a la Resolución No. 631 de 2015 en el sector de hidrocarburos, para tratar el agua residual proveniente de un pozo de extracción ubicado en Aguazul (Casanare). Así mismo, se realizó una revisión de la metodología utilizada dentro de la empresa HOLSAN S.A.S. a partir de fuentes primarias, para conocer los procesos y productos químicos que se utilizan en el tratamiento de efluentes por medio de coagulación y floculación convencional, que es utilizado actualmente en la empresa.

A continuación, se explica a detalle cómo se determinaron los parámetros que tienen mayor influencia en los ensayos de laboratorio para determinar la eficiencia remoción de las partículas contaminantes presentes en el efluente, teniendo como variable dependiente la turbidez del agua residual respecto al agua tratada en cada ensayo:

➤ **Material de los electrodos:**

Para evaluar la eficiencia de remoción de los electrodos de Al y Fe y sus posibles combinaciones, se utilizan en el primer ensayo cuatro electrodos de Aluminio (Al-Al-Al-Al), en el segundo dos de hierro y dos de aluminio en serie (Al-Al-Fe-Fe), y por último la misma combinación anterior, pero en paralelo (Al-Fe-Al-Fe).

➤ **Distancia entre electrodos:**

Después de calcular la eficiencia de remoción según el material de los electrodos, se identifican las combinaciones adecuadas de los electrodos; y luego se realizan ensayos con distancias entre 1cm y 2cm, con el fin de identificar cuál es la más eficiente. Estos ensayos se realizaron con un pH inicial de 8.

➤ **Tiempo de residencia:**

Luego de calcular la eficiencia de remoción mediante la evaluación del pH adecuado para el proceso de electrocoagulación, se evalúa el efecto del tiempo de residencia sobre la eficiencia de tratamiento, tomando muestras de turbidez cada 15 minutos hasta completar 45 minutos. Finalmente se evalúa la eficiencia de remoción en términos de tiempo y el valor óptimo para el proceso de electrocoagulación.

➤ **Intensidad de Corriente:**

La intensidad de corriente requerida para el funcionamiento del reactor de electrocoagulación, según varios estudios realizados a nivel internacional para el tratamiento de efluentes de distintas industrias; las intensidades de corriente evaluadas han demostrado los resultados más eficientes entre 0,1 y 3 Amperios (Manchego & Zabala, 2019). Por ende, se utilizó una fuente de corriente que va de 0,1 a 2,2 Amperios; para determinar la intensidad de corriente necesaria de acuerdo con el efluente a tratar.

➤ **Variación de pH inicial:**

Inicialmente el efluente a tratar tiene un pH de 8 (básico), por ende, luego de realizar dos ensayos con ese pH; se determina que es necesario agregar unas gotas de ácido sulfúrico para bajarlo a 6. Sin embargo, para mejorar la conductividad se debe agregar un poco de sal y con ello el pH disminuye a 5.

Teniendo en cuenta que todas las variables independientes están directamente relacionadas con la turbidez, se plantea definir el porcentaje en la eficiencia de remoción por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Eficiencia de Remoción} = \frac{T_0 - T_f}{T_0} * 100$$

Ecuación No. 1: Eficiencia de remoción en porcentaje.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presentan los resultados de cada ensayo realizado, en donde se estudió el material de los electrodos, la distancia entre ellos más eficiente, la intensidad de corriente y el tiempo de residencia; con respecto a la turbidez de las muestras del efluente antes y después de aplicar el tratamiento:

5.1. Pre-experimentación:

Para determinar las variables independientes planteadas en los objetivos se empezó un análisis con pruebas experimentales a pequeña escala; en primer lugar, se determinó la combinación de los electrodos según su material para definir la eficiencia de remoción. En primer lugar, se tomaron 500 ml de agua contaminada con hidrocarburos proveniente de un pozo de extracción de petróleo ubicado en Aguazul-Casanare; esta agua tenía un pH inicial de 8, el primer ensayo se realiza con una intensidad de corriente de 1,2 a 1,5 Amperios y el Voltaje varía entre 16-25.



Imagen No. 6: Ensayo de laboratorio con un electrodo de aluminio y otro de hierro.

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó que, al tratarse de compuestos derivados del petróleo, son aromáticos y grasos, por lo cual flotan sobre el agua y se genera esa gran cantidad de espuma que se puede observar en la imagen anterior. Por ello, se determinó realizar la comparación con el tratamiento de coagulación química convencional; en un principio se había planteado quitar el uso de químicos, sin embargo, el agua proveniente de la industria de hidrocarburos está bastante contaminada por lo que no se puede quitar el uso de dichas sustancias definitivamente, pero si se puede reducir sus proporciones en gran medida. Para definir que coagulante funcionaba mejor se hicieron 3 pruebas en muestras de agua residual industrial contaminada con hidrocarburos 20 ml.



Imagen No. 7: Ensayo de laboratorio con tres coagulantes distintos.

Fuente: Elaboración propia.

En la primera muestra se agregaron 0,2 ml de Hidroxicloruro de Aluminio o Policloruro de Aluminio (PAC) y se agitó durante un minuto, obteniendo una reacción rápida en la formación de los coágulos:

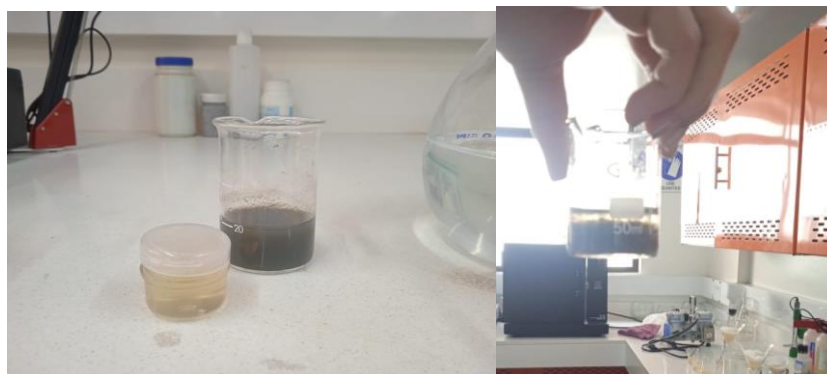


Imagen No. 8 y 9: Primera muestra de 20 ml de agua sin tratar con 0,2 ml de PAC.

Fuente: Elaboración propia.

En la segunda muestra se añadieron 0,3 ml de Alumbre o Sulfato de Aluminio al 1% pero no tuvo una buena reacción porque los flocs fueron demasiado finos, seguidamente se mezcló con 2 gotas de Policloruro de Aluminio, pero no se notó ningún cambio:



Imagen No. 10 y 11: Segunda muestra de agua no tratada con 0,3 ml de Sulfato de Aluminio.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la tercera muestra se agregaron 0,2 ml de Cloruro Férrico, reaccionó solo un poco pero no se obtuvo la consistencia deseada; seguidamente se mezcló con 0,1 ml de PAC pero tampoco cambió la reacción:

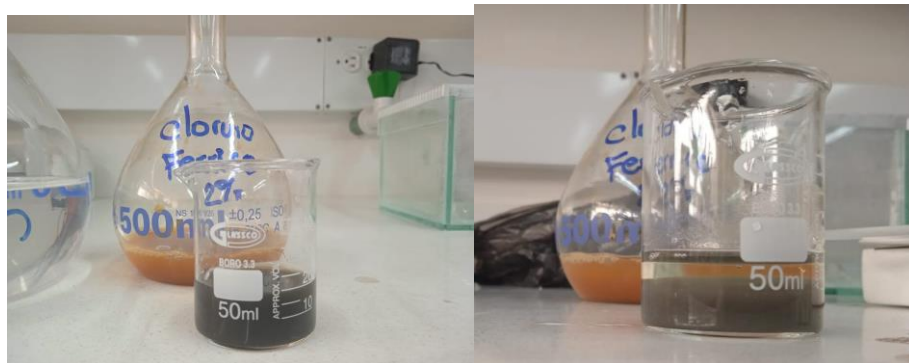


Imagen No. 12 y 13: Tercera muestra de agua sin tratar con 0,2 ml de Cloruro Férrico.

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó que el coagulante que funciona mejor en el agua sin tratar es el Policloruro de Aluminio, por ello se siguió con la determinación del floculante adecuado para este tipo de aguas residuales industriales; para dicha elección se probaron los tres tipos de floculantes catiónico, no iónico y aniónico tanto en el agua no tratada como en el agua tratada por electrocoagulación:

En primer lugar, se realizaron las pruebas del tipo de floculante en 3 muestras de 20 ml de agua residual industrial no tratada, en la primera muestra se añadieron 0,15 ml de floculante catiónico que es de consistencia viscosa y tuvo una reacción dejando a su vez un hueco en el centro del líquido, sin embargo, generó unos flocs muy finos y pequeños. En la segunda muestra, se añadieron 0,05 ml de floculante no iónico, el cual tuvo una reacción casi inmediata formando un hueco en el centro más grande comparado con la

reacción anterior; además se generaron flocs grandes y más compactos. Finalmente, en la tercera muestra, se agregaron 0,1 ml de floculante aniónico, pero no se evidenció ningún tipo de reacción ni se presentó la formación de flocs. Los resultados se pueden observar en la siguiente imagen:



Imagen No. 14: Pruebas de floculantes en 20 ml de muestra de agua residual industrial sin tratar.

Fuente: Elaboración propia.

En el momento de probar las reacciones de cada tipo de floculante en las muestras de agua sin tratar, se evidenció una mejor reacción en el floculante no iónico, seguido del catiónico; descartando de esta forma el aniónico ya que no le dio fuerza a los flocs ni los formó de forma esperada. Por ende, se deduce que al mezclar el floculante catiónico con el no iónico se obtiene una mejor reacción:

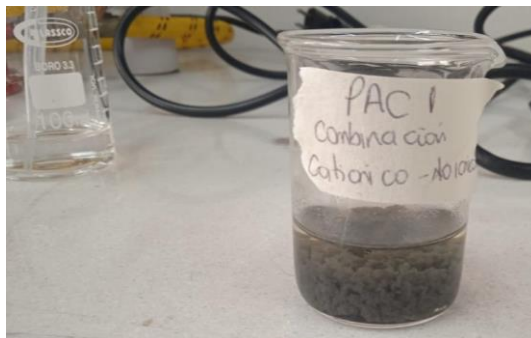


Imagen No. 15: Muestra de agua residual con PAC y floculantes Catiónico y No iónico.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizaron pruebas en 3 vasos Baker con 20 ml de agua residual industrial tratada con electrocoagulación; obteniendo la mejor reacción con el floculante no iónico que formó flocs más grandes y compactos, y el catiónico que también generó flocs, aunque más pequeños; finalmente el aniónico al igual que en las muestras sin tratar no tuvo una reacción favorable en la formación de flocs.



Imagen No. 16: Muestras de agua residual industrial tratada con electrocoagulación, con distintos floculantes.

Fuente: Elaboración propia.

Se probó mezclar los floculantes con la mejor reacción a fin de obtener unos flocs más firmes y con mayor consistencia; cabe resaltar que según el tipo de agua residual a tratar funcionan diferente tanto los coagulantes como los floculantes; para este tipo de agua contaminada con hidrocarburos, el coagulante más efectivo es el PAC y en cuanto al floculante la mezcla de catiónico y no iónico fue la que tuvo la mejor reacción:

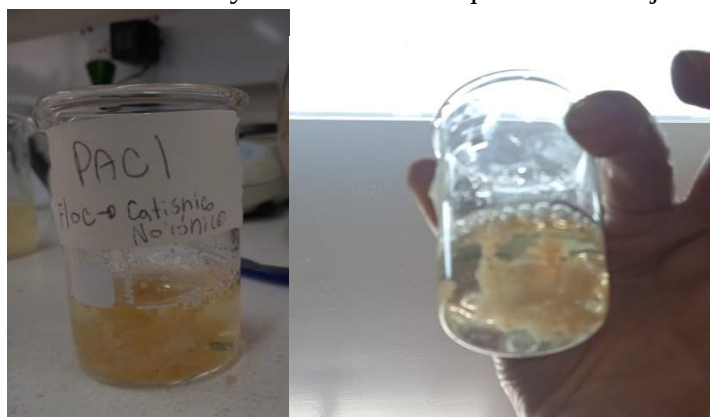


Imagen No. 17 y 18: Agua residual industrial tratada con electrocoagulación con floculante catiónico y no iónico.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Ensayos de laboratorio: para lograr definir las variables independientes de material y configuración de electrodos, intensidad de corriente y distancia entre electrodos, se realizaron distintos ensayos en condiciones variables; comparando los respectivos valores de la turbidez que se toma como variable dependiente para determinar la eficiencia de remoción de contaminantes en el agua residual industrial proveniente de actividades de extracción de hidrocarburos.

En este apartado se demuestran los resultados obtenidos en los diversos ensayos realizados

5.2.1. Material de los electrodos:

Configuración de electrodos	Turbidez Inicial	Turbidez Final	Eficiencia de Remoción (%)
Al-Al-Al-Al	442,7 NTU	8,7 NTU	98%
Al-Fe-Al-Fe	442,7 NTU	2,8 NTU	99,4 %

TIPO DE COMBINACIÓN	VOLTAJE Y CORRIENTE	TIEMPOS	ASPECTO	EVIDENCIAS			
				INICIAL	FINAL	ELECTRODOS	PRECIPITACIÓN
Al-Al-Al-Al	Corriente Inicial: 1 A Corriente final: 2 A Voltaje Inicial :2 Voltaje Final: 2	Tiempo residencia :45 minutos Tiempo filtración: 50 min	Al pasar 4 minutos se empieza a ver la formación de grasa en la superficie, se puede observar cómo burbujea, esto se da por los gases que libera la reacción. El electrodo negativo recibe la mayor carga de contaminación; por otro lado, el electrodo positivo es el de sacrificio y el que más se desgasta.				
Al-Fe-Al-Fe	Corriente Inicial: 1,3 A Corriente final: 2 A Voltaje Inicial: 2 Voltaje Final: 6	Tiempo residencia :45 min Tiempo filtración: 55 min	Pasados 10 minutos se sube la intensidad de corriente a 2 A, pasados 15 minutos se torna de un color más entre gris y café, muy distinto al momento de comparar con el color negro inicial del agua a tratar. Pasados 30 min el agua ya se torna de un color amarillo y los flocs se pueden evidenciar en la parte de arriba del reactor.				

Tabla No. 3 y 4: Resultados obtenidos en los ensayos a partir del material y tipo de conexión de los electrodos.

Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Distancia entre electrodos:

Distancia entre electrodos (cm)	Turbidez Inicial	Turbidez Final.	Eficiencia de Remoción (%)
1 cm	442,7	22,5	95
2 cm	442,7	2,8	99,4

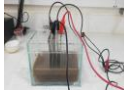
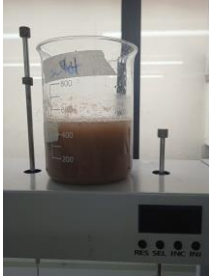
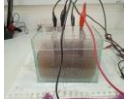
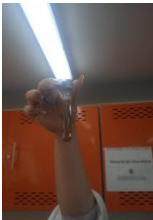
DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS	VOLTAJE Y CORRIENTE	TIEMPOS	ASPECTO	EVIDENCIAS			
				INICIAL	FINAL	ELECTRODOS	PRECIPITACIÓN
1 cm	Corriente Inicial: 1 A Corriente final: 2 A Voltaje Inicial: 2 Voltaje Final: 2	Tiempo residencia: 45 minutos Tiempo filtración: 1 hora	Al usar una separación de los electrodos de 1 cm, no se tienen buenos resultados debido a que no se cubre en gran parte el agua contenida en el reactor; además transcurridos los 45 minutos no se evidencia la capa de espuma y grasas tan grande ni tan concentrada. Además al agregar los floculantes tampoco se obtiene una buena reacción.				
2 cm	Corriente Inicial: 0,5 A Corriente final: 2 A Voltaje Inicial: 2 Voltaje Final: 6	Tiempo residencia: 45 minutos Tiempo filtración: 1 hora	Al cabo de 10 minutos ya se logra ver la separación del agua y la capa de lodos en la superficie, debido a que son materiales orgánicos y grasos. Se tiene una óptima distribución de los electrodos y a su vez una mejor reacción; que al finalizar y mezclar con los floculantes genera los flocs de manera fácil y rápida siendo a su vez más fáciles de remover por medio de la filtración.				

Tabla No. 5 y 6: Resultados obtenidos en los ensayos de acuerdo con la separación de electrodos.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Variación de pH inicial:

pH Inicial	Turbidez Inicial	Turbidez Final	Eficiencia de Remoción (%)
4	442,7	6,2	98,3%
6	442,7	4,9	98,8%
8	442,7	2,8	99,4%

pH Inicial	VOLTAJE Y CORRIENTE	TIEMPOS	ASPECTO	EVIDENCIAS		
				INICIAL	FINAL	PRECIPITACIÓN
4	Corriente inicial: 0,5 A Corriente final: 2 A Voltaje inicial: 2 Voltaje final: 2	Tiempo residencia :45 minutos Tiempo filtración: 1 hora	Para disminuir el pH se adiciono 1 ml de ácido sulfúrico, así el pH disminuyó de 8 a 5, sin embargo, al adicionar 0,7 gramos de sal disminuye a 4. Se tiene una buena reacción, pero aun así el agua tratada tiene un aspecto amarillento.			
6	Corriente inicial: 0,5 A Corriente final: 2 A Voltaje inicial: 2 Voltaje final: 4	Tiempo residencia :45 minutos Tiempo filtración: 1 hora	Se disminuye el pH del agua residual industrial con 0,5 ml de ácido sulfúrico y 0,3 gramos de sal para que disminuya a 6. Se tiene una reacción lenta y la acción de los floculantes es un poco efectiva.			

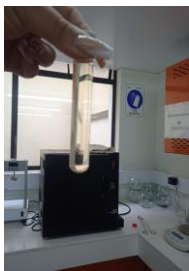
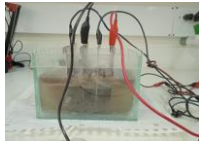
8	Corriente inicial: 0,5 A Corriente final: 2 A Voltaje inicial: 2 Voltaje final: 6	Tiempo residencia :45 minutos Tiempo filtración: 1 hora	Se deja el pH original del agua residual industrial contaminada con hidrocarburos, solamente con agregar la proporción indicada de sal se disminuye el pH a 7; y finalizando el tratamiento por medio de electrocoagulación se obtiene un pH de 6,5 en el agua tratada.			
---	---	--	---	---	---	---

Tabla No. 7 y 8: Resultados obtenidos en los ensayos realizados con respecto a la variación de pH.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Tiempo de residencia:

Tiempo de residencia SIN NINGUNA FILTRACIÓN	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	Eficiencia de Remoción (%)
15 Minutos	442,7	299,2	32,4%
30 Minutos	442,7	273,1	38,4%
45 Minutos	442,7	166,6	62,3%

TIEMPO DE RESIDENCIA	VOLTAJE Y CORRIENTE	TIEMPOS	ASPECTO	EVIDENCIAS (FOTOS)		
				INICIAL	FINAL	PRECIPITACIÓN
15 minutos	Corriente inicial: 1 A Corriente final: 2 A Voltaje inicial: 3 Voltaje final: 5	Tiempo de filtración: 1 hora	Pasados los primeros 15 minutos de reacción en el electrocoagulador, se saca una muestra para medir la turbidez obteniendo un valor de 299,2 NTU, lo que significa que disminuye a medida que se produce la reacción de los electrodos entre el agua.			
30 minutos	Corriente inicial: 1 A Corriente final: 2 A Voltaje inicial: 2 Voltaje final: 3	Tiempo de filtración: 1 hora	Luego de 30 minutos en el reactor de electrocoagulación, se pausa y se procede a tomar otra muestra para determinar su turbidez la cual se bajó a 273,1 NTU.			

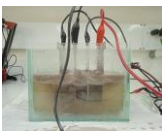
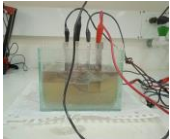
45 minutos	Corriente inicial: 1 A Corriente final: 2 A Voltaje inicial: 2 Voltaje final: 6	Tiempo de filtración: 1 hora	Finalmente, pasados 45 minutos se detiene el proceso de electrocoagulación			
------------	--	------------------------------	--	---	---	---

Tabla No. 9 y 10: Resultados obtenidos en los ensayos realizados con respecto al tiempo de residencia.

Fuente: Elaboración propia.

Fase Final: a continuación, se pueden apreciar los electrodos al final de todos los tratamientos, a su vez la comparativa entre el agua sin tratar y el agua tratada en el mejor ensayo:

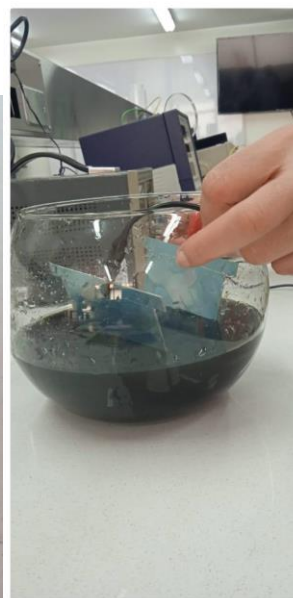
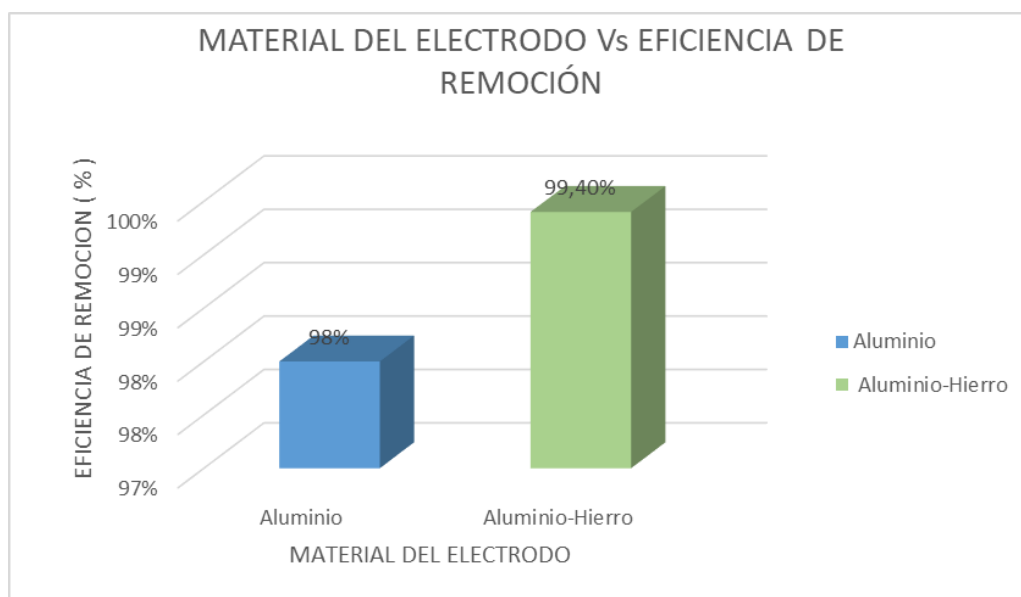


Imagen No. 19 & 20: electrodos en la fase final y comparación del agua sin tratar con el agua tratada finalmente.

Fuente: elaboración propia.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Material de los electrodos:



Gráfica No. 1: Material de electrodos vs. Eficiencia de remoción.

Fuente: Elaboración propia

Según lo investigado durante el desarrollo del proyecto se evidenció, que dentro de las industrias donde usan el método de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales los materiales más utilizados en los electrodos son el Aluminio y el Hierro, debido a que al ser de metal se diluyen en el proceso, lo que genera hidróxido de metal generando un coagulante natural que permite que el tratamiento del agua sea más efectivo.

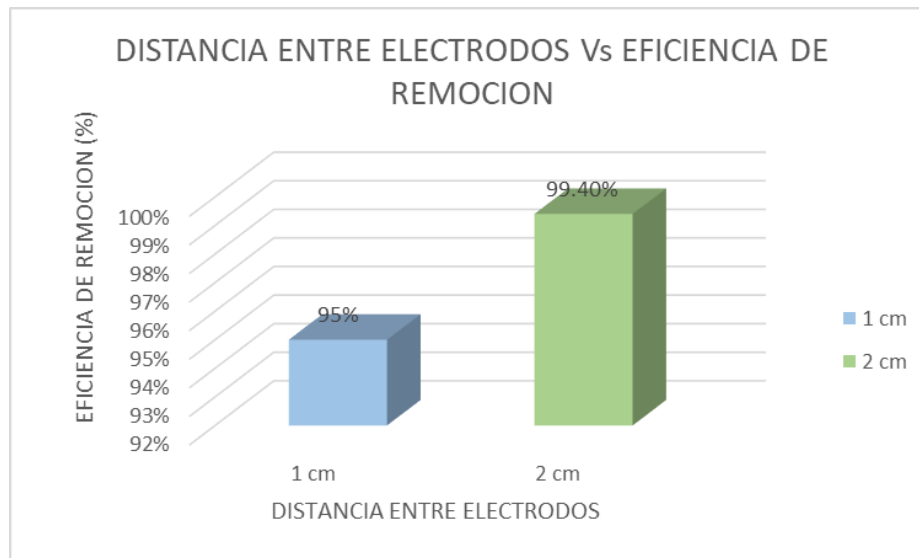
Por otro lado, la separación del ánodo desprende gas hidrógeno sobre los cátodos presentes; generando burbujas que permiten que los sólidos suspendidos se compacten, con el fin de que estos floten y posteriormente se precipitan en el fondo del reactor debido al peso del material de dichas partículas.

Dentro de la investigación y los ensayos realizados se determinó, que los materiales óptimos para la remoción de contaminantes en agua residual procedente de actividades con hidrocarburos; son los electrodos de hierro y aluminio ubicados en una conexión en paralelo; teniendo en cuenta que todas las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones, como lo son: pH inicial en 8, intensidad de corriente de 1,5 A y 2 A y un tiempo de residencia total de 45 minutos.

Es importante destacar que, aunque se realizaron varios ensayos, en primer lugar, se realizó con cuatro electrodos de Aluminio, que tuvieron una buena reacción con respecto a los valores de turbidez final; sin embargo, la eficiencia de remoción es algo menor con respecto a la otra combinación. El segundo ensayo, en el que se utilizaron

dos electrodos de hierro y dos de aluminio intercalados; reaccionaron en un menor tiempo y se obtuvo una turbidez muy pequeña en comparación con la inicial. Además, al usar los electrodos de hierro como ánodos de sacrificio no se desgastan tanto como los de aluminio usados en el primer ensayo; lo que significa que, en cuanto a porcentaje de remoción y durabilidad de los electrodos, la mejor combinación de electrodos es Al-Fe-Al-Fe.

6.2. Distancia entre electrodos



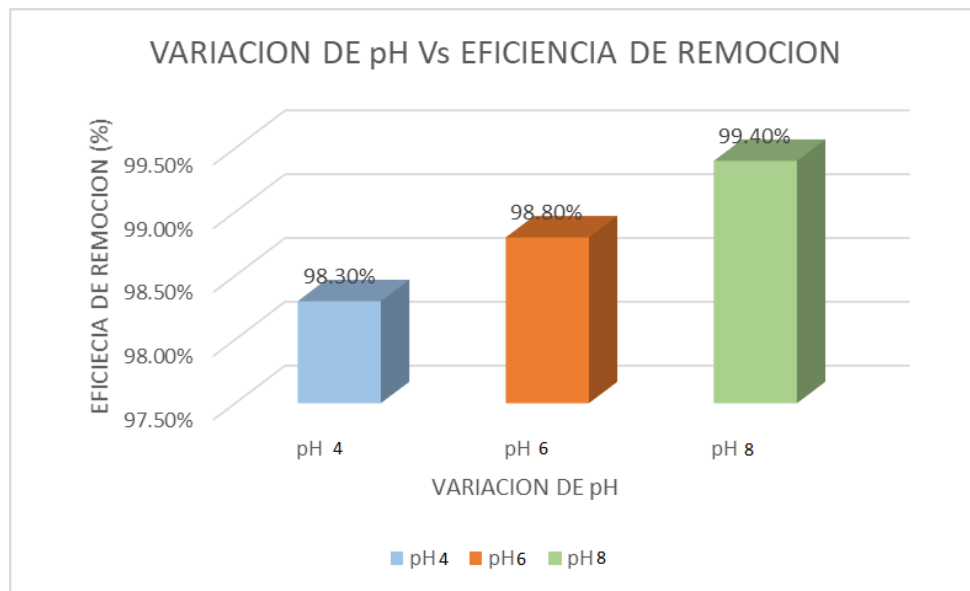
Gráfica No. 2: Distancia entre electrodos vs. Eficiencia de remoción.

Fuente: Elaboración propia

Se probaron dos distancias distintas entre los electrodos: una de 1cm de la cual se obtuvo un 95% de eficiencia de remoción y una distancia de 2cm que arrojó una mayor eficiencia de remoción con un porcentaje del 99,4%, debido a que entre más separados se encuentren los electrodos la generación de espuma es mayor generando una consistencia más fuerte en los coágulos formados dentro del proceso de electrocoagulación.

La distancia de 2 cm es la más acertada debido a que aumenta el área de transferencia de electrones entre sus electrodos. Es importante determinar que dentro de los ensayos entre más cerca se encontrarán los electrodos la remoción de contaminantes para este tipo de agua no era adecuada, debido a que la remoción no era suficiente para purificar en gran medida el agua tratada. Por otro lado, es necesario decir que distancias menores a la de 2 cm entre los electrodos, hace que los procesos de remoción se tarden más; generando a su vez atascamientos por saturación en los lodos, que impide que el proceso sea eficiente en la remoción objetiva y su proceso se determina como incompleto.

6.3. Variación de pH



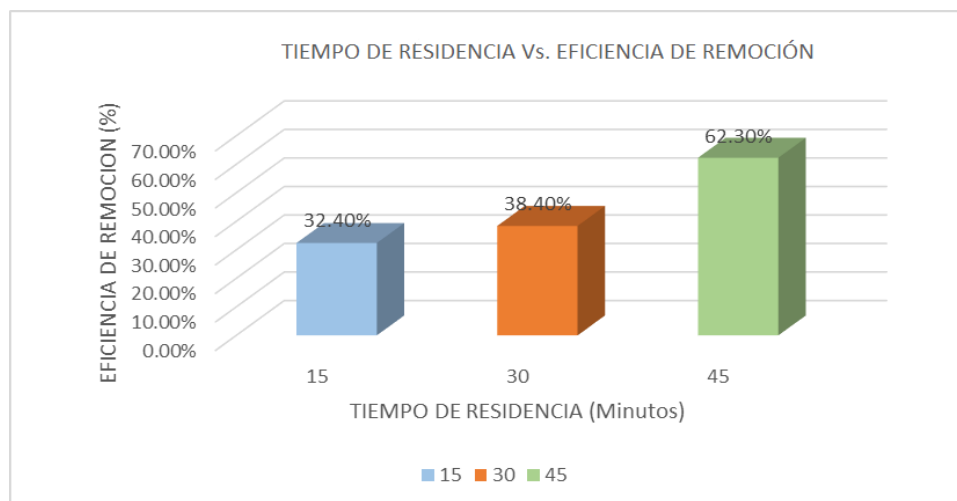
Gráfica No. 3: Variación de pH vs. Eficiencia de remoción.

Fuente: Elaboración propia

Como se ha probado en diversos estudios, el pH es un factor importante en la evaluación de rendimiento del proceso de electrocoagulación, así como en la eficiencia de remoción de contaminantes en los efluentes tratados.

Para determinar el valor del pH indicado, se añadió ácido sulfúrico y sal a una muestra de 60 ml para bajar el valor de 8 inicial a 4 final teniendo un porcentaje de remoción del 98,3%; con un pH en 6 se obtuvo una remoción del 98,8% y finalmente con el pH original del agua sin tratar (8) con una remoción del 99,4%. El pH puede variar dependiendo la reacción de los electrodos, la sal que se utiliza en los ensayos para aumentar la conductividad, el tipo de agua a tratar, principalmente; sin embargo, al finalizar el tratamiento se obtuvo un pH de 6,5 favoreciendo a su vez las condiciones del agua tratada.

6.4. Tiempo de residencia



Gráfica No. 4: Tiempo de residencia vs. Eficiencia de remoción.

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de residencia es importante dentro de estos ensayos por medio de un electrocoagulador ya que permite evidencia en qué momento se comienza a formar el hidróxido de aluminio y la remoción de los contaminantes presentes en el agua, el tiempo de residencia se determinó mediante la toma de muestras efluentes cada 15, 30 y 45 minutos evaluando en estos intervalos de tiempo la turbidez

6.5. Reducción del uso de productos químicos: es importante aclarar que en un principio se planeaba dejar a un lado definitivamente el uso de químicos, sin embargo, debido a la elevada carga de contaminantes presentes en el agua residual industrial y las altas trazas de hidrocarburos; es complicado no utilizar un compuesto que ayude con la coagulación de los sólidos suspendidos. Por ello, en los diversos ensayos realizados se determinó que se debe utilizar 0,2 ml de policloruro de aluminio en una muestra de 20 ml de agua residual sin tratar, antes de la electrocoagulación a fin de obtener mejores resultados; lo que traduce que se necesita el 1% de coagulante con respecto al volumen de la muestra a tratar.

6.5.1. Consumo de químicos para tratar 150 barriles diarios o 23.850 L/día: en la tabla se muestran los productos químicos y sus proporciones para tratar 23.850 L/día de agua residual proveniente de la actividad industrial de explotación de pozos de hidrocarburos. Estos datos fueron proporcionados por la empresa HOLSAN S.A.S.:

Tabla No. 11: Productos químicos y proporciones utilizados en el proceso de Coagulación-Floculación convencional de la empresa HOLSAN S.A.S

PRODUCTO QUÍMICO	CONSUMO
SULFATO DE ALUMINIO (Kg)	475
ACIDO FOSFÓRICO (Kg)	
HIPOCLORITO DE CALCIO (Kg)	80
PERÓXIDO DE HIDROGENO (Kg)	180
POLICLORURO DE ALUMINIO (Kg)	75
CAL HIDRATADA (Kg)	475
CYFLOC 1642 (Kg)	750
CYFLOC 1641(Kg)	0
ACIDO ACÉTICO (Kg)	750
HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (Kg)	0

Fuente: HOLSAN S.A.S.

Como se puede observar los químicos necesarios para tratar las aguas residuales en HOLSAN S.A.S. son bastantes y se utilizan en grandes proporciones, lo que traduce un elevado costo de operación en dicho proceso; por ende, con la propuesta de implementar la electrocoagulación en el tratamiento de dichas aguas, aunque no es posible eliminar definitivamente el uso de químicos debido a la alta concentración de contaminantes que contiene el agua. Aunque al implementar la electrocoagulación se disminuye el uso de químicos en gran medida, no se puede retirar su uso definitivamente debido a la alta carga contaminante que tiene el agua residual proveniente de actividades de explotación de hidrocarburos.

6.6. Comparación de los resultados obtenidos en el mejor ensayo de electrocoagulación con respecto a los resultados obtenidos por la empresa por coagulación-floculación convencional: se tienen como referencia los análisis de laboratorio del agua tratada por medio del método convencional, que fueron proporcionados por la empresa y se encuentran en el anexo No. 11.3., hay que aclarar que en el anexo No. 11.4. se encuentran los análisis de laboratorio obtenidos del agua antes de tratarla por medio de coagulación-floculación convencional. Partiendo de esto, el agua residual que se trató por medio del método convencional, aunque se obtuvo una reducción en la mayoría de los parámetros sin embargo hay que determinar las causas del aumento de parámetros como los cloruros y la DQO.

Tabla No. 12: Comparación de valores obtenidos en los análisis de laboratorio del agua sin tratar con respecto a los obtenidos del agua tratada por medio de coagulación-floculación convencional de Holsan S.A.S.

PARÁMETRO	RESULTADO OBTENIDO POR EL LABORATORIO DEL AGUA SIN TRATAR	RESULTADO OBTENIDO POR EL MÉTODO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CONVENCIONAL
Aceites y grasas (mg/L)	151	<4,0
Alcalinidad total (mg/L)	294	<5,00
Arsénico (mg/L)	<0,040	<0,040
Cadmio (mg/L)	<0,01	<0,010
Calcio (mg/L)	63,8	77,1
Cromo (mg/L)	<0,050	<0,050
Cloruros (mg/L)	344	554
Color (Pt/Co)	248	<5,00
Conductividad (us/cm)	2.156	2.700
DQO (mg/L)	1.806	2.433
DBO5 (mg/L)	787	446
Dureza Total (mg/L)	225	232
Fenoles (mg/L)	2,12	<0,100
Fosfatos (mg/L)	6,30	<0,100
Hidrocarburos totales (mg/L)	88,81475	<4,00
Hierro (mg/L)	3,83	0,914
Magnesio (mg/L)	2,95	6,40
Oxígeno disuelto (mg/L)	0,780	15
pH	8,1	6,7
Plomo (mg/L)	<0,050	<0,050
Selenio (mg/L)	<0,010	<0,010
Sólidos disueltos totales (mg/L)	1.750	1.674
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	933,3	13
Sulfatos (mg/L)	30,3	158
Temperatura (°C)	26	27,6
Turbiedad (NTU)	217	8,520
Zinc (mg/L)	0,223	0,340

Fuente: Elaboración propia.

Los cloruros aumentan en parte, debido a que, dentro del tratamiento realizado por la empresa, en la fase final luego de la filtración que se realiza por medio de una centrífuga se aplica hipoclorito con el fin de pulir el agua tratada; por otro lado, la conductividad aumenta, pero no tiene un cambio significativo y esto se puede presentar porque la solución contiene electrolitos. La DQO aumenta considerablemente, teniendo en cuenta que es la medida representativa de la contaminación con materia orgánica que tiene el

efluente (Hidritec, 2016), en cuanto a la DBO5 se presenta una disminución de más del 50%, El magnesio aumenta debido al uso de permanganato de potasio en el tratamiento, los sólidos suspendidos se disminuyen considerablemente, los sulfatos aumentan debido al uso de sulfato de aluminio usado como coagulante en el tratamiento convencional, a su vez cabe resaltar que la temperatura aumenta y esto se debe al elevado uso de químicos que se requiere para poder realizar el tratamiento.

Finalmente, la turbidez disminuye de un valor de 217 NTU a 8,520 NTU, lo que significa que se presenta una gran disminución en las partículas suspendidas que generalmente pueden ser indicadores de contaminación microbológica y metales pesados principalmente (Bolaños, 2018). De acuerdo con los resultados obtenidos del agua tratada por coagulación-floculación convencional, se encuentra una eficiencia de remoción alta, sin embargo, cabe resaltar que para llegar a dichos resultados se requiere un elevado uso de compuestos químicos y un tiempo de retención alto comparado con el requerido en la electrocoagulación.

A continuación, en la tabla No. 13 se realizó la comparación de los valores obtenidos en los análisis de laboratorio que se encuentran en los anexos 11.1. y 11.2., dentro de los cuales se evaluaron los parámetros del agua residual sin tratar y el agua tratada por medio de electrocoagulación en el prototipo a escala de laboratorio representado en el diseño experimental:

Tabla No. 13: Comparación de valores obtenidos en los análisis de laboratorio del agua sin tratar con respecto a los obtenidos del agua tratada por medio de electrocoagulación.

PARÁMETRO	RESULTADO OBTENIDO PARA EL AGUA SIN TRATAR	RESULTADO OBTENIDO POR EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN
Aceites y grasas (mg/L)	342	25
Alcalinidad total (mg/L)	1.000	700
Arsénico (mg/L)	<0,01	<0,01
Cadmio (mg/L)	<0,01	<0,01
Calcio (mg/L)	40	49
Cromo (mg/L)	0,12	0,034
Cloruros (mg/L)	3.099	12.993
Color (Pt/Co)	23.400	720
Conductividad (us/cm)	930	5.700
DQO (mg/L)	4.700	1.518
DBO5 (mg/L)	2.999	610
Dureza Total (mg/L)	900	270
Fenoles (mg/L)	0,12	0,72
Fosfatos (mg/L)	<0,1	33.873
Hidrocarburos totales (mg/L)	342	25
Hierro (mg/L)	10,5	0,56

Magnesio (mg/L)	208	55
Oxígeno disuelto (mg/L)	0,13	0,15
pH	7,07	6,99
Plomo (mg/L)	<0,01	<0,01
Selenio (mg/L)	<0,01	<0,01
Sólidos disueltos totales (mg/L)	970	2.770
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	389	96
Sulfatos (mg/L)	110	308
Temperatura (°C)	18,8	18,8
Turbiedad (NTU)	257	3,4
Zinc (mg/L)	4,7	1,36

Fuente: Elaboración propia.

Según los parámetros del agua sin tratar y los obtenidos del agua tratada por medio de electrocoagulación, tuvo una notable reducción en las grasas y aceites, debido a que los electrodos actúan como conductores de aniones y cationes dentro del agua, produciendo que los compuestos pesados como dichos aceites floten en la superficie y generen una capa de espuma, dándole al agua un aspecto grumoso o cortado. La alcalinidad no disminuye notablemente, debido a que se define como la capacidad del agua para neutralizar ácidos, que a diferencia del pH representa que tanto ácido puede absorber la solución sin generar una variación de pH (HANNA INSTRUMENTS, 2020).

Con respecto a la remoción de metales pesados, se obtuvieron reducciones considerables principalmente en Cromo, Hierro y Magnesio que a su vez eran los que tenían valores iniciales mayores a 0,1 mg/L; esto se debe a los iones metálicos liberados por los electrodos, que con un pH apropiado produce la desestabilización, sedimentación y remoción de contaminantes como los metales pesados (Elham, et. al., 2011). La conductividad aumenta en gran medida debido al proceso de electrocoagulación, que en el proceso generó un aumento en la densidad de corriente manteniendo a su vez el voltaje estable (Arango, 2012).

La DQO se reduce considerablemente, teniendo en cuenta que es la cantidad de oxígeno necesaria para degradar la materia orgánica contenida en el agua residual, debido a la remoción de compuestos orgánicos contenidos en gran medida en el agua antes de tratarla y a los compuestos aromáticos que forman los hidrocarburos. Y la DBO5, se puede considerar directamente proporcional teniendo en cuenta que es la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para lograr degradar la materia orgánica (Hidritec, 2016). A comparación de la remoción de dichos parámetros por medio del método convencional, se determinó que por medio de la electrocoagulación si se tiene un porcentaje de remoción más alto y, por el contrario, con el método de coagulación-floculación convencional la DQO aumenta en gran medida.

La dureza disminuye en parte debido al intercambio de iones presente en la electrocoagulación, la temperatura se mantuvo estable, el color se redujo aproximadamente en un 90% lo que se evidenció en los ensayos de laboratorio de acuerdo al agua inicial que tenía un color gris oscuro y finalmente se obtuvo un color transparente. Los sólidos disueltos totales aumentan, ya que son materia orgánica e inorgánica que no son visibles por separado, no se pueden precipitar y generalmente producen problemas de olor y color (Hernández, 2017), a su vez se puede deber al alto contenido de materia orgánica que contiene el agua residual proveniente de la industria de hidrocarburos. Los cloruros aumentan en gran medida, esto se puede deber a que los iones predominantes no son calcio y magnesio, esto conlleva una afectación para el uso posterior del agua tratada debido que puede deteriorar estructuras metálicas y causar contaminación en el suelo (Aguilar, 2001); los iones fosfatos tienen un incremento bastante elevado que se puede deber al alto contenido de materia orgánica removida en el tratamiento de electrocoagulación, sin embargo, debe considerarse un tratamiento posterior teniendo en cuenta que propicia el crecimiento de las algas en la superficie del agua tratada y disminuye la cantidad de oxígeno (Hach Lange, 2010).

Finalmente, se obtuvo una gran reducción en los hidrocarburos totales y la turbidez bajó de un 257 NTU a 3,4 NTU; lo que deja en claridad que el tratamiento por medio de electrocoagulación en general si tiene una mejor remoción de la mayor parte de contaminantes, con respecto a los valores obtenidos por el método de coagulación-floculación convencional; aun considerando que el agua tratada por electrocoagulación provenía de un pozo con diferentes condiciones y valores de parámetros mucho más altos, que los del agua cruda y posteriormente tratada con coagulación-floculación convencional.

6.7. Comparación de los resultados obtenidos en el mejor ensayo con respecto a la normatividad legal vigente: para realizar esta comparación se tuvieron en cuenta los valores máximos permisibles para realizar vertimientos en cuerpos de agua superficiales, establecidos en la Resolución 631 del 2015 específicamente para el sector de hidrocarburos en fase de exploración; con respecto a los resultados de laboratorio obtenidos de acuerdo a la muestra de agua tratada del mejor ensayo, por medio de electrocoagulación. En la Tabla No. 12 se evidencia una comparativa y finalmente si cumple o no con los valores establecidos en la norma:

Tabla No. 12: Comparación de valores obtenidos en los análisis de laboratorio del agua tratada por electrocoagulación con respecto a los establecidos en la Res. 631 de 2015.

PARÁMETRO	VALOR MÁXIMO PERMISIBLE SEGÚN RES. 631 DE 2015 (mg/L)	VALOR OBTENIDO EN EL MEJOR ENSAYO DE AGUA TRATADA (mg/L)	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL EXPLOTACIÓN HIDROCARBUROS	
			CUMPLE	NO CUMPLE
Grasas y aceites	15	25		X
Alcalinidad total	Análisis y reporte	700		
Arsénico	0,10	<0,01	X	
Cadmio	0,10	<0,01	X	
Cromo	0,50	0,034	X	
Cloruros	1200	12993		X
Fenoles	0,20	0,72		X
DQO	400	1518		X
DBO ₅	200	610		X
Hidrocarburos totales	10	25		X
Hierro	3	0,56	X	
pH	6-9	6,99	X	
Plomo	0,20	<0,01	X	
Selenio	0,20	<0,01	X	
Sólidos suspendidos totales	50	96		X
Zinc	3	1,36	X	
Sulfatos	300	308	X	

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar de acuerdo con los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio, cumple los valores en un 50%, hay algunos que no cumplen, pero no representa una notable diferencia entre su concentración inicial y final. Sin embargo, considerando los análisis de laboratorio de la muestra de agua sin tratar que se encuentra en el anexo 11.1. si tiene una remoción significativa de contaminantes; lo que lleva a

entender que el tratamiento de electrocoagulación si reduce en gran medida la carga contaminante, pero requiere de algún tratamiento posterior para disminuir sobre todo los valores de cloruros, fosfatos y sólidos disueltos totales.

Cabe resaltar que las comparaciones con la resolución anteriormente mencionada aplican únicamente para la disposición de las aguas residuales tratadas solamente en cuerpos de agua superficiales; por ende, se deberían cumplir todos si HOLSAN S.A.S quisiera obtener un permiso de vertimientos con alguna CAR o directamente en el ANLA. En la actualidad, el reúso de dichas aguas se basa en la reinyección en los mismos procesos de exploración, lavado de máquinas, entre otros según el cliente lo defina.

6.8. Aporte de la pasantía como ingenieras ambientales: durante el desarrollo de la pasantía se realizaron distintas actividades, dentro de las cuales se encuentra el análisis de documentos relacionados con los procesos que se realizan dentro de la empresa, resultados de laboratorio obtenidos a partir del agua tratada y sin tratar por parte de HOLSAN S.A.S.; pruebas y análisis de procesos para tratar el agua residual contaminada con hidrocarburos. Dentro de estos, se desarrollaron habilidades para identificar las cantidades y condiciones de tratamiento a aplicar dependiendo del agua residual y su procedencia; así como la preparación de disoluciones, uso de equipos, y tipos de reacciones que se pueden ensayar para determinar la mejor eficiencia de remoción.

Sumado a ello, al no tener un amplio conocimiento en el área de energía eléctrica, también nos enseñó el manejo y las condiciones para determinadas conexiones; el funcionamiento de la corriente y el voltaje, para poder llevar a cabo el tratamiento de electrocoagulación. Así como el dimensionamiento del proceso y los costos de operación al momento de implementarlo a gran escala en la empresa.

7. ANÁLISIS DE COSTOS

Dentro del análisis de costos se establece una comparación de los costos de operación para 20 días tratando 24/día, de la tecnología coagulación-floculación convencional utilizada por la empresa HOLSAN S.A.S. y el tratamiento propuesto por medio de electrocoagulación; en primer lugar se muestran los costos del tratamiento convencional en cuanto al uso de químicos y el costo generado por el uso de las maquinarias y equipos:

Tabla No. 13: Costos de operación por medio del método coagulación-floculación convencional utilizado por la empresa HOLSAN S.A.S. para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con hidrocarburos.

Química (Cantidad estimada por Pozo operación 20 días)	N° Sacos (25kg c/u)	Precio Unitario	Precio Total
Policloruro de Aluminio	40	\$118.125	\$4.725.000
Sulfato de Aluminio	40	\$91.125	\$3.645.000
Hidroxidocloruro de Aluminio	32	\$118.125	\$3.780.000
Polimero Cationico	22	\$803.250	\$17.671.500
Polimero no Ionico	40	\$860.625	\$34.425.000
Peróxido de Hidrógeno	40	\$168.750	\$6.750.000
Hipoclorito de Calcio	32	\$624.375	\$19.980.000
Ácido Fosfórico	40	\$388.125	\$15.525.000
Ácido Acético	40	\$270.000	\$10.800.000
Cal Hidrata	32	\$30.375	\$972.000
Descripcion/ Equipo	Cantidad	Precio por día	Precio total del mes
Bomba Centrífuga 4x3 para alimentación de centrífugas	2	\$128.000	\$2.560.000
Unidad de Tratamiento de Aguas que vienen de la PTAR	1	\$125.000	\$2.500.000
Laboratorio con Kits	1	\$115.000	\$2.300.000
Generador con tanque de Diesel y Suinistro de Diesel	1	\$1.580.000	\$31.600.000
Compresor de aire	1	\$85.000	\$1.700.000
Carrotanque con la flauta para disposición a zona de riego	1	\$2.100.000	\$42.000.000
Frac Tanks (1xagua a entregar y 1X agua para tratamiento)	2	\$240.000	\$4.800.000
Análisis de laboratorio externo para certificación de Ica	1	\$75.000	\$1.500.000
Mangueras y accesorios	1	\$75.000	\$1.500.000
Total operación mensual=			\$208.733.500

Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa HOLSAN S.A.S.

El análisis de costos para el método de electrocoagulación, se realizó mediante el cálculo del consumo de energía dentro del lugar donde se encuentra la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en la empresa HOLSAN S.A.S. generadas por la explotación de hidrocarburos, el costo de energía industrial con contribución (diurna); según las tarifas de energía eléctrica para el sector industrial, reguladas por la electrificadora del Meta para el mes de mayo del 2022 cuesta \$718,46 kWh (EMSA, 2022).

Para realizar el cálculo del consumo de energía por litro tratado y un tiempo de residencia de 45 min, se utilizó la siguiente fórmula:

Ecuación No. 2: Consumo de energía.

$$Consumo_{Energía} \left(\frac{kWh}{L} \right) = \frac{V * I * t}{1}$$

V= Voltaje (voltios)
I= Corriente (Amperios)
t= tiempo (horas)

Valor kWh=\$718,46

$$Consumo_{Energía} = \frac{6 \text{ voltios} * 2 \text{ Amperios} * 0,75 \text{ h}}{1} = 9 \frac{Wh}{L} = 9 \frac{kWh}{m^3}$$

Tabla No. 14 y 15: Análisis de costos de consumo energético diario.

TRATAMIENTO	VOLTAJE(VOL TIOS)	CORRIENTE (AMPERIOS)	CONSUMO DE ENERGÍA (kWh/m3)	COSTO DE ENERGÍA INDUSTRIAL CON CONTRIBUCIÓN DIURNA (COP\$)
ELECTROCOAGULACIÓN	6	2	9	\$ 6.466,14

$$6.466,14 * 24m^3 = \$155.187,36 \text{ por día}$$

TRATAMIENTO	VOLTAJE(VOL TIOS)	CORRIENTE (AMPERIOS)	CONSUMO DE ENERGÍA (kWh/m3)	COSTO DE ENERGÍA INDUSTRIAL CON CONTRIBUCIÓN POR MES (COP\$)
ELECTROCOAGULACIÓN	6	2	0,009	\$155.187,36

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación No. 3: Consumo del electrodo

$$Consumo_{Electrodo} \left(\frac{Kg}{m^3} \right) = \frac{I * t * M}{Z * F * v}$$

I=Corriente (Amperios)

t=tiempo de operación (horas)

M=Peso molecular del Al (26,98g/mol) y del Fe (55,487g/mol)

Z=número de electrones transferidos ($Z_{Al} = 2$) y ($Z_{Fe} = 2$)

F=Constante de Faraday (96487C/mol)

v=Volumen del agua tratada (m3)

Tabla No. 16: Costos de operación por electrodo consumido.

TRATAMIENTO ELECTROCOAGULACIÓN	VOLUMEN TRATADO (m³)	CORRIENTE (AMPERIOS)	CONSUMO DE ELECTRODOS(Kg/m3)	COSTO DE ELECTRODOS CONSUMIDOS (COP\$)
ELECTRODO HIERRO	0,001	2	0,4313042	\$ 4,313
ELECTRODO DE ALUMINIO		2	0.2097173	\$ 4,197

Fuente: Elaboración propia.

Peso molecular del Fe: 55,487 g/mol

Peso molecular del Al: 26,98 g/mol

Ecuación No. 4: Costo de operación.

$$Costo_{Operación} = Costo_{Energía} + Costo_{Electrodo Consumido}$$

Tabla No. 17: Costos de operación diaria.

TRATAMIENTO	COSTO DE ENERGÍA INDUSTRIAL CON CONTRIBUCIÓN DIURNA (COP\$)	COSTO DE ELECTRODOS CONSUMIDOS	COSTO TOTAL DE ENERGÍA INDUSTRIAL CON CONTRIBUCIÓN DIURNA (COP\$)
ELECTROCOAGULADOR	\$155.187,36	\$ 204,24	\$ 155.391.6

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Costo de operación mensual} = \$155.391,6 * 20 = \$3'107.832$$

Tabla No. 18: Costos de operación por medio del método de electrocoagulación propuesto para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con hidrocarburos realizado por la empresa HOLSAN S.A.S.

Descripción/ Equipo	Cantidad	Precio por día	Precio total del mes
Bomba Centrífuga 4x3 para alimentación de centrífugas	2	\$128.000	\$2.560.000
Unidad de Tratamiento de Aguas que vienen de la PTAR	1	\$125.000	\$2.500.000
Laboratorio con Kits	1	\$115.000	\$2.300.000
Compresor de aire	1	\$85.000	\$1.700.000
Carro tanque con la flauta para disposición a zona de riego	1	\$2.100.000	\$42.000.000
Frac Tanks (1xagua a entregar y 1X agua para tratamiento)	2	\$240.000	\$4.800.000
Análisis de laboratorio externo para certificación de Ica	1	\$75.000	\$1.500.000
Generador con tanque de Diesel y Suinistro de Diesel	1	\$1.580.000	\$31.600.000
Mangueras y accesorios	1	\$75.000	\$1.500.000
Químicos (Uso estimado del 10% con respecto al tratamiento convencional)	10%	\$591.368	\$11.827.350
Costo de operación mensual (electrocoagulación)	1	\$155.392	\$3.107.832
	Costo total de operación mensual con electrocoagulación=		\$105.395.182

Fuente: Elaboración propia con parte de datos proporcionados por la empresa HOLSAN S.A.S.

En conclusión, en términos de costos de acuerdo al análisis realizado y en comparación con los costos totales de operación con cada una de las tecnologías; empezando con el método de coagulación-floculación convencional tiene un costo de operación mensual de \$208'733.500, con respecto al costo mensual de operación con el método de electrocoagulación por un valor de \$105'395.182, lo que representa una reducción de un poco más del 50% en los costos de operación que asume la empresa HOLSAN S.A.S. al realizar el tratamiento de aguas residuales contaminadas con hidrocarburos.

De acuerdo a dichos valores, se considera pertinente evaluar la posibilidad de implementar la tecnología de electrocoagulación, teniendo en cuenta que en el método convencional gran parte de los costos se atribuyen al elevado uso de químicos requeridos para cada tratamiento.

8. RECOMENDACIONES TÉCNICAS

Según el subproducto de lodos obtenido a partir del tratamiento de aguas residuales contaminadas por hidrocarburos, realizado por medio de electrocoagulación; por lo general, los lodos producidos mediante este método se denominan lodos estabilizados y se utilizan en su mayoría como fertilizantes. Se sugiere investigar a fondo la composición de los lodos obtenidos en el tratamiento estudiado a lo largo de este proyecto, con el fin de identificar los posibles tratamientos posteriores que se les puede dar a dichos subproductos.

Si la empresa HOLSAN S.A.S. requiriera por algún motivo cumplir con la normatividad ambiental legal vigente, ya sea para un permiso de vertimientos, o darle algún otro uso al agua residual posteriormente tratada por electrocoagulación se tendrían que entrar a evaluar pre o pos-tratamientos para los parámetros que no cumplen la norma; se sugiere por ejemplo el pre-tratamiento biológico UASB que ayuda a disminuir en gran medida la DBO5 y la DQO, y el AFR para disminuir la cantidad de grasas, aceites e hidrocarburos (BIOPAQ, 2022).

Se recomienda a nivel industrial, utilizar un tanque horizontal con medidas: 190 cm de largo*150 cm de ancho*190 cm de profundidad; con una capacidad de 3.000 L considerando que de esta forma, para tratar los 23.850L/día o aproximadamente $24m^3$ /día se requiere un total de 8 tratamientos que se realizan en un tiempo de 6 horas.



Imagen No. 21: Tanque para tratamiento de aguas residuales con capacidad de 3.000L

Fuente: DENIOS.

En cuanto a los electrodos, considerando que se tiene dos de sacrificio o negativos en hierro y dos positivos en aluminio; algo que se pudo observar mediante las pruebas realizadas es que los electrodos que más se gastan son los de aluminio. Las medidas de los electrodos para un tanque de 3.000L como el representado anteriormente son 165cm de largo* 150cm de ancho, se recomienda que las láminas a utilizar sean de calibre 12,

es decir, que tengan 2,5cm de espesor; con el fin de garantizar mayor durabilidad en los procesos de tratamiento.

Utilizando este tipo de láminas los electrodos que más se gastan (Al) se tendrían que cambiar cada mes y medio aproximadamente, tiene un costo aproximado de \$720.000 y las de hierro se cambian aproximadamente cada 2 meses con un costo de \$480.000, estos valores se obtuvieron de acuerdo con el promedio de las cotizaciones realizadas.

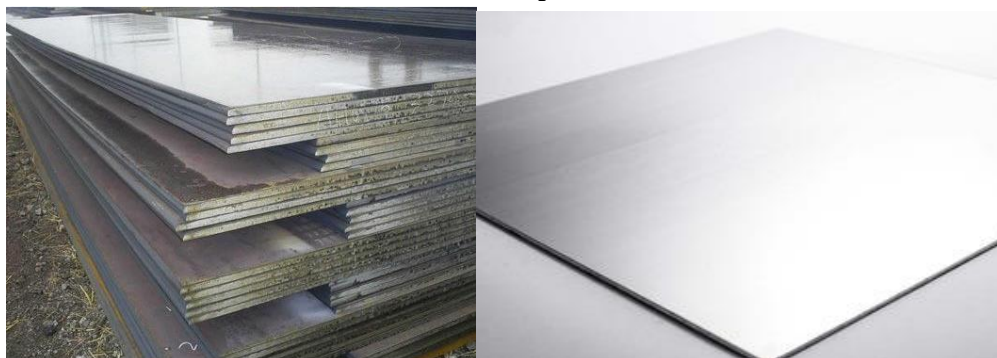


Imagen No. 22 y 23: Láminas de hierro y aluminio con 2,5 cm de espesor.

Fuente: Imágenes de Google.

Por otro lado, se recomienda sumergir los electrodos en un máximo del 75% de su altura, con el fin de evitar que haya contacto con los caimanes que se conectan a los electrodos, y a su vez el riesgo de un corto circuito. Esto podría suceder debido a la alta formación de espuma, que se presenta por la carga de contaminantes orgánicos y grasos que contienen las aguas a tratar en gran proporción.

Adicionalmente, para retirar los lodos del agua tratada se sugiere el uso de una tolva industrial para filtrar el agua tratada y posteriormente un filtro de carbón activado; con el fin de terminar de clarificar el agua en cuanto a olor y color. Aunque el agua tratada no tiene un destino final específico para todos los procesos, la empresa HOLSAN S.A.S. la destina según el cliente lo indique, se puede utilizar para reinyección en los procesos industriales, aspersión en vías para disminuir los niveles de material particulado, lavado de máquinas, entre otros; lo que significa que depende el destino del agua tratada debe cumplir la Resolución 631 de 2015, que regula los niveles máximos permisibles para disposición en cuerpos de agua o la Resolución 1207 de 2014 que regula los niveles permisibles para aguas residuales con destino a suelos.

9. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los ensayos realizados y los resultados obtenidos para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la explotación de hidrocarburos, se determinó que la combinación de electrodos en paralelo y con materiales de Hierro-Aluminio, es la mejor en cuanto a eficiencia de remoción comparada con la turbidez del agua antes de tratar y al final de tiempo de residencia. Por esta razón, se generó una mejor reacción de los

electrodos dentro del reactor, que se manifestó con la formación de burbujas alrededor de las placas.

- Durante el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales industriales provenientes de la explotación de hidrocarburos, la mayor eficiencia de remoción obtenida con respecto a la Turbidez, se obtuvo bajo las siguientes condiciones: combinación de cuatro electrodos ubicados en paralelo (2 de hierro, 2 de aluminio), distancia entre electrodos de 2 cm, pH inicial de 8, intensidad de corriente de 2A y tiempo de residencia de 45 minutos; variables determinantes en la eficiencia del procesos electrolítico, debido a que generaron la mejor reacción y a su vez en la parte final de la filtración se obtuvo la menor turbidez.
- Utilizando una distancia de 2 cm entre los electrodos dentro del reactor se obtuvo el mayor porcentaje en la eficiencia de remoción de contaminantes, teniendo en cuenta que al estar un poco más separados los electrodos, se evita la saturación de espuma en la parte superior del reactor y a su vez previene el riesgo de generar un corto energético si llegara a tocar los caimanes.
- La implementación de un tanque en el proceso de tratamiento de agua residual proveniente de la explotación de hidrocarburos con un volumen de agua de 3000 L/d para realizar 8 tratamientos en 6 horas al día, es viable porque presenta una alta eficiencia de remoción y una considerable reducción en el uso de químicos y el tiempo de remoción es relativamente bajo con respecto al consumo de energía.
- Los costos de operación son relativamente bajos, debido a que el tiempo de residencia es relativamente corto, a nivel industrial se sugiere el uso de placas de calibre 12 con un espesor de 2,5 cm; con el fin de garantizar mayor durabilidad en los electrodos de sacrificio.
- Según los análisis de laboratorio del agua sin tratar y la tratada en el mejor ensayo, aunque no se obtuvo una remoción total de todos los parámetros; es importante resaltar que se tuvo una reducción considerablemente alta de la mayoría de éstos. Sin embargo, habría que entrar a evaluar el comportamiento de aquellos parámetros que, en vez de disminuir, aumentaron como los cloruros, fosfatos, sulfatos, sólidos disueltos y conductividad.
- En la comparación de los análisis obtenidos del agua tratada por Holsan S.A.S. con coagulación-floculación convencional, y los tratados en los ensayos de laboratorio por medio de electrocoagulación; se deduce que teniendo en cuenta que el agua tratada a escala de laboratorio venía mucho más contaminada. Se tiene una mejor remoción de la mayor parte de los contaminantes en el agua tratada con el método de electrocoagulación; a su vez, principalmente se destaca la reducción de la DQO que en el tratamiento convencional generó un aumento de 1.806mg/L a 2.433mg/L. Además, la turbidez que se usó en todo el documento como variable determinante o dependiente,

en el agua tratada por electrocoagulación se obtuvo una reducción de 257 NTU a 3,4 NTU; por otro lado, en el método convencional disminuyó de 217 NTU a 8,520 NTU indicando que por medio del tratamiento de electrocoagulación si se obtiene una mayor eficiencia de remoción de contaminantes mayor en comparación con el método convencional utilizado actualmente por la empresa.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, M. (2001). Calidad del agua-Determinación de cloro libre y cloro total-Método de prueba (Cancela a la NMX-AA108-1992). *Secretaría de economía-Estados Unidos Mexicanos*. Recuperado de: <https://aniq.org.mx/pqta/pdf/NMX-AA-quimicosgpo2.pdf>

América. (2019). *Tratamiento de aguas residuales*. América (rentaunsanitario.com). Recuperado de: <https://rentaunsanitario.com/tratamiento-de-aguas-residuales/#:~:text=TRATAMIENTO%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20El%20tratamiento%20de%20aguas,es%20conocido%20tambi%C3%A9n%20como%20%E2%80%9Cd%20epuraci%C3%B3n%20de%20aguas%20residuales%E2%80%9D>.

Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación Vol. 2, No. 1*. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>

Arango, A. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Revista producción + limpia Vol. 7, No. 1*. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000100006

Arango, A. & Garcés, L. (2009). Influencia en la conductividad eléctrica en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia Vol. 4, No. 2*. Recuperado de: <http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/550/1/53-64.pdf>

Barrera, C., Cañizares, P., Fernández, J., Natividad, R. & Rodrigo, M.A. (2014). Electrochemical Advanced Oxidation Processes: An Overview of the Current Applications to Actual Industrial Effluents. *Journal of the Mexican Chemical Society Vol. 58, No. 3*. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-249X2014000300003

BIOPAQ. (2022). Tecnologías paques para tratamiento de aguas residuales industriales. PAQUES. Recuperado de: https://es.paques.nl/productos/featured/tratamiento-de-aguas-residuales-industriales?gclid=CjwKCAjwm8WZBhBUEiwA178UnPJF9zIVnbtqxEXnwuTZE02XabgPLh1Y_DKje86xQpsxQOA3Qv1LaRoCkS0QA vD_BwE

Bolaños, A. (2018). La importancia de la turbidez instrumental. *Product Manager de Fotometría-Turbidez de HANNA INSTRUMENTS*. Recuperado de: <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/que-nos-dice-la-turbidez-sobre-la-calidad-del-agua-potable>

Briseño, G. (2018). *Recursos Hídricos*. Euston. Recuperado de: <https://www.euston96.com/recursos-hidricos/>

Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology Vol. 38(1)*, p.p. 11-41. doi:10.1016/j.seppur.2003.10.00

Curi, A., Granda, W., Lima, H., Sousa, W. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Medio Ambiente Vol. 17, No. 6*. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017

Elham, K., Somayeh, Y., & Mohammad, K. (2011). An investigation on the new operational parameter effective in Cr(VI) removal efficiency. A study on electrocoagulation by alternating pulse current. *Journal of Hazardous Materials*, 190, 119-124.

EMSA. (2022). Tarifas de energía, subsidios y contribuciones del mercado regulado del Departamento del Casanare y estructura del costo unitario del servicio. *Electrificadora del Meta S.A.* Recuperado de: https://www.electrificadoradelmeta.com.co/newweb/wp-content/uploads/Arbol_Tarifario_202205__CASANARE_page-0001.jpg

Hach Lange. (2010). Eliminación y determinación de fosfato. *Interempresas*. Recuperado de: <https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/37743-Eliminacion-y-determinacion-de-fosfato.html>

HANNA INSTRUMENTS. (2020). ¿Por qué medir la alcalinidad en el agua potable? *HANNA INSTRUMENTS*. Recuperado de: <https://hannainst.com.mx/blog/por-que-medir-la-alcalinidad-en-el-agua-potable/>

Hernández, A. (2017). Determinación de sólidos suspendidos totales en agua secados a 103-105°C. *IDEAM*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>

Hidritec. (2016). *Tratamiento de Aguas Residuales y disminución de DQO*. Hidritec. Recuperado de: <http://www.hidritec.com/hidritec/tratamiento-de-aguas-residuales-y-disminucion-de-dqo>

Holt, P., Barton, G. & Mitchell, C. (2005). The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. *Chemosphere Vol. 59*, p.p. 355-367. DOI:10.1016/j.chemosphere.2004.10.023

Manchego, I. & Zabala, G. (2019). Implementación de un electrocoagulador a escala de laboratorio que permita la remoción de arsénico en el agua. *Universidad Santo Tomás*. Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/19479/2019ivanmanchego?sequence>

Mazille, F. & Spuhler, D. (2020). *Coagulación, floculación y separación*. Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox. Recuperado de: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/coagulaci%C3%B3n-floculaci%C3%B3n-y-separaci%C3%B3n#:~:text=La%20coagulaci%C3%B3n-floculaci%C3%B3n%20es%20una%20t%C3%A9cnica%20que%20de%20tratamiento,de%20mejorar%20su%20capacidad%20de%20eliminaci%C3%B3n%20de%20part%C3%ADculas>.

Mollah, M., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J., Cocke, D. (2004). *Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation*. DOI:10.1016/J.JHAZMAT.2004.08.009

Mollah, M., Schennach, R., Parga, J., Cocke, D. (2001). *Electrocoagulation (EC)-Science and Applications*. doi: 10.1016/S0304-3894(01)00176-5

Parga, J., Vásquez, V. & Moreno, H. (2009). Thermodynamic Studies of the Arsenic Adsorption on Iron Species Generated by Electrocoagulation. *Journal of Metallurgy Vol. 2009*. doi:10.1155/2009/286971

Valdivia, L. (2013). Electrocirugía. *Dermatol Peru Vol. 23 (I)*. Recuperado de: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/dermatologia/v23_n1/pdf/a02v23n1.pdf

Zarza, L. (2017). *¿Qué son las aguas residuales?* Iagua. Recuperado de: <https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-residuales>

11. ANEXOS

11.1. Análisis de laboratorio para el agua residual sin tratar:



Código: FLAB-07
VERSION: 8
Fecha: 2021/03/11

INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Holsan Sas
Dirección:	cr 22 A # 151-81
Nit:	800,072,137
Contacto:	Camilo Mejia
Teléfono:	3132893017
E: mail:	control@holsan.co
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/ Bogotá

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	4795
Matriz:	ARnD
Responsable de Muestreo:	cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	NA
Procedimiento de Muestreo:	SM 1060 B, C
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	07/07/2022 10 am
Fecha y Hora de Recep:	14/07/2022 08:55 am
Lugar de Muestreo:	agua sin tratar pozo aguazul casanare
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogota
Fecha de Análisis	14/07/2022 a 23/07/2022

Resultado Analisis			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Aceites y Grasas	SM 5220 B	mg/L	342
Alcalinidad total	SM 2320 B	mg/L	1000
arsenico	SM 3111 B	mg/L	<0,01
cadmio	SM 3111 B	mg/L	<0,01
Calcio	SM 3500 Ca D	mg/L	40
Cromo	hach 8025	mg/L	0,12
cloruros	SM 4500 Cl B	mg/L	3099
Color	SM 2120 C	PtCo	23400
conductividad	SM 2310 B	us/cm	930
DQO	SM 5220 D	mg/L	4700
DBO5	SM 5210 B	mg/L	2999
Dureza total	SM 2340 C	mg/L	900
fenoles	hach 8047	mg/L	0,12
fosfatos	SM 4500 P D	mg/L	<0,1
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	mg/L	342
Hierro	SM 3111 B	mg/L	10,5
Magnesio	SM 3111 B	mg/L	208
oxigeno disuelto	SM 4500 O G	mg/L	0,13
pH	SM 4500 H B	unidades	7,07
Plomo	SM 3111 B	mg/L	<0,01
Selenio	hach 8194	mg/L	<0,01
solidos disueltos totales	SM 2540 D	mg/L	970
solidos suspendidos totales	SM 2540 D	mg/L	389
sulfatos	SM 4500 SO4 E	mg/L	110
temperatura	SM 2550 B	°C	18,8
turbiedad	SM 2130 B	NTU	257
zinc	hach 8009	mg/L	4,7

S.M.: Standard Methods 2005 21st, N.A.: No Aplica, N.E. No Especifica

OBSERVACIONES:

El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

Nelson Fernandez Barrero

Cel: 3124015696 - 3143552939
23/07/2022



Calle 87 No. 49-21
Bogotá - Colombia
D:\Documents\2022\2. informes\4795 holsan jul23

Comercial@imasas.com

1

Imagen No. 24: Análisis de laboratorio para el agua residual sin tratar.

Fuente: Laboratorio ima.

11.2. Análisis de laboratorio para el agua residual tratada:



Código: FLAB-07
VERSION: 8
Fecha 2021/03/11

INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Holsan Sas
Dirección:	cr 22 A # 151-81
Nit:	800,072,137
Contacto:	Camilo Mejia
Teléfono:	3132893017
E: mail:	control@holsan.co
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/ Bogotá

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	4796
Matriz:	ARnD
Responsable de Muestreo:	cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	NA
Procedimiento de Muestreo:	SM 1060 B, C
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	11/07/2022 3:00 pm
Fecha y Hora de Recep:	14/07/2022 08:55 am
Lugar de Muestreo:	agua tratada pozo aguazul casanare
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogota
Fecha de Análisis	14/07/2022 a 23/07/2022

Resultado Analisis			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Aceites y Grasas	SM 5220 B	mg/L	25
Alcalinidad total	SM 2320 B	mg/L	700
arsenico	SM 3111 B	mg/L	<0,01
cadmio	SM 3111 B	mg/L	<0,01
Calcio	SM 3500 Ca D	mg/L	40
Cromo	hach 8022	mg/L	0,034
cloruros	SM 4500 Cl B	mg/L	12993
Color	SM 2120 C	PtCo	720
conductividad	SM 2310 B	us/cm	5700
DQO	SM 5220 D	mg/L	1518
DBO5	SM 5210 B	mg/L	610
Dureza total	SM 2340 C	mg/L	270
fenoles	hach 8047	mg/L	0,72
fosfatos	SM 4500 P D	mg/L	33873
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	mg/L	25
Hierro	SM 3111 B	mg/L	0,56
Magnesio	SM 3111 B	mg/L	55
oxigeno disuelto	SM 4500 O G	mg/L	0,15
pH	SM 4500 H B	unidades	6,99
Plomo	SM 3111 B	mg/L	<0,01
Selenio	hach 8194	mg/L	<0,01
solidos disueltos totales	SM 2540 D	mg/L	2770
solidos suspendidos totales	SM 2540 D	mg/L	96
sulfatos	SM 4500 SO4 E	mg/L	308
temperatura	SM 2550 B	°C	18,8
turbiedad	SM 2130 B	NTU	3,4
zinc	hach 8009	mg/L	1,36

OBSERVACIONES:
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

Holsan Sas

Nelson Fernandez Barrero
Director Laboratorio TP 4482 CPIQ
Cel:3124015696 - 3143552939
23/07/2022



Calle87 No. 49-21
Bogota - Colombia

D:\Documents\2022\2. informes\4796 holsan jul23

Comercial@imasas.com

1

Imagen No. 25: Análisis de laboratorio para el agua residual tratada.

Fuente: Laboratorio ima.

11.3. Análisis de laboratorio para el agua residual tratada por coagulación-floculación convencional:



INFORME DE ENSAYO



Nº de Referencia: A-20/019535	Tipo Muestra: Agua Residual Industrial
Descripción(*): PUNTO 2 AGUA TRATADA	Fecha Fin: 07/03/2020

RESULTADOS ANALITICOS				
Parámetro	Resultado	Unidades	Incert	CMA
Mediciones In Situ				
Conductividad Eléctrica In Situ Medido MA	2.700	µS/cm	-	
Oxígeno Disuelto In Situ Medido MA	15,0	mg/L	-	
pH In Situ Medido MA	6,7	Unidades de pH	-	
Temperatura In Situ Medido MA	27,6	°C	-	
Parámetros Físico-Químicos				
Aceites y Grasas	< 4,0	mg/L	±0,04%	
Alcalinidad Total	< 5,00	mg/L CaCO ₃	±0,036%	
Color Verdadero	< 5,00	Pt/Co	±0,069%	
DBO ₅	446	mg/L	±0,159%	
DQO	2.433	mg/L	±0,028%	
Dureza Total	232	mg/L	±0,052%	
Sólidos Totales Disueltos	1.674	mg/L	±0,012%	
Sólidos Totales en Suspensión (TSS)	13,00	mg/L	±0,0124%	
Turbidez	8,520	NTU	±0,0146%	
Aniones -				
Cloruros	554	mg/L	±0,01%	
Fosfatos	< 0,100	mg/L	±0,018%	
Sulfatos	158	mg/L	±0,012%	
Metales Totales				
Arsénico Total	< 0,040	mg/L	±0,028%	
Cadmio Total	< 0,010	mg/L	±0,02%	
Calcio Total	77,1	mg/L	±0,031%	
Cromo Total	< 0,050	mg/L	±0,026%	
Hierro Total	0,914	mg/L	±0,029%	
Magnesio Total	6,40	mg/L	±0,018%	
Plomo Total	< 0,050	mg/L	±0,028%	
Selenio Total	< 0,010	mg/L	±0,02%	
Zinc Total	0,340	mg/L	±0,019%	
Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales	< 4,000000	mg/L	±0,0366%	
Compuestos Fenólicos				
Fenoles	< 0,100	mg/L	±0,034%	

Nota: Los Resultados de este informe solo afectan a la muestra tal como es recibida en el laboratorio. Queda prohibida la reproducción parcial de este informe sin la aprobación por escrito del laboratorio. Las incertidumbres de los parámetros acreditados están calculadas y a disposición del cliente. AGQ no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, asociada a la toma de muestras y a otros datos descriptivos, marcados con (*). A: Ensayo subcontratado y acreditado. N: Ensayo subcontratado y no acreditado. RE: Recuento en placa estimado. La Incertidumbre aplicada al resultado no aplica para valores menores al Límite de Cuantificación (LC).

(9) Parámetro Acreditado por IDEAM

(*) Parámetro No Acreditado por IDEAM

Imagen No. 26: Análisis de laboratorio para el agua residual tratada por coagulación floculación convencional.

Fuente: Laboratorio AGQ.

11.3. Análisis de laboratorio para el agua residual sin tratar por coagulación-floculación convencional:



INFORME DE ENSAYO



Nº de Referencia: A-20/019534
Descripción(*): PUNTO 1 AGUA SIN TRATAR

Tipo Muestra: Agua Residual Industrial
Fecha Fin: 07/03/2020

RESULTADOS ANALITICOS

Parámetro	Resultado	Unidades	Incert	CMA
Mediciones In Situ				
Conductividad Eléctrica In Situ Medido MA	2.156	µS/cm	-	
Oxígeno Disuelto In Situ Medido MA	0,780	mg/L	-	
pH In Situ Medido MA	8,1	Unidades de pH	-	
Temperatura In Situ Medido MA	26,0	°C	-	
Parámetros Físico-Químicos				
Aceites y Grasas	151	mg/L	±0,04%	
Alcalinidad Total	294	mg/L CaCO ₃	±0,036%	
Color Verdadero	248	Pt/Co	±0,069%	
DBO ₅	787	mg/L	±0,159%	
DQO	1.806	mg/L	±0,028%	
Dureza Total	225	mg/L	±0,052%	
Sólidos Totales Disueltos	1.750	mg/L	±0,012%	
Sólidos Totales en Suspensión (TSS)	933,3	mg/L	±0,0124%	
Turbidez	217,0	NTU	±0,0146%	
Aniones -				
Cloruros	344	mg/L	±0,01%	
Fosfatos	6,30	mg/L	±0,018%	
Sulfatos	30,3	mg/L	±0,012%	
Metales Totales				
Arsénico Total	< 0,040	mg/L	±0,028%	
Cadmio Total	< 0,010	mg/L	±0,02%	
Calcio Total	63,8	mg/L	±0,031%	
Cromo Total	< 0,050	mg/L	±0,026%	
Hierro Total	3,83	mg/L	±0,029%	
Magnesio Total	4,95	mg/L	±0,018%	
Plomo Total	< 0,050	mg/L	±0,028%	
Selenio Total	0,010	mg/L	±0,02%	
Zinc Total	0,223	mg/L	±0,019%	
Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales	88,81475	mg/L	±0,0366%	
Compuestos Fenólicos				
Fenoles	2,12	mg/L	±0,034%	

Nota: Los Resultados de este informe solo afectan a la muestra tal como es recibida en el laboratorio. Queda prohibida la reproducción parcial de este informe sin la aprobación por escrito del laboratorio. Las incertidumbres de los parámetros acreditados están calculadas y a disposición del cliente. AGQ no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, asociada a la toma de muestras y a otros datos descriptivos, marcados con (*). A: Ensayo subcontratado y acreditado. N: Ensayo subcontratado y no acreditado. RE: Recuento en placa estimado. La Incertidumbre aplicada al resultado no aplica para valores menores al Límite de Cuantificación (LC).

(9) Parámetro Acreditado por IDEAM

(*) Parámetro No Acreditado por IDEAM

AGQ PRODYCON COLOMBIA SAS

Calle 153A 7H-72 Bogotá, Cundinamarca, Colombia

T: (+57)6715110

F: PCO-201/01 Ver4 clientescolombia@agqlabs.com

agqlabs.com

2/5

Imagen No. 27: Análisis de laboratorio para el agua residual tratada por coagulación floculación convencional.

Fuente: Laboratorio AGQ