

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL GENERADA EN UN LABORATORIO DE ANALISIS  
FISICOQUIMICO.

ALEJANDRO FLÓREZ SÁNCHEZ  
EDUARDO PABON RENGIFO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2020

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL GENERADA EN UN LABORATORIO DE ANALISIS  
FISICOQUIMICO.

ALEJANDRO FLOREZ SANCHEZ  
EDUARDO PABON RENGIFO

Proyecto integral de grado para optar por el título de  
INGENIERO QUÍMICO

Director

Guillermo Chacón R.

Especialista en Ingeniería Ambiental y Sanitaria

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C

2020

Nota De Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Juan Camilo Cely

---

Ing. Juan Sandoval

Bogotá, D.C. Julio de 2020.

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA**

Consejero Institucional

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dra. MARIA CLAUDIA APONTE GONZALES**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

Decano Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI**

Director del Programa de Ingeniería Química.

**Ing. IVAN RAMIREZ MARIN**

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **DEDICATORIA**

Primero gracias a Dios por brindarme salud y vida para culminar esta etapa, a mis padres por su amor, apoyo incondicional y por inculcarme los valores que reflejan la persona que soy hoy. A mi familia por su acompañamiento y mi novia por ser un pilar importante en esta etapa final.

Este trabajo de grado es dedicado a mi primo Arley Camilo Salamanca Rengifo (Q.D.E.P), quien fue la primera persona en motivarme al enterarse de esa nueva etapa que decidía emprender.

Por ultimo agradezco a mis amigos y a todos aquellos que compartieron en esta etapa de mi vida.

*Eduardo Pabón Rengifo*

A mis padres que me han apoyado todo Este tiempo, a mi hermano por su Paciencia, a mi nana por su inmenso cariño A todos aquellos que desde los inicios De este proyecto nos han apoyado Inmensamente.

*Alejandro Flórez Sánchez*

## AGRADECIMIENTO

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La empresa, por su aporte técnico y financiero en todas las etapas de desarrollo del proyecto y acompañamiento continuo.

**Especialista en Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Guillermo E. Chacón R**, por su confianza, oportunidad, tiempo, experiencia en esta área, conocimientos compartidos, paciencia con cada uno de nosotros, por su compromiso con el trabajo y colaboración en la dirección y supervisión del presente proyecto.

**Administradora. Martha Lucia Portilla**, por el espacio, recursos y la información brindada en sus instalaciones para la realización del proyecto.

A los orientadores **Ing. Edgar Fernando Moreno Torres** y **Ing. José Luis Salazar López** por su disposición, consejos y tiempo dedicado para la culminación de este proyecto.

A las directivas, Cuerpo Docente, Personal Administrativo de la Universidad América por brindar las herramientas académicas necesarias para poder terminar de manera satisfactoria el proyecto de grado.

A todas las personas que consciente o inconscientemente han colaborado y acompañado en este tiempo, su apoyo y confianza depositada, se ven reflejados en este trabajo.

## CONTENIDO

	Pág
<b>INTRODUCCION</b>	<b>18</b>
<b>1. MARCO TEORICO</b>	<b>20</b>
<b>1.1 AGUA RESIDUAL</b>	<b>20</b>
1.1.1 Características del agua residual	20
1.1.2 Clasificación de aguas residuales	25
<b>1.2 TRATAMIENTOS DE AGUAS</b>	<b>25</b>
1.2.1 Sistemas de tratamiento	26
1.2.1.1 Sistema de tratamiento de agua residual por tipo de proceso	26
1.2.1.2 Sistema de tratamiento de agua residual por grado de tratamiento	26
<b>1.3 NORMATIVIDAD</b>	<b>29</b>
<b>2. GENERALIDADES</b>	<b>30</b>
<b>2.1 BALANCE HÍDRICO</b>	<b>30</b>
2.1.1 Redes de Agua	31
2.1.2 Consumo de agua	31
2.1.3 Entrada de las muestras de agua	32
2.1.4 Consumo en el laboratorio	33
2.1.5 Consumo de agua residual no doméstica	33
2.1.6 Consumo de agua residual doméstica	37
<b>3. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL</b>	<b>39</b>
<b>3.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL</b>	<b>39</b>
<b>3.2 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE LABORATORIO</b>	<b>44</b>
3.2.1 Neutralización	44
3.2.2 Coagulación y floculación	44
3.2.3 Electrocoagulación	45
3.2.4 Lodos activados	47
3.2.5 Ozonificación	48
<b>3.3 MATRIZ DE SELECCIÓN</b>	<b>49</b>
<b>4. ESPECIFICACIÓN TECNICA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL</b>	<b>55</b>
<b>4.1 ESTADO DEL ARTE</b>	<b>55</b>
<b>4.2 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS</b>	<b>74</b>
4.2.1 Tanque de neutralización	74

4.2.2 Tanque de electrocoagulación	76
<b>5. ANÁLISIS DE COSTOS</b>	<b>81</b>
<b>5.1 COSTOS DE INVERSIÓN</b>	<b>81</b>
<b>5.2 COSTOS OPERATIVOS</b>	<b>83</b>
5.2.1 Costo del neutralizador	83
5.2.2 Costo energético del electro coagulador	83
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>88</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	<b>89</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>100</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Propiedades físicas del agua y su origen	21
Tabla 2. Constituyentes químicos orgánicos e inorgánicos del agua y su origen.	21
Tabla 3. Constituyentes biológicos y su origen.	23
Tabla 4. Contaminantes Importantes para el tratamiento de agua residual.	24
Tabla 5. Clasificación de tratamientos de aguas residuales	28
Tabla 6. Día de lavado	34
Tabla 7. Jornada de trabajo normal	36
Tabla 8. Caracterización del agua y comparación con la resolución 0631 de 2015	40
Tabla 9. Escala de valoración de la eficiencia de remoción	49
Tabla 10. Escala de valoración para la generación de residuos.	50
Tabla 11. Escala de valoración para el espacio requerido	50
Tabla 12. Escala de valoración para la operatividad	51
Tabla 13. Escala de valoración para los costos de implementación	51
Tabla 14. Porcentajes de relevancia	52
Tabla 15. Matriz de selección de alternativa de tratamiento	53
Tabla 16. Estado del arte	67
Tabla 17. Costos directos constantes	81
Tabla 18. Costos de los electrodos	82
Tabla 19. Costos indirectos	82
Tabla 20. Costos de inversión	83

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
Figura 1. Rendimientos medios de depuración.	28
Figura 3. Red de aguas del laboratorio	31
Figura 3. Tratamiento de Coagulación y Floculación	45
Figura 4. Tratamiento Electrocoagulación	46
Figura 5. Tratamiento lodos activados	47
Figura 6. Tratamiento ozonificación	48
Figura 7. PFD sistema de tratamiento	54
Figura 8. Sistema de tratamiento para la eliminación de gotas de aceite	61
Figura 9. Dimensiones del tanque de electrocoagulación	76
Figura 10. Dimensiones de los electrodos	77
Figura 11. Dimensiones de los electrodos corregida	78
Figura 12. Esquema del electrocoagulador	79

## LISTA DE GRÁFICOS

	<b>Pág</b>
Gráfico 1. Consumo de agua del laboratorio, año 2019	32
Gráfico 2. Aforo in situ caja de inspección laboratorio	35
Gráfico 3. Aforo 2 in situ caja de inspección laboratorio	37

## LISTA DE ECUACIONES

	<b>Pág</b>
<i>Ecuación 1. Caudal total del agua de consumo</i>	32
<i>Ecuación 2. Entrada de muestras de agua</i>	33
<i>Ecuación 3. Día de lavado</i>	35
<i>Ecuación 4. Día de trabajo normal.</i>	37
<i>Ecuación 5. Diámetro del equipo</i>	74
<i>Ecuación 6. Potencia</i>	75
<i>Ecuación 7. Longitud del tanque</i>	76
<i>Ecuación 8. Altura de los electrodos</i>	77
<i>Ecuación 9. Número de electrodos</i>	78
<i>Ecuación 10. Costo energético</i>	84
<i>Ecuación 11. Energía consumida</i>	84

## **ABREVIATURAS**

**ARD:** Agua residual doméstica.

**ARND:** Agua residual no doméstica.

**DBO:** Demanda bioquímica de oxígeno.

**DQO:** Demanda química de oxígeno.

**pH:** Potencial de hidrogeno.

**PMMA:** Polimetilmetacrilato

**TA:** Agentes tenso activos

## GLOSARIO

**AGENTES TENSO ACTIVOS:** son sustancias que presentan actividad en la superficie, reduciendo la tensión superficial del líquido en el que esta disuelto o bien la tensión superficial de la interfase si existe otra fase presente. Para que una sustancia sea TA se requiere que contenga dos grupos: uno polar o hidrófilo y otro no polar o hidrófobo.<sup>1</sup>

**AGUA SINTÉTICA:** se define como agua sintética a la mezcla de agua y sustratos con la finalidad de obtener concentraciones conocidas de contaminantes como DBO, DQO, Nitrógeno y Fósforo.<sup>2</sup>

**ÁNODO:** es conocido como el electrodo responsable de la reacción de oxidación de los elementos. La polaridad del ánodo puede ser positiva o negativa, esta varía dependiendo del dispositivo, por ejemplo, para un dispositivo que consume energía el ánodo es positivo mientras que para un dispositivo que proporciona energía el ánodo es negativo<sup>3</sup>.

**CARACTERIZACIÓN:** se define como la evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos del agua.

**CÁTODO:** es conocido como el electrodo que se conecta al polo negativo en una fuente de poder recibe los electrones perdidos del ánodo generando que la materia reduzca su estado de oxidación<sup>4</sup>.

**DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO:** Se denomina así a la cantidad de oxígeno requerida por microorganismos para oxidar aeróbicamente residuos orgánicos presentes en la muestra de agua.<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup> APLICACIÓN INDUSTRIAL. AGENTES TENSOACTIVOS “ATA” O SURFACTANTES “S” Y SU.

<sup>2</sup> Emilio Serrano. Preparación de agua residual sintética. [En línea]. Aguasresiduales.info. [Consultado: Ago 10, 2020]. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/expertos/tus-consultas/preparacion-de-agua-residual-sintetica-VYAgl#:~:text=Este%20cliente%20para%20determinar%20el,se%20le%20denomina%20aguas%20sint%C3%A9ticas.>

<sup>3</sup> EcuRed. Ánodo. [Consultado el 8-agosto-2020]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/%C3%81nodo>

<sup>4</sup> Wikiwand. [Consultado el 8-agosto-2020]. Disponible en: <http://www.wikiwand.com/es/Cátodo>

<sup>5</sup> RAFFO LECCA, Eduardo y RUIZ LIZAMA, Edgar. Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*. 2014, vol. 17, nro. 1. pp. 71-80 Eduardo Raffo Lecca and Edgar Ruiz Lizama. "Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno." *Industrial Data* 17.1 (2014): 71-80. Web.

**DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO:** Es la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua, mediante agentes oxidantes temperatura y tiempo.<sup>6</sup>

**DENSIDAD DE CORRIENTE:** es la relación entre la intensidad de corriente por unidad de área, esta representa la cantidad de corriente en un punto dentro de un conductor eléctrico además se representa en forma de vector y tiene su dirección es según la corriente<sup>7</sup>.

**ELECTROCOAGULACIÓN:** proceso no convencional de tratamiento de agua que consiste en la desestabilización de las sustancias contaminantes por medio de inducir corriente eléctrica en una celda que contiene el agua a tratar y los electrodos (ánodo y cátodo) permitiendo la reacción de oxidación<sup>8</sup>.

**ELECTRODO:** son los conductores que se utilizan para mantener en contacto el sistema de medida con el electrólito (ánodo y cátodo)<sup>9</sup>.

**MATERIA ORGÁNICA REFRACTARIA:** es la materia orgánica que resiste los procesos convencionales de tratamiento de agua como por ejemplo detergentes, pesticidas, agrícolas, etc.<sup>10</sup>

**PATÓGENO:** Cualquier microorganismo que sea capaz de causar enfermedad en un organismo hospedador.<sup>11</sup>

**VERTIMIENTO:** es la descarga controlada de aguas residuales de diferentes orígenes al alcantarillado, estos vertimientos se clasifican según su origen se puede encontrar vertimiento de aguas domésticas y vertimientos de aguas industriales.

---

<sup>6</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales. Demanda Química de Oxígeno por reflujo cerrado y voluntaria. [En línea]. IDEAM. (dic 28,). [Consultado: mar 18, 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

<sup>7</sup> Robles Mendoza Lindsay Karime, López Bueno Andrés Felipe. Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación.

<sup>8</sup> JOHAN SEBASTIAN HERNANDEZ FLOREZ and STEPHANY MEJIA ROA. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA DISMINUIR LA CARGA CONTAMINANTE A ESCALA DE LABORATORIO.

<sup>9</sup> Química y Ciencia. Electrodo. [Consultado el 8-Agosto-2020]. Disponible en: <https://laquimicaylaciencia.blogspot.com/p/glosario-definiciones.html>

<sup>10</sup> cordonchem envitech. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL. [Consultado el 8-Agosto-2020]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/caracterizacion-del-agua-residual/>

<sup>11</sup> Diane Williamson. Interacción hospedador-patógeno y evasión inmunitaria. [En línea]. British society for immunology. [Consultado: Ago 1, 2020]. Disponible en: <https://www.immunology.org/es/public-information/bitesized-immunology/pathogens-and-disease/interacci%C3%B3n-hospedador-pat%C3%B3geno-y>

## RESUMEN

El presente proyecto buscó evaluar una propuesta de sistema de tratamiento de agua residual generada en un laboratorio de análisis fisicoquímicos, para ello se describió el balance hídrico del laboratorio, identificando la cantidad de muestras que ingresan mensualmente equivalentes a 2.2174 m<sup>3</sup> de agua a ser desechada mensualmente y mediante una caracterización de estas aguas residuales generadas se identificaron cuatro parámetros por fuera de los límites permisibles según el artículo 16 de la resolución 0631 del 2015 los cuales fueron DBO (135.1 mg O<sub>2</sub>/L), DQO (319 mg O<sub>2</sub>/L), Sólidos suspendidos totales (202.6 mg/L) y el pH mínimo (2.9).

Se realizó una revisión bibliográfica para identificar posibles opciones de tratamiento y mediante una matriz de selección se determinó la utilización de un sistema de tratamiento para el laboratorio compuesto por un proceso de neutralización y un electrocoagulador, posteriormente se definieron teóricamente los rangos operacionales de funcionamiento de ambos procesos para parámetros como el tiempo de residencia de 5 a 10 minutos para la neutralización y entre 30 y 60 minutos para la electrocoagulación, voltaje de la fuente, uso del Hidróxido de Sodio como neutralizador, uso de electrodos de Hierro y Aluminio, así como el dimensionamiento de ambos equipos requeridos para el manejo de un volumen de agua de 0.5544 m<sup>3</sup> determinando la repetición del tratamiento cuatro veces por día de lavado.

Finalmente, se analizaron los costos tanto de inversión inicial como los operacionales para los rangos mínimo y máximo escogidos presentando un rango de costos generados que van desde los \$19,854,566 Pesos hasta los \$23,285,566 Pesos.

Palabras claves: Agua residual no doméstica, Electrocoagulación, Neutralización, Electroodos de Aluminio y Hierro.

## INTRODUCCION

Los laboratorios de análisis de agua en Colombia manejan gran variedad de aguas industriales a las cuales se les realizan diversas pruebas, cualquier clase de proceso realizado en éste genera residuos que pueden ser perjudiciales para la salud y/o el medioambiente. La resolución 0631 del 2015 de Colombia se encarga, de los vertimientos puntuales de agua residual no doméstica (ARND) al alcantarillado público (artículo 16) y establece el límite máximo permisible de cada uno de los parámetros fisicoquímicos con el objetivo de mitigar los daños que puedan generar estos efluentes.

El laboratorio de análisis fisicoquímicos se encuentra ubicado en la ciudad de Cali, y realiza toda clase de pruebas a aguas en su mayoría de uso doméstico, pero a su vez a aguas residuales no domésticas provenientes de fuentes diversas como hospitales, restaurantes, carnicerías, licorerías, frigoríficos, aguas de rio provenientes de captaciones de cementeras, entre otras. Esta mezcla de aguas de distinta procedencia aumenta la probabilidad de sobrepasar los límites de desecho de algún parámetro, especialmente los biológicos al tratar con fuentes alimenticias, por este motivo se debe verificar la calidad del agua a disponer y diseñar un tratamiento que se adecue a las necesidades del laboratorio, para ello se deben identificar la mayor cantidad de tratamientos que reduzcan los contaminantes específicos que presente el efluente.

El presente proyecto de investigación tendrá una visión de evaluar la calidad de agua en el efluente y si no atiende lo exigido por la normatividad se procederá a desarrollar una propuesta para la disposición de los residuos líquidos en un laboratorio de análisis fisicoquímico por medio de un sistema de tratamiento de agua residual el cual permita disminuir el grado de contaminación de estos efluentes para así, vaciar estos líquidos en el desagüe cumpliendo con la normatividad establecida con el fin de disminuir el impacto ambiental y evitar sanciones legales y/o económicas.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Evaluar una propuesta de un sistema de tratamiento de agua residual industrial generada en un laboratorio de análisis fisicoquímico.

### **Objetivos específicos**

1. Diagnosticar el estado actual del agua residual proveniente del laboratorio.
2. Establecer el sistema de tratamiento para el agua residual mediante un desarrollo teórico.
3. Especificar técnicamente el sistema de tratamiento de agua residual.
4. Estimar los costos derivados de la implementación del sistema de tratamiento de agua.

## 1. MARCO TEORICO

En la actualidad el agua es uno de los recursos más contaminados debido al vertimiento de aguas residuales no tratadas en fuentes hídricas, cuerpos superficiales y alcantarillado, se ha convertido en un gran problema debido a que en el país solo el 48.2% de municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales<sup>12</sup> ; esto presenta un panorama difícil debido a que gran parte del agua residual doméstica e industrial contaminan cuerpos hídricos de agua limpia representando una amenaza para los seres humanos, animales, la flora y la fauna de nuestro país. Por consiguiente, es de suma importancia realizar el tratamiento de aguas residuales en cualquier industria que genere residuos líquidos.

Este capítulo se presenta con el fin de dar una perspectiva mayor del Proyecto, a través de la investigación y consulta bibliográfica se tratarán temas que ayudarán a entrar en contexto y facilitar el entendimiento del mismo, se definirán los tipos de contaminantes y los tratamientos para su remoción de manera general, todo esto basado en la resolución 0631 del 2015.

### 1.1 AGUA RESIDUAL

Se entiende entonces por aguas residuales, aquellas aguas cuya calidad se ha degradado por diferentes usos<sup>13</sup>. Dicho de otra manera, cualquier agua residual lleva consigo una carga contaminante, la cual afecta per se la calidad del cuerpo hídrico receptor, generando condiciones que por la misma razón hacen inaceptable el uso de esta<sup>14</sup>.

**1.1.1 Características del agua residual.** Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica; las tablas 1, 2 y 3, describen dichas características indicando la procedencia de cada uno de los constituyentes.

Las propiedades físicas del agua se describen en la **tabla 1** así como el origen de cada una de ellas. Estas están relacionadas con otras propiedades biológicas y químicas.

---

<sup>12</sup> Venegas Loaiza Andres. Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales. En: 16 DE MARZO DE 2018.

<sup>13</sup> Ecured. RESIDUALES LIQUIDOS. [ Consultado el Oct 1,2019]. Disponible en: [https://www.ecured.cu/Residuales\\_L%C3%ADquidos](https://www.ecured.cu/Residuales_L%C3%ADquidos).

<sup>14</sup> ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. 1999.

Tabla 1. Propiedades físicas del agua y su origen<sup>15</sup>

<b>Características</b>	<b>Origen</b>
<b>Color</b>	En aguas residuales domésticas e industriales por la degradación natural de materia orgánica
<b>Olor</b>	En aguas residuales en descomposición por residuos industriales.
<b>Sólidos</b>	En aguas de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión de suelos, infiltración y conexiones incontroladas.
<b>Temperatura</b>	En aguas residuales domésticas e industriales

Fuente: Elaboración propia

Los constituyentes químicos orgánicos e inorgánicos del agua se describen en la **tabla 2** así como el origen de cada una de ellas. Estas tienen una relación con las propiedades físicas y biológicas.

Tabla 2. Constituyentes químicos orgánicos e inorgánicos del agua y su origen<sup>16</sup>.

<b>Características</b>	<b>Origen</b>
	<b>Orgánicos</b>
<b>Carbohidratos</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
<b>Aceites (grasas animales)</b>	Aguas residuales domésticas, industriales, comerciales y grasas.
<b>Pesticidas</b>	Residuos agrícolas.
<b>Fenoles</b>	Vertidos industriales.
<b>Proteínas</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
<b>Contaminantes prioritarios</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
<b>Agentes tenso activos</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.

<sup>15</sup> Universidad de Salamanca. Características de las aguas residuales. [Consultado el Oct 1, 2019]. Disponible en: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>

<sup>16</sup> Ibid., p. 2.

Tabla 2. (Continuación)

<b>Características</b>	<b>Origen</b>
<b>Orgánicos</b>	
<b>Compuestos orgánicos volátiles</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
<b>Otros</b>	Degradación natural de materia orgánica.
<b>Inorgánicos</b>	
<b>Alcalinidad</b>	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
<b>Cloruros</b>	
<b>Metales pesados</b>	Vertidos industriales.
<b>Nitrógeno</b>	Residuos agrícolas y agua residual doméstica.
<b>pH</b>	Aguas residual doméstica, industrial y comercial.
<b>Fosforo</b>	Aguas residuales domésticas, industrial, comercial y agua de escorrentía.
<b>Contaminantes prioritarios</b>	Aguas residuales domésticas, industrial y comercial.
<b>Azufre</b>	Aguas residuales domésticas, industrial, comercial y agua de suministro.
<b>Gases de sulfuro de hidrogeno</b>	Descomposición de residuos domésticos.
<b>Gases de metano</b>	Descomposición de residuos domésticos.
<b>Gases de oxigeno</b>	Agua de suministro, infiltración de agua superficial.

Fuente: Elaboración propia

Los constituyentes biológicos se describen en la **tabla 3** así como su origen; estas al igual que las anteriores presentan una relación con las propiedades físicas y los constituyentes orgánicos e inorgánicos del agua.

Tabla 3. Constituyentes biológicos y su origen<sup>17</sup>.

<b>Características</b>	<b>Origen</b>
<b>Animales</b>	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
<b>Plantas</b>	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
<b>Protistas</b>	Eubacterias, aguas residuales domésticas, infiltraciones de agua superficial, plantas de tratamiento.  Arqueo bacterias, aguas residuales domésticas, infiltraciones de agua superficial, plantas de tratamiento.
<b>Virus</b>	Aguas residuales domésticas.

Fuente: Elaboración propia

Los contaminantes de interés en el tratamiento del agua residual se incluyen en la **tabla 4**, la cual describe la normatividad que regula los tratamientos secundarios, basados en la eficiencia de disminución de la materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos que se encuentran en el agua residual. Gran parte de la normativa incluye el control de la eliminación de nutrientes y de los contaminantes prioritarios. Cabe resaltar que, si se planea reutilizar el agua residual, requiere también la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y en algunas oportunidades sólidos inorgánicos disueltos<sup>18</sup>.

<sup>17</sup> Ibid., p. 2.

<sup>18</sup> Barbaho Luz Edith. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUAY PARÁMETROS DE MEDICIÓN. [Consultado el Oct 1,2019]: Universidad del Valle,

Tabla 4. Contaminantes Importantes para el tratamiento de agua residual<sup>19</sup>.

<b>CONTAMINANTES</b>	<b>RAZÓN DE LA IMPORTANCIA</b>
<b>Sólidos en suspensión</b>	
<b>Materia orgánica biodegradable</b>	<p>Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales. La materia orgánica se mide, la mayoría de las veces, en términos de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar, su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.</p>
<b>Patógenos</b>	<p>Los presentes en el agua residual pueden transmitir enfermedades infecto contagiosas, estos pueden ser de tres tipos, bacterias, virus o protozoos parásitos, los cuales generan enfermedades como Cólera, Meningitis, fiebre tifoidea, Hepatitis, entre otras.</p>
<b>Nutrientes</b>	<p>Tanto el Nitrógeno como el Fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten en el entorno acuático, estos nutrientes pueden llevar el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten en el terreno en cantidades excesivas, también pueden conducir a la contaminación del agua subterránea.</p>
<b>Materia orgánica refractaria</b>	<p>Tiende a revestir los métodos convencionales de tratamiento. Ej.: agentes termo activos, fenoles y pesticidas agrícolas.</p>

<sup>19</sup> Ibid., p. 6.

Tabla 4. (Continuación)

<b>CONTAMINANTES</b>	<b>RAZÓN DE LA IMPORTANCIA</b>
<b>Metales pesados</b>	Son añadidos frecuentemente al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede que deban ser eliminados si se va a reutilizar el agua residual.
<b>Sólidos inorgánicos disueltos</b>	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como resultado del uso del agua y puede que deban eliminarse si se va a reutilizar el agua residual.

Fuente: Elaboración propia

**1.1.2 Clasificación de aguas residuales.** Las aguas residuales según la resolución 0631 de 2015 se clasifican en:

- Aguas Residuales Domésticas (ARD): son las procedentes de los hogares, así como de las instalaciones donde se desarrollan actividades comerciales, industriales o de servicios y que correspondan a descargas de los retretes y los registros sanitarios, así como descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).
- Aguas Residuales no Domésticas (ARnD): son las procedentes de actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas (ARD).

## 1.2 TRATAMIENTOS DE AGUAS

Es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico que tiene como fin formar un sistema que, a través de equipos, busca eliminar o reducir la contaminación y los parámetros indeseables de las aguas, se realizan tratamientos de depuración de aguas residual para poder cumplir con la normatividad y así poder verter estas aguas en el alcantarillado<sup>20</sup>.

<sup>20</sup> AguasSistec. Planta de Tratamiento de Agua Potable – PTAP. [Consultado el Oct 1,2019]. Disponible en: <http://www.aguasistec.com/planta-de-tratamiento-de-agua-potable.php>

**1.2.1 Sistemas de tratamiento.** Los sistemas de tratamiento se clasifican en dos grandes categorías: por tipo de proceso y por el grado de tratamiento <sup>21</sup>.

### **1.2.1.1 Sistema de tratamiento de agua residual por tipo de proceso.**

✓ **Tratamiento físico de aguas residuales.** Son los procesos que tienen como objetivo eliminar las partículas sólidas en suspensión, sedimentadas como arenas, aceites y grasas que tiene el agua residual y también se elimina parte de la materia orgánica <sup>22</sup>.

✓ **Tratamiento químico de aguas residuales.** Son todos los procesos que se realizan con el uso de sustancias químicas o mediante el uso de propiedades químicas de diversos compuestos para la eliminación de los contaminantes del agua <sup>23</sup>.

✓ **Tratamiento biológico de aguas residuales.** Se basan en emplear microorganismos o bacterias para la eliminación de contaminantes en el agua esto se hace mediante reactores biológicos y tienen mayor rendimiento <sup>24</sup>.

### **1.2.1.2 Sistema de tratamiento de agua residual por grado de tratamiento.**

✓ **Pretratamiento.** Consta de un conjunto de operación fundamentales de carácter físico y mecánico, con el cual se eliminan sólidos de gran tamaño (arenas, gravas, grasas y aceites) las cuales presentan problemas en las etapas siguientes. En esta etapa se producen residuos sólidos urbanos, lodos contaminados y un efluente que se procede a tratar en las siguientes unidades<sup>25</sup>.

✓ **Tratamiento primario.** Son aquellos que eliminan la materia orgánica, sólidos suspendidos y patógenos presentes en el agua residual por medio de procesos fisicoquímicos que son incluidos en el tratamiento primario como: sedimentación, flotación, coagulación – floculación y filtración<sup>26</sup>.

---

<sup>21</sup> LIZARAZO BECERRA, Jenny Milena and ORJUELA GUTIÉRREZ,Martha Isabel. Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. [Consultado el Oct 1,2019]:2013.

<sup>22</sup> IngeoExpert. Tratamientos físicos en las tecnologías de depuración de aguas residuales. [Consultado el Oct 1,2019]. Disponible en: <https://ingeoexpert.com/articulo/tratamientos-fisicos-las-tecnologias-depuracion-aguas-residuales/?v=42983b05e2f2>

<sup>23</sup> SÁNCHEZ MARTÍNEZ,Hugo. TRATAMIENTO QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. [Consultado el Oct 1,2019]. 17 de marzo de. Disponible en: <https://prezi.com/fbwg5wwtruft/tratamiento-quimico-de-aguas-residuales/>

<sup>24</sup> Arnaiz Carmen; Isac Laura and Lebrato juMan. Tratamiento biológico de aguas residuales. En: REVISTA TECNOLOGÍA DEL AGUA. Marzo de 2020

<sup>25</sup> PRETRATAMIENTO Planta de aguas residuales; [Consultado el Oct 1,2019]. Disponible en: [https://www.academia.edu/31991740/Pre\\_Tratamiento\\_y\\_Tratamiento\\_de\\_Aguas\\_Residuales](https://www.academia.edu/31991740/Pre_Tratamiento_y_Tratamiento_de_Aguas_Residuales)

<sup>26</sup> Cyclus. Tratamiento Primario. [Consultado el Oct 1,2019]. Disponible en: <http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-primario/>

✓ **Tratamiento secundario.** Se caracteriza por la utilización de microorganismos especialmente bacterias que buscan eliminar la materia orgánica biodegradable coloidal y disuelta, la demanda biológica de oxígeno y compuestos de nitrógeno (N) y fósforo (P); esto porque en la mayoría de casos la materia orgánica es la fuente de energía que necesitan los microorganismos para su crecimiento por la gran cantidad de carbono que tiene.

Este tratamiento se puede realizar por dos sistemas diferentes:

- **Sistemas aerobios:** son los que aprovechan la capacidad de algunos microorganismos para captar la materia orgánica y los compuestos de (N y P) en presencia de oxígeno<sup>27</sup>.
- **Sistemas anaerobios:** consisten en un proceso que se realiza con microorganismos específicos que en ausencia de oxígeno transforman la materia orgánica en mezclas de gases de metano, CO<sub>2</sub> y biogás<sup>28</sup>.

✓ **Tratamiento terciario.** Este tipo de tratamiento se conoce como tratamiento avanzado y complementarios que se realizan para obtener aguas de mejor calidad y verter en zonas donde hallan requisitos más exigentes o sean reutilizadas<sup>29</sup>. Cabe resaltar que este es el tratamiento más costoso, también tiene mayor eficiencia y porcentaje de remoción de materia orgánica, nutrientes, sólidos en suspensión y patógenos.

En la **Figura 1**. Se puede observar el rendimiento medio de depuración, dado en porcentaje en función del tipo de tratamiento.

---

<sup>27</sup> Cordonchem Envitech. SISTEMAS CON REACTORES AERÓBICOS PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES. [Consultado el Oct 1,2019]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/sistemas-con-reactores-aerobicos-para-tratar-aguas-residuales/>

<sup>28</sup> CYTED. Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales; [Consultado el Oct 1,2019]. Disponible en: [http://www.cytcd.org/sites/default/files/tratamiento\\_anaerobio\\_de\\_aguas\\_residuales.pdf](http://www.cytcd.org/sites/default/files/tratamiento_anaerobio_de_aguas_residuales.pdf)

<sup>29</sup> MONOGRÁFICOS AGUA EN CENTROAMÉRICA. MANUAL DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS. [Consultado el Oct 1,2019]. Disponible en: <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>

Figura 1. Rendimientos medios de depuración<sup>30</sup>.

	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	DBO5	<i>Escherichia coli</i>
Pretratamiento	5 – 15	5 – 10	10 – 25
Tratamientos primarios	40 – 70	25 – 40	25 – 70
Tratamientos secundarios	80 – 90	80 – 95	90 – 98
Tratamientos terciarios	90 – 95	95 – 98	98 – 99

Fuente: Monográficos agua en Centroamérica. Manual de depuración de aguas residuales urbanas.

A continuación, en la **tabla 5**. Se presentan simplificadaamente las operaciones unitarias o tratamientos que se realizan en cada grado y tipo de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 5. Clasificación de tratamientos de aguas residuales

Tratamiento por grado	Tratamiento por tipo	Operaciones unitarias o tratamientos
<b>Pretratamiento</b>	Procesos físicos y mecánicos	Cribado
		Desarenado
<b>Tratamiento primario</b>	Procesos físico-químicos	Desengrasado
		Neutralización
		Homogenización
<b>Tratamiento secundario</b>	Procesos biológicos	Rejillas
		Sedimentación
		Flotación
		Coagulación- floculación
		Filtración
		Lechos bacterianos
		Contadores biológicos rotativos (biodiscos y biocilindros)
Fangos activos		
<b>Tratamiento terciario</b>	Procesos biológicos	Reactores discontinuos (SBR)
		Filtros verdes
		Digestión anaerobia
		Reactor biológico de membrana (MBR)
		Electrocoagulación
		Electro oxidación

<sup>30</sup> MONOGRÁFICOS AGUA EN CENTROAMÉRICA. MANUAL DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS. [Consultado el Oct 1,2019]. Disponible en: <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>

Tabla 5. (Continuación)

Tratamiento por grado	Tratamiento por tipo	Operaciones unitarias o tratamientos
Tratamiento terciario	Procesos físico, químicos y biológicos	Intercambio iónico Adsorción Micro filtración y ultrafiltración Osmosis inversa Electro desinfección Membranas cerámicas Oxidación avanzada

Fuente: Elaboración propia

### 1.3 NORMATIVIDAD

En Colombia el encargado de establecer las políticas, regular los recursos renovables y el ambiente de nación es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible<sup>31</sup>, el cual promueve el aprovechamiento sostenible de estos. Para la regulación de vertimientos a cuerpos puntuales de fuentes hídricas y a los sistemas de alcantarillado público este ministerio expide la resolución 0631 del 17 de marzo de 2015 por medio de la cual establece los valores máximos permisibles para cada parámetro establecido<sup>32</sup>.

El laboratorio se encuentra regido por el artículo 16 de la resolución 0631 de 2015 en el cual se hace referencia a lo siguiente: **“Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales no domésticas- ARnD al alcantarillado público”**, la tabla con los valores establecidos en la norma puede ser observada en la sección de Anexos.

<sup>31</sup> COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 3570, Artículo 1 y Artículo 2. (27, septiembre, 2011). Por el cual se modifican los objetivos y la estructura del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y se integra el Sector Administrativo de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

<sup>32</sup> COLOMBIA MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución No. 0631 del 17 de marzo 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

## 2. GENERALIDADES

El laboratorio de análisis fisicoquímicos del proyecto se encuentra ubicado en la ciudad de Santiago de Cali, Valle del Cauca. La empresa se dedica al muestreo y análisis de aguas, bien sean residuales, de consumo o de piscinas industriales y tanques de almacenamiento, así mismo, realizan análisis tanto de alimentos como de materias primas, planes de manejo de ambiental, caracterización de efluentes y asesorías en diseño y manejo de plantas de tratamiento. El uso de agua en la empresa es para fines domésticos en baños y lavado de equipos; sin embargo, para los encargos de los clientes, se requiere en la gran mayoría de los casos muestras de aguas residuales tanto domésticas como no domésticas las cuales presentan cargas de algunos contaminantes que pueden dificultar el cumplimiento de la resolución 0631 para disponer dichos residuos en el alcantarillado.

La empresa realiza un almacenamiento de las muestras de agua analizadas, durante un mes, para posteriormente desecharlas durante el día de lavado, dichas aguas son en su mayoría desechadas directamente por el alcantarillado sin tener una certeza de que cumple con las condiciones establecidas por la normativa, y aquellas que por la naturaleza de su procedencia se tiene la certeza de presentar contaminantes que permitan su desecho son dispuestos por una compañía de manejo de residuos generando un costo adicional a la disposición de estos desechos.

A continuación, se describirá el balance hídrico de la empresa y se mostrarán los resultados de la caracterización de las aguas residuales provenientes de dichas muestras desechadas, datos que serán tomados como punto de partida para la escogencia del método de tratamiento más adecuado, así como para el dimensionamiento de equipos a utilizar.

### 2.1 BALANCE HÍDRICO

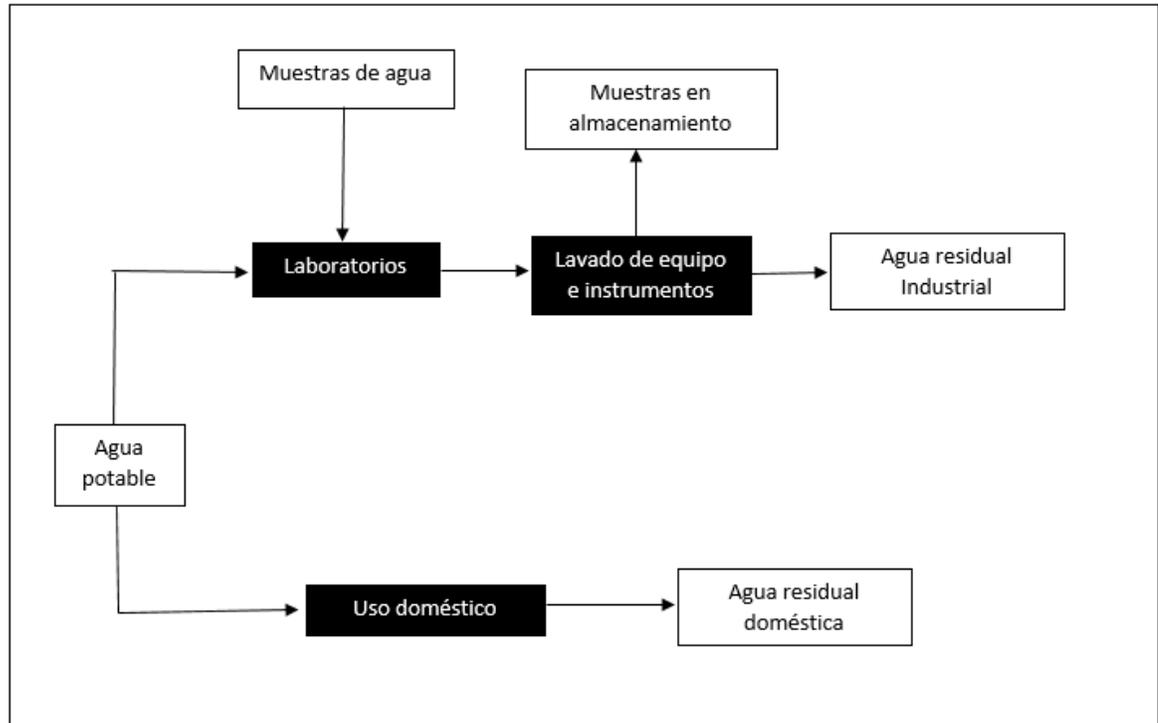
El balance hídrico está basado en el principio de conservación de masas y la ecuación de continuidad donde se consideran las entradas y salidas de agua en el proceso, esto permite cuantificar los volúmenes de agua que consume la empresa (agua residual doméstica e industrial)<sup>33</sup>. El objetivo del balance es poder determinar la cantidad de aguas residual que se debe tratar en el sistema que será propuesto. La empresa no cuenta con balances hídricos realizados anteriormente por lo cual se toma como punto de partida el consumo de agua que proporciona el recibo de agua del acueducto local además de un promedio de la cantidad de muestras que entran a la misma.

---

<sup>33</sup> Aquabook. ¿Qué es el Balance Hídrico? [Consultado el 7-agosto-2020]. Disponible en: [http://aquabook.agua.gob.ar/461\\_0](http://aquabook.agua.gob.ar/461_0)

**2.1.1 Redes de Agua.** Para la disposición de las aguas que resultan de los laboratorios de la empresa, como lo indica la normativa, esta cuenta con una red de drenaje y tubería independiente tanto para las aguas residuales domésticas como las industriales. El agua residual que sale del laboratorio cuenta con una caja de inspección en un punto especificado por la empresa para regular el control de vertimientos y estos efluentes se vierten a la red de alcantarillado de la ciudad de Cali.

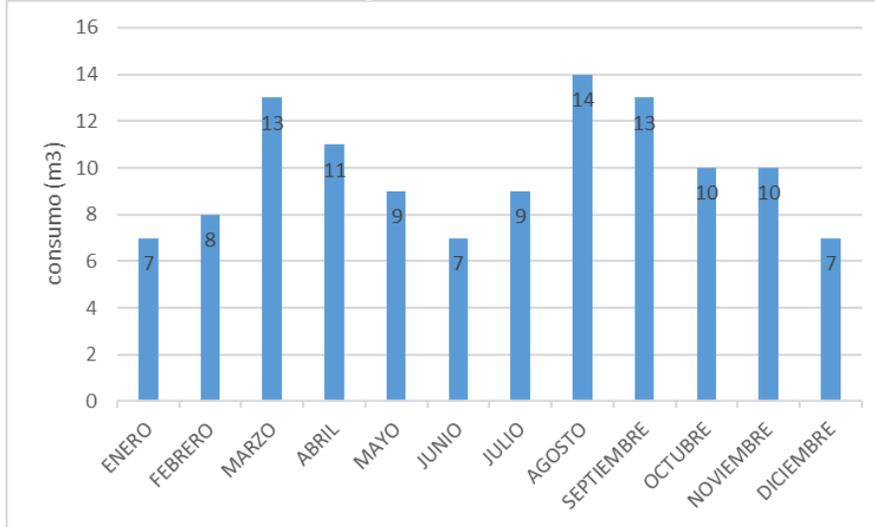
Figura 2. Red de aguas del laboratorio



Fuente: elaboración propia

**2.1.2 Consumo de agua.** Para el desarrollo del balance se partió de los datos de facturación de agua y alcantarillado del año 2019 dados por la empresa, donde el consumo de agua se presenta en distintas áreas, pero se resume en dos: el uso doméstico y el uso industrial. En el siguiente gráfico se muestran los consumos de agua total del año 2019.

Gráfico 1. Consumo de agua del laboratorio, año 2019



Fuente: Elaboración propia.

Con base en el gráfico, se puede observar que el mes donde más se consumió agua en el año 2019 fue septiembre en el cual la cantidad de agua potable fue de 14 m<sup>3</sup>, sin embargo, esta se utiliza en todas las áreas de la empresa. Para el desarrollo del balance se tomó el promedio del consumo ya que el laboratorio no presenta un consumo de agua estable a lo largo del año presentando picos en los meses de marzo, agosto y septiembre. Así mismo cabe destacar que el laboratorio cuenta con una tubería independiente por lo que se calculará posteriormente que cantidad del efluente se tendrá en cuenta para el desarrollo del proyecto. El valor promedio de consumo de agua para el año 2019 correspondió a 9.83 m<sup>3</sup>.

Ecuación 1. Caudal total del agua de consumo

$$QT = \frac{9.83 \text{ m}^3}{\text{mes}}$$

**2.1.3 Entrada de las muestras de agua.** La empresa recibe un promedio de 290 muestras de agua de distintas industrias para analizar en el mes, las cuales se presentan correctamente almacenadas; estas pueden ser tomadas por ellos mismos o pueden ser suministradas por el cliente bajo su debido proceso, almacenamiento y transporte; pueden ir desde los 2 recipientes de 200 ml hasta un recipiente de 2 L. Al llegar a los laboratorios son verificadas, marcadas y debidamente refrigeradas para realizar los análisis que el cliente solicite. Cabe resaltar que luego que se realicen los análisis se almacena una parte de la muestra por un periodo aproximado de un mes por si se presenta algún reclamo por parte de algún cliente. A continuación, se procede a calcular la cantidad de agua de muestras entrantes; para esto se tomó el promedio de muestras que ingresan al

laboratorio en un mes, considerando un escenario extremo en el cual todas las muestras son de 2 L.

Ecuación 2. Entrada de muestras de agua

$$EM = CM * RM$$

Donde

EM= Entrada de agua en muestras

CM=Cantidad de muestras

RM=Volumen de las muestras

$$EM = 290 \frac{\text{muestras}}{\text{mes}} * 2 \frac{L}{\text{muestra}}$$

$$EM = 580 \frac{L}{\text{mes}} * \frac{1 m^3}{1000 L}$$

$$EM = 0.58 \frac{m^3}{\text{mes}}$$

El Valor obtenido pese a ser el volumen de agua que se somete a análisis en el laboratorio y que posteriormente debe ser dispuesta no es el volumen con que se trabajara durante el proyecto, esto debido a que no todas las muestras ingresan en el primer día del mes por lo cual algunas de estas se preservaran a final del mes y no serán desechadas. Como se apreciará en el numeral 2.1.5 el volumen de agua desechada durante el día de lavado equivale al 382% del agua que ingresa como muestras durante el mes, esto indica que las muestras que son desechadas pueden permanecer en ocasiones por más de un mes almacenada lo cual hace necesario emplear el valor tomado in situ para realizar el dimensionamiento a lo largo del proyecto garantizando que el tratamiento permita procesar toda el agua desechada.

**2.1.4 Consumo en el laboratorio.** Para realizar los procedimientos o análisis no se hace uso del agua potable, esta se usa para lavado de equipos, instrumentos y recipientes de muestras lo cual nos genera un agua residual no doméstica que sale por la tubería independiente.

**2.1.5 Consumo de agua residual no doméstica.** Para calcular esta cantidad de agua residual se realiza una medición del vertimiento *in situ* de la caja de inspección con una frecuencia de 15 minutos entre muestras para un periodo de cuatro horas, desde las 8:00 am- 12:00 m esto se realizó tanto un día de lavado que se presenta una vez al mes como una vez durante un día de jornada de trabajo normal.

- **Día de lavado:** como día de lavado se refiere al único día en el mes que se vierte a la tubería independiente las muestras almacenadas, para calcular el caudal de este día se lleva a cabo una medición del vertimiento in situ con el fin de medir el caudal de salida y realizar la toma de alícuotas para la caracterización del efluente mediante un muestreo compuesto el cual será explicado en el siguiente capítulo. La siguiente tabla muestra la medición del caudal el día lavado:

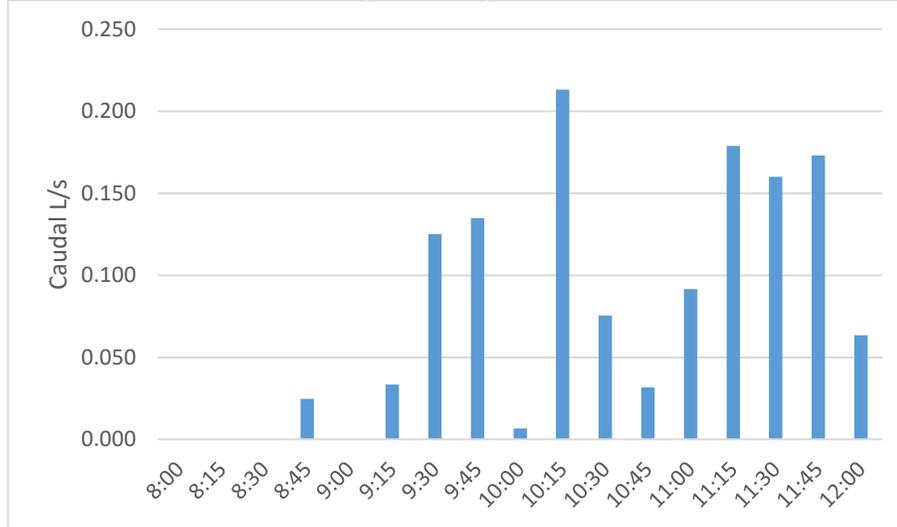
Tabla 6. Día de lavado

<b>N°</b>	<b>hora</b>	<b>Caudal L/s</b>
1	8:00	0.000
2	8:15	0.000
3	8:30	0.000
4	8:45	0.025
5	9:00	0.000
6	9:15	0.033
7	9:30	0.125
8	9:45	0.135
9	10:00	0.007
10	10:15	0.213
11	10:30	0.076
12	10:45	0.032
13	11:00	0.092
14	11:15	0.179
15	11:30	0.160
16	11:45	0.173
17	12:00	0.064

Fuente: Elaboración propia

La toma de muestras se realizó el día 4 de febrero de 2020; desde la toma hasta el momento del análisis se mantuvo refrigerada, protegida del sol, la luz y de posibles fuentes contaminantes.

Gráfico 2. Aforo in situ caja de inspección laboratorio



Fuente: Elaboración propia

La gráfica permite analizar el comportamiento de los vertimientos efectuados por el laboratorio, donde se puede ver un caudal máximo de 0.213 L/s sin embargo para el desarrollo del trabajo se tiene en cuenta el caudal promedio obtenido para calcular el consumo del día de lavado bajo la siguiente ecuación.

Ecuación 3. Día de lavado

$$DL = CP * FT$$

Donde

DL= consumo día de lavado

CP= caudal promedio día de lavado

FT= Factor de tiempo

$$DL = 0.077 \frac{L}{s} * \frac{1 m^3}{1000 L} * \frac{3600 s}{1 h} * \frac{8 h}{mes}$$

$$DL = 2.2174 \frac{m^3}{mes}$$

Como se indicó anteriormente, el agua desechada durante el día de lavado resulta ser superior a la cantidad de muestras que ingresan durante el mes, esto se debe a muestras que pueden ser almacenadas en ocasiones más de un mes, y al agua doméstica que se emplea para realizar el lavado del laboratorio.

- **Jornada de trabajo normal:** esta se especifica como todos los días de trabajo exceptuando el día de lavado debido a que su consumo es mayor, para una jornada de trabajo se genera agua residual no doméstica en el lavado de equipos lo cual nos genera una cantidad de salida de agua por la tubería independiente. Para el cálculo de este implementamos el mismo proceso anterior.

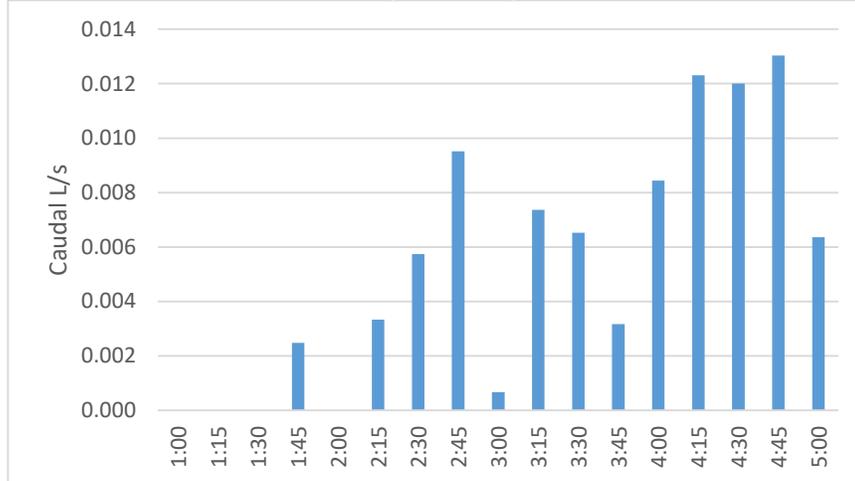
Tabla 7. Jornada de trabajo normal

N°	Hora	Caudal L/s
1	1:00	0.000
2	1:15	0.000
3	1:30	0.000
4	1:45	0.0024
5	2:00	0.000
6	2:15	0.003
7	2:30	0.006
8	2:45	0.01
9	3:00	0.001
10	3:15	0.0073
11	3:30	0.0065
12	3:45	0.0031
13	4:00	0.0084
14	4:15	0.0123
15	4:30	0.012
16	4:45	0.013
17	5:00	0.0064

Fuente: Elaboración propia

El estudio anterior se realizó el día 5 de febrero del 2020 en la jornada de la tarde donde se tuvo un uso regular del laboratorio realizando los análisis correspondientes a muestras y desechando residuos del lavado de los equipos sin que se haga desecho de muestras almacenadas.

Gráfico 3. Aforo 2 in situ caja de inspección laboratorio



Fuente: Elaboración propia

La gráfica permite analizar el comportamiento de los vertimientos efectuados por el laboratorio, donde se puede ver un caudal máximo de 0.013 L/s sin embargo para el desarrollo del trabajo se tiene en cuenta el caudal promedio obtenido para calcular el consumo de agua en el mes en los días de trabajo normal se presenta la siguiente ecuación.

Ecuación 4. Día de trabajo normal.

$$DN = CPD * FT$$

Donde

DN= consumo día de trabajo normal

CPD= caudal promedio día trabajo normal

FT= Factor de tiempo

$$DN = 0.0053 \frac{L}{s} * \frac{1 m^3}{1000 L} * \frac{3600 s}{1 h} * \frac{8 h}{dia} * \frac{25 dias}{1 mes}$$

$$DN = 3.816 \frac{m^3}{mes}$$

**2.1.6 Consumo de agua residual doméstica.** Está relacionado directamente con todas aquellas actividades que no intervienen directamente con los procedimientos o análisis; sin embargo, se generan dos tipos de aguas residuales: una de ellas es el agua residual industrial doméstica la cual proviene de la limpieza de suelos y paredes del laboratorio; y la otra es el agua residual doméstica que son los residuos originados de la limpieza de la zona administrativa, agua para el uso, limpieza de baños y uso en la cocina.

Para determinar el consumo de agua con fines domésticos se aplica la siguiente ecuación con base en el balance hídrico y consumo total de agua para uso industrial.

$$\sum \text{entradas} = \sum \text{salidas}$$

$$QT + EM = SD + SL$$

Donde

QT= Caudal total del agua de consumo

EM= Entrada de agua en muestras

SD= Salidas domésticas

SL= Salida de laboratorios

$$SD = QT + EM - SL$$

$$SD = 9.83 \frac{m^3}{mes} + 0.58 \frac{m^3}{mes} - 2.2174 \frac{m^3}{mes} - 3.816 \frac{m^3}{mes}$$

$$SD = 4.3766 \frac{m^3}{mes}$$

La cantidad de agua que sale por la tubería de agua doméstica indica que la mayor parte del líquido que ingresa es utilizada en labores de limpieza y baños, representando cerca del 50% del consumo promedio sin contar las muestras puesto que estas se manipulan directamente en el laboratorio y se desechan por la tubería independiente.

### **3. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

El siguiente capítulo tiene como objetivo identificar los parámetros cuyos valores se encuentren fuera de los límites permisibles apoyados en la caracterización del agua, posteriormente, se seleccionará un tratamiento que permita cumplir con la normativa a la hora de disponer las aguas residuales del laboratorio mediante una matriz de selección con base en fuentes bibliográficas.

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL**

El primer paso para la escogencia de un método de tratamiento consiste en identificar aquellos parámetros que se desean corregir, esto evita seleccionar métodos que generen sobrecostos y que puedan no ser los más adecuados para disminuir un parámetro en concreto.

La identificación se realiza por medio de una caracterización de las aguas a tratar; este procedimiento inicia con el muestreo de la tubería de desagüe proveniente del laboratorio, cada 15 minutos durante un periodo de cuatro horas, a cada muestra se le mide in situ la temperatura de salida y el pH y mediante el método volumétrico, dividiendo el volumen de agua captado sobre el tiempo de llenado se obtienen los caudales. Posteriormente, se realiza un muestreo compuesto tomando alícuotas de cada muestra y mezclándolas para obtener un volumen de agua homogéneo, con el objetivo de que la muestra final contenga una fracción equitativa de cada toma realizada evitando sesgar los resultados o diluir algunos contaminantes. Finalmente, se separa la mezcla en envases para cada parámetro requerido y se agregan químicos como ácido sulfúrico o nítrico para preservar dichas muestras y que los análisis arrojen valores precisos.

Como se indicó en el capítulo anterior, el muestreo se realizó el día 4 de febrero del 2020; durante este procedimiento se desecharon muestras almacenadas desde el mes de noviembre del 2019 hasta el mes de enero del 2020, trimestre en el cual el laboratorio presentaba el mayor recibimiento de muestras para analizar; esto permitió que la muestra obtenida contuviese la mayor variedad de contaminantes posibles para así realizar la escogencia de un tratamiento que pudiese abarcar la variabilidad de aguas desechadas en el laboratorio.

Una vez realizada la caracterización los resultados obtenidos permiten comparar cada parámetro con la normatividad y de esta manera identificar aquellos que incumplan. En la tabla 8, se visualizan los valores obtenidos, así como el valor que reglamentariamente debería tener.

Tabla 8. Caracterización del agua y comparación con la resolución 0631 de 2015

PARAMETRO	UNIDADES	METODOLOGIA	VALOR DE LA MUESTRA	LIMITE DE LA NORMA
pH min	Unidades de pH	-	2.90*	5.00
pH Max	Unidades de pH	-	7.93	9.00
Acidez	mg CaCO <sub>3</sub> /L	SM2310 B	886.40	Análisis y reporte
Alcalinidad Total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	SM2320 B	8.70	Análisis y reporte
Aluminio	mg Al/L		2.35	Análisis y reporte
Arsénico	mg As/L	EPA200.7	<0,040	0.10
Bario	mg Ba/L		<0,100	1.00
Boro	mg B/L		<0,100	Análisis y reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno)	mg/L	EPA 8015 D	<0,010	Análisis y reporte
Cadmio	mg Cd/L	EPA200.7	<0,010	0.01
Cianuro Total	mg CN <sup>-</sup> /L	SM4500-CN F	<0,10	0.10
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	SM4500-Cl <sup>-</sup> C	58.80	250.00
Cobalto	mg Co/L	EPA200.7	<0,050	0.10
Cobre	mg Cu/L		<0,100	1.00
Color 436 nm	m-1		0.70	Análisis y reporte
Color 525 nm	m-1	ISO7887:2011 METODO B	0.10	Análisis y reporte
Color 620 nm	m-1		0.00	Análisis y reporte
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	EPA3535 A, EPA8270 E	0.00642	Análisis y reporte

\* Como se puede apreciar, los parámetros que se encuentran resaltados de color amarillo, son aquellos cuyo valor de la caracterización excedió la normativa colombiana.

Tabla 8. (Continuación)

PARAMETRO	UNIDADES	METODOLOGIA	VALOR DE LA MUESTRA	LIMITE DE LA NORMA
Compuestos Orgánicos Halogenados Absorbibles (AOX)	mg/L	ISO9562	158.6	Análisis y reporte
Cromo total	mg Cr/L	EPA200.7	<0,050	0.10
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	SM5210 B, ASTM D888-12 C	135.10*	75.00
Demanda Química de Oxígeno DQO	mg O <sub>2</sub> /L	SM5220 D	319.00*	225.00
Detergentes (SAAM)	mg LAS/L	SM5540 C	4.04	Análisis y reporte
Dureza Cálcica	mg CaCO <sub>3</sub> /L	DM3500-Ca B	158.6	Análisis y reporte
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	SM2340 C	474.90	Análisis y reporte
Estaño	mg Sn/L	EPA200.7	<0,400	2.00
Fenoles Totales	mg pH-OH/L	SM5530 B,C	<0,010	0.20
Fluoruros	mg F <sup>-</sup> /L	SM4500-F <sup>-</sup> B,D	0.447	5.00
Fosforo total	mg P/L	SM4500-P B,E	3.92	Análisis y reporte
Grasas y Aceites	mg/L	SM5520 D	8.20	15.00
Hidrocarburos Aromáticos Poli cíclicos (HAP)	mg/L	EPA3535 A, EPA8100	<0,001	Análisis y reporte

\* Como se puede apreciar, los parámetros que se encuentran resaltados de color amarillo, son aquellos cuyo valor de la caracterización excedió la normativa colombiana.

Tabla 8. (Continuación)

PARAMETRO	UNIDADES	METODOLOGIA	VALOR DE LA MUESTRA	LIMITE DE LA NORMA
Hidrocarburos Totales	mg/L	SM5520 C,F	<5,00	10.00
Hierro Total	mg Fe/L	SM3500-Fe B	0.33	1.00
Mercurio	mg Hg/L	SM3112 B	<0,001	0.002
Níquel	mg Ni/L	EPA200.7	<0,020	0.10
Nitratos	mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L	Ref918-65 Macherey Nagel	6.78	Análisis y reporte
Nitritos	mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /L	SM4500-NO <sub>2</sub> B	<0,0152	Análisis y reporte
Nitrógeno amoniacal	mg N-NH <sub>3</sub> /L	SM4500-NH <sub>3</sub> C	19.10	Análisis y reporte
Nitrógeno Kjeldahl	mg N/L	SM4500-N(org) C:NH <sub>3</sub> B, C	28.72	Análisis y reporte
Nitrógeno Total	mg N/L	SUMA(NK+NO <sub>3</sub> + NO <sub>2</sub> )	35.50	Análisis y reporte
Orto fosfatos	mg P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L	USEPA phosVer 3 Método 8048	3.61	Análisis y reporte
Plata	mg Ag/L		<0,050	0.20
Plomo	mg Pb/L	EPA200.7	<0,050	0.10
Selenio	mg Se/L		<0,010	0.20
Sólidos Sedimentables 60'	ml/L	SM2540 F	1.10	1.50
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SM2540 D	202.60*	75.00
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> /L	SM4500-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> E	33.00	250.00
Sulfuros	mg S <sup>=</sup> /L	SM4500-S <sub>2</sub> F	<1,00	1.00
Vanadio	mg V/L		<0,100	1.00
Zinc	mg Zn/L	EPA200.7	0.223	3.00

Fuente: Laboratorio de análisis fisicoquímico. Modificado por los autores.

\* Como se puede apreciar, los parámetros que se encuentran resaltados de color amarillo, son aquellos cuyo valor de la caracterización excedió la normativa colombiana.

**pH:** Es definido según Sorensen como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrogeno, permite identificar la acidez o basicidad de una solución mediante una escala entre el 1 y el 14.<sup>34</sup> En el caso del agua residual a tratar, se obtuvieron valores de muestras entre 2.9 y 7.93, y dado que la normativa exige un pH no menor a 5 se deberá neutralizar los desechos, especialmente porque varios procesos de tratamiento requieren un control estricto del pH para garantizar la eficiencia deseada.

**Demanda bioquímica de oxígeno:** Se denomina así a la cantidad de oxígeno requerida por microorganismos para oxidar aeróbicamente residuos orgánicos presentes en la muestra de agua.<sup>35</sup> El valor obtenido en el agua del laboratorio es cerca del doble de la normativa presentando un 80% de exceso indicando la presencia de altas concentraciones de materia orgánica en el agua procedente en su mayoría de aguas de restaurantes, y carnicerías.

**Demanda química de oxígeno:** Es la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua, mediante agentes oxidantes temperatura y tiempo.<sup>36</sup> Al igual que el DBO, este parámetro se encuentra por encima del límite reglamentado con un 42% de exceso, producto del manejo de aguas de hospitales, restaurantes y carnicerías.

**Sólidos suspendidos totales:** Son aquellos sólidos no sedimentables de tamaño menor a 0.01 mm que se transportan gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua.<sup>37</sup> La muestra presenta valores de sólidos suspendidos mayores a dos veces lo establecido por norma con un 170% de exceso procedentes de impurezas de aguas de ríos, residuos alimenticios y puntos de captación superficial.

---

<sup>34</sup> KORDATZKI, W. Manual para la medida práctica del pH. segunda ed. Barcelona: M. Marín & Cía. Editores, 1953.

<sup>35</sup> RAFFO LECCA, Eduardo y RUIZ LIZAMA, Edgar. Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*. 2014, vol. 17, nro. 1. pp. 71-80 Eduardo Raffo Lecca and Edgar Ruiz Lizama. "Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno." *Industrial Data* 17.1 (2014): 71-80. Web.

<sup>36</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales. Demanda Química de Oxígeno por reflujos cerrados y voluntarios. [En línea]. IDEAM. (dic 28,). [Consultado: mar 18, 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

<sup>37</sup> SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN AGUA SECADOS A 103 – 105 °C, agosto 2. 2007. [Consultado: mar 19, 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>.

## 3.2 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE LABORATORIO

Una vez identificados los parámetros que incumplen la normativa de disposición, se procede a seleccionar un tratamiento que pueda reducir estos valores, para ello se realizó una revisión bibliográfica para identificar las alternativas iniciales tomando como parámetro de selección, aquellos métodos mayormente usados y que hayan reducido satisfactoriamente al menos uno de los parámetros críticos. Los tratamientos seleccionados serán descritos a continuación.

**3.2.1 Neutralización.** Normalmente es usado como pretratamiento de residuos, consiste en la adición de un álcali o un ácido al efluente de manera que se logre un rango de pH que sea aceptado para el vertimiento. Dado que algunos fenómenos biológicos o químicos ocurren durante procesos posteriores no solo es necesario ajustar el pH al rango requerido sino, además, generar una capacidad tampona, la cual pueda evitar que el pH varíe significativamente al adicionar cargas ácidas o básicas.<sup>38</sup>

Las aguas residuales del laboratorio presentan valores de pH mínimo por debajo de cinco en la escala, por lo cual se trata de un agua ácida, para su neutralización se pueden usar dos tipos de bases: la cal o sus formas oxidadas e hidratadas son las más utilizadas debido al bajo costo que presentan, sin embargo, generan cantidades significativas de lodos los cuales también se deben tratar y disponer. La segunda sustancia es el Hidróxido de Sodio que si bien es más costoso resulta una mejor alternativa cuando el tratamiento se realiza en plantas pequeñas y cuando se busca reducir mayormente el residuo generado del proceso de Neutralización.

El procedimiento a nivel de laboratorio debe desarrollarse mediante curvas de titulación en las cuales se agregan poco a poco cantidades de Álcali mientras se agita constantemente y se realiza la medición del pH hasta alcanzar el punto de equilibrio deseado, finalmente se repite el procedimiento con la dosis determinada y se establece el tiempo de mezcla requerido para obtener la mezcla deseada.<sup>39</sup>

**3.2.2 Coagulación y floculación.** Este tratamiento está conformado por dos procesos como su nombre lo dice, el primero es la coagulación, en el cual se busca desestabilizar químicamente las partículas coloidales presentes en el agua residual mediante la neutralización de las fuerzas que los mantienen separados. Los coagulantes más utilizados son las sales de Aluminio y las de Hierro como el Sulfato de Aluminio, el Cloruro Férrico, el Sulfato Férrico, etc.

El segundo proceso consiste en la agitación y mezclado lento con el objetivo de acrecentar el tamaño de los floculos y aglomerarlos facilitando la sedimentación de

---

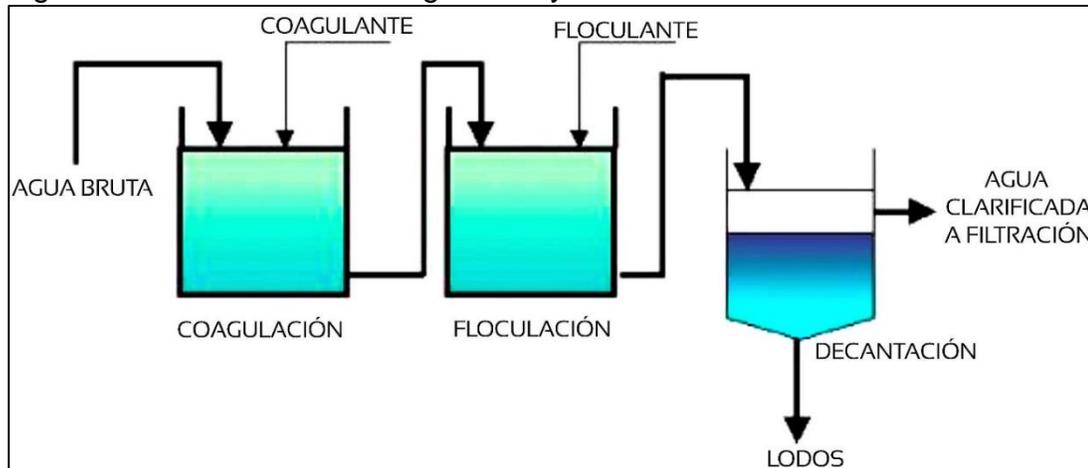
<sup>38</sup> ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Teoría y principios de diseño. Tercera ed. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. 319-333 p.

<sup>39</sup> Ibid., p. 327.

los mismos. Se debe por lo general emplear un agente químico floclulante para ayudar a la aglomeración y precipitación, así mismo hay que prestar especial atención a la intensidad del mezclado, dado que una mayor intensidad puede romper los floclulos y disminuir la efectividad del proceso.

La Figura 3 muestra el diseño general de un tratamiento de Coagulación y Floclulación

Figura 3. Tratamiento de Coagulación y Floclulación



Fuente: Sanchez Del Castillo, 2016. pp 20<sup>40</sup>

Como se puede observar en la figura el sistema emplea usualmente dos tanques para realizar los procesos por separado, y posteriormente suele incluirse un tanque de decantación para separar el agua tratada de los lodos formados.

Entre las ventajas que presenta este método se pueden resaltar los porcentajes de remoción de hasta el 95% de DQO y de sólidos suspendidos coloidales, así mismo, el costo de implementación depende de los productos químicos que se emplearan. Su principal desventaja es la alta producción de lodo residual el cual debe ser dispuesto generando costos adicionales, y el requerimiento de espacio libre considerable para la ubicación de los tanques de mezclado.<sup>41</sup>

**3.2.3 Electrocoagulación.** Tratamiento cuyo principio fundamental se basa en la coagulación de las partículas suspendidas en el agua residual, pero sin el uso de coagulante, si no en la inducción de una corriente eléctrica a través de placas metálicas paralelas, dicha corriente genera una serie de reacciones químicas que dan como resultado la estabilidad de las partículas contaminantes, dicho estado

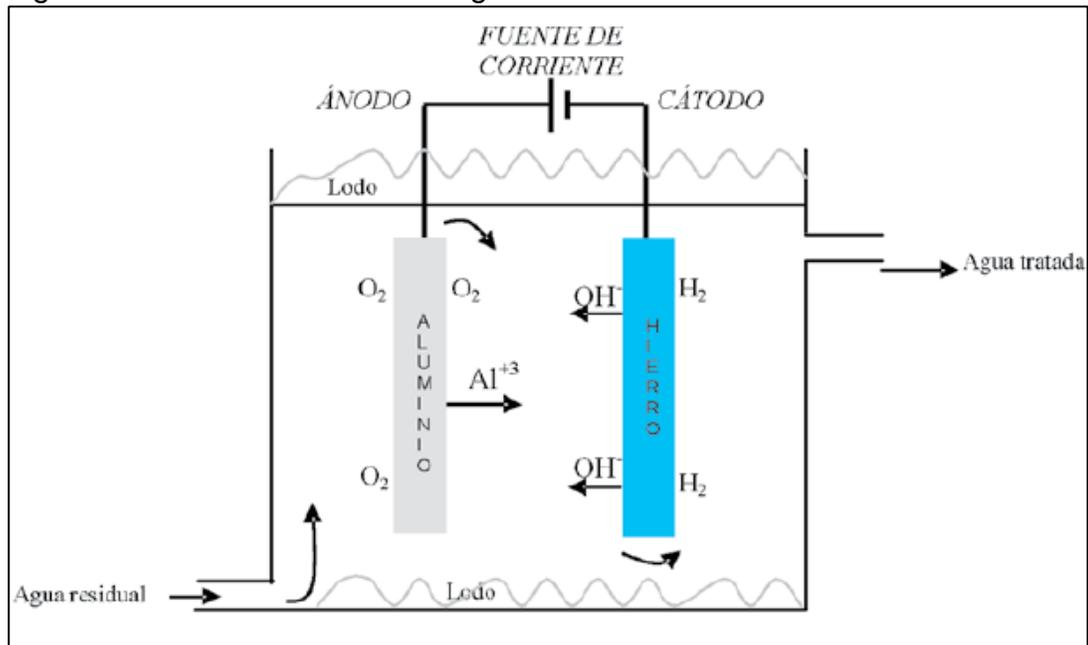
<sup>40</sup> Ing. Manuel Sanchez Del Castillo. Elimina la turbiedad del agua. *Agua y Ambiente*. 2016, nro. 12. pp. 20

<sup>41</sup> Ing. Yolanda Andía Cárdenas. TRATAMIENTO DE AGUA. COAGULACIÓN Y FLOCLULACIÓN. Lima, Perú: 2000.

estable resulta en la mayoría de ocasiones partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas lo cual facilita su remoción empleando un método de separación secundario.<sup>42</sup>

La siguiente figura esquematiza el tratamiento.

Figura 4. Tratamiento Electrocoagulación



Fuente: RESTREPO MEJIA, Ana Patricia; ARANGO RUIZ, Álvaro y GARCES GIRALDO, Luis Fernando. La Electrocoagulación: Retos Y Oportunidades En El Tratamiento De Aguas

En la figura se puede apreciar la formación de lodo tanto en la superficie como en el fondo del tanque, esto se debe a que parte de los residuos se sedimentan por peso, mientras que la generación de espuma permite la flotación de gran parte de los lodos permitiendo la separación por medios mecánicos de manera sencilla, por otro lado, el material de los electrodos es Aluminio y Hierro los cuales son los más usados cuando se realiza este tratamiento.

Entre sus mayores ventajas se encuentra la remoción de contaminantes orgánicos como el DQO y el DBO en valores del 88%, así mismo el costo de operación resulta menor comparándolo con procesos convencionales que empleen polímeros, no debe emplear químicos para el tratamiento ni equipos de gran tamaño lo cual lo hace ideal para lugares con espacio reducido, finalmente los lodos generados resultan ser más compactos y en menor cantidad que los métodos convencionales,

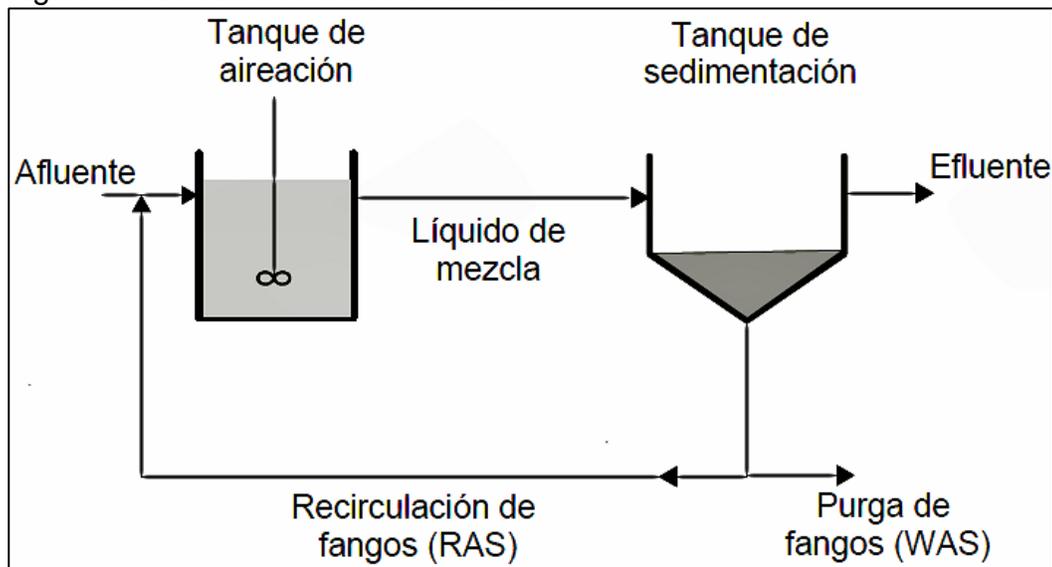
<sup>42</sup> RESTREPO MEJIA, Ana Patricia; ARANGO RUIZ, Álvaro y GARCES GIRALDO, Luis Fernando. La Electrocoagulación: Retos Y Oportunidades En El Tratamiento De Aguas. La Electrocoagulación: Retos Y Oportunidades En El Tratamiento De Aguas. 2006.

pese a lo anterior, una de sus mayores desventajas está en la alta carga de metales como aluminio o hierro que pueden contener dichos lodos, debido al desprendimiento del material de los electrodos, esto provoca costos agregados tanto en la disposición del lodo como en la reposición de los electrodos.

**3.2.4 Lodos activados.** Este tratamiento emplea un reactor donde se mantiene en suspensión un cultivo microbiano bajo condiciones aerobias mediante agitación constante. El sistema pese a ser utilizado ampliamente en el mundo, presenta costos de inversión altos, pasado el tiempo de cultivo de los microorganismos, el contenido del tanque se pasa a un sedimentador donde se separan las aguas tratadas del lodo, este último es recirculado en su mayoría para mantener un cultivo adecuado, y una pequeña parte es purgado del sistema para no acumular exceso de contaminantes.

En la siguiente Figura se esquematiza el proceso empleando lodos activados.

Figura 5. Tratamiento lodos activados



Fuente: LOZANO RIVAS, William Antonio. *Diseño De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales. Diseño De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales*<sup>43</sup>

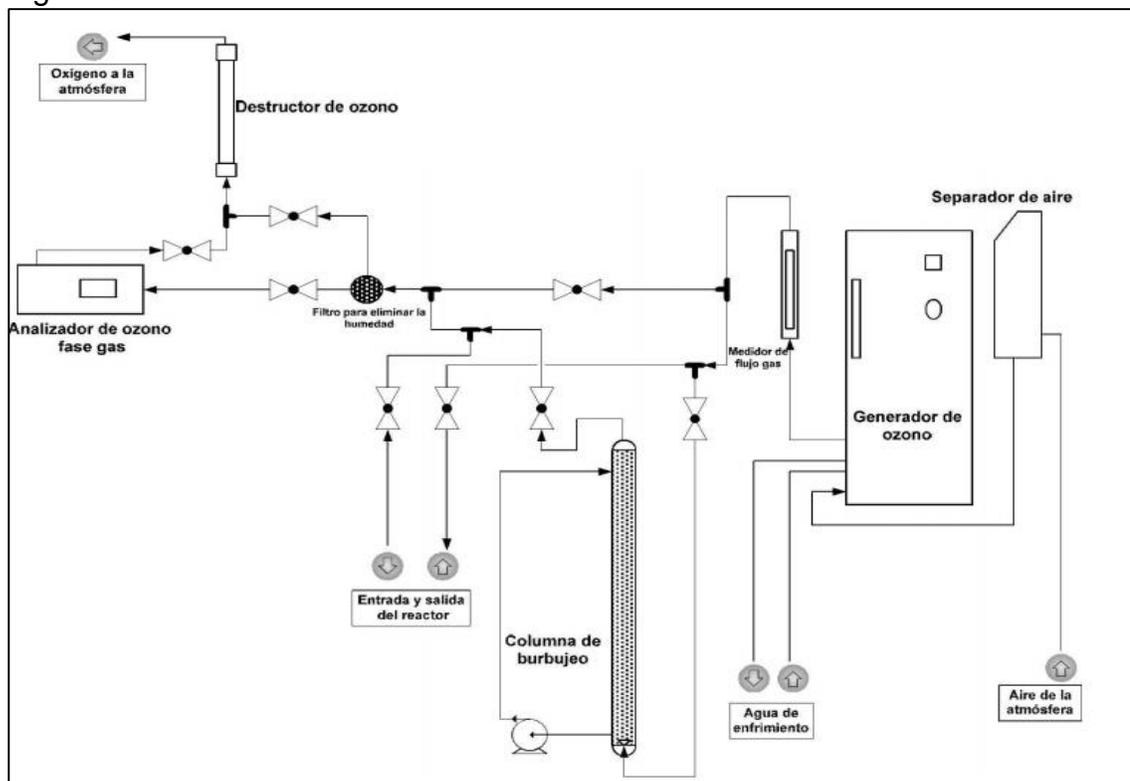
Como se observa, el afluente ingresa al tanque con los microorganismos en presencia de aire y con mezclador, para posteriormente ser llevado al tanque de sedimentación donde los lodos son retirados por la parte inferior de este, se realiza la purga y se recircula, mientras que las aguas tratadas son retiradas por la parte superior del sedimentador.

<sup>43</sup> LOZANO RIVAS, William Antonio. *Diseño De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales. Diseño De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales*. Bogotá, Colombia: 2012.

El funcionamiento del proceso es sencillo, pero requiere de un control permanente y los lodos que se generan son altamente mineralizados lo cual evita tratamientos posteriores, los porcentajes de remoción de material orgánico oscilan entre el 85% y el 95% con altos requerimientos de espacio para los tanques de sedimentación y aireación.<sup>44</sup>

**3.2.5 Ozonificación.** Este proceso se emplea en tratamientos de agua residual y potable ya que permite la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicas, se realiza agregando ozono  $O_3$  al agua la cual reacciona de dos formas diferentes: por oxidación directa o por una reacción indirecta que forma oxidantes secundarios como radicales libre<sup>45</sup>.

Figura 6. Tratamiento ozonificación



Fuente: MUÑOZ, Juan Fernando and ORTA, María Teresa. EFECTO DEL OZONO EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DISUELTA DE UN EFLUENTE SECUNDARIO<sup>46</sup>

<sup>44</sup> RAMIREZ CAMPEROS, Esperanza. Fundamentos teóricos de lodos activados y aireación extendida. [En línea]. IDEAM. [Consultado: Marzo del 2020]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf>

<sup>45</sup> BENÍTEZ, F. Javier, et al. Ozone and membrane filtration based strategies for the treatment of cork processing wastewaters. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 152, no. 1, p. 373-380

<sup>46</sup> MUÑOZ, Juan Fernando and ORTA, María Teresa. EFECTO DEL OZONO EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DISUELTA DE UN EFLUENTE SECUNDARIO. En: REVISTA EIA. Dic 1, no. 18, p. 171-178

El tratamiento mediante ozonificación inicia con el ingreso de aire atmosférico a un generador de ozono, este pasa posteriormente a una torre de burbujeo donde entra en contacto el ozono gaseoso con el agua a tratar, el agua es retirada del proceso una vez termina su paso por la torre mientras que el ozono es conducido hacia un equipo de destrucción donde se descompone en oxígeno y sale nuevamente a la atmósfera.

Entre sus mayores ventajas se encuentra su facilidad de producción de ozono desde el aire u oxígeno por descargas eléctricas, su facilidad de reacción con compuestos orgánicos e inorgánicos debido a su alta reactividad y potencial de reducción, además es uno de los desinfectantes químicos más eficientes por el tiempo de contacto que necesita, sin embargo, este es altamente corrosivo y su costo inicial de equipamiento es alto.

### 3.3 MATRIZ DE SELECCIÓN

Una vez expuestos las distintas alternativas que pueden ser desarrolladas para tratar el agua residual se procede a realizar la escogencia de aquella que resulte más viable, para esto se evaluarán todos los métodos mediante una matriz de selección en la cual se les asignarán valores numéricos a cada método en parámetros específicos, y al final, aquel con una mayor ponderación numérica resultará ser el escogido.

Los Parámetros a evaluar de cada tratamiento serán descritos a continuación.

- **Eficiencia de remoción:** Uno de los factores de mayor relevancia cuando se desea seleccionar un tratamiento para las aguas residuales es la cantidad de contaminantes que se busca reducir para posibilitar el cumplimiento de la norma sanitaria y poder disponer adecuadamente el efluente. Este parámetro será evaluado considerando los porcentajes de remoción que cada tratamiento ha demostrado en aplicaciones previas. A cada posible tratamiento se le asignará un valor cuantitativo entre 1 y 5 de acuerdo al porcentaje de remoción como se ilustra en la tabla 9.

Tabla 9. Escala de valoración de la eficiencia de remoción

Porcentaje de remoción	Calificación
90%-100%	5
70%-89%	4
50%-69%	3
30%-49%	2
<30%	1

Fuente: Elaboración propia.

- **Generación de residuos:** La mayoría de los tratamientos de agua a evaluar generan residuos sólidos en forma de lodo, los cuales deben ser en mayor o menor medida tratados y dispuestos correctamente generando costos asociados, por lo anterior se valorará mejor a aquel tratamiento que genere la menor cantidad de lodos como residuo y que así mismo dicho lodo requiera la menor cantidad de tratamientos adicionales para su disposición. En la tabla 10 se ilustra la escala de puntuación empleada para este parámetro.

Tabla 10. Escala de valoración para la generación de residuos.

<b>Cantidad de lodo y requerimientos de tratamiento</b>	<b>Calificación</b>
Sin producción de lodo	5
Baja cantidad de lodo y procesos de tratamiento	4
Producción de lodo baja con altos requerimientos de tratamiento	3
Alta producción de lodo con bajos requerimientos de tratamiento	2
Alta producción de lodo y requerimientos de tratamiento	1

Fuente: Elaboración propia.

- **Espacio requerido:** El laboratorio fisicoquímico donde se desea implementar el tratamiento cuenta con un espacio reducido dificultando la implementación de procesos que requieran espacios extensos para tratar adecuadamente las aguas, esto impone la necesidad de evaluar adecuadamente las alternativas para garantizar que puedan ser implementadas satisfactoriamente al realizar el escalamiento de laboratorio a planta. Considerando que el tratamiento requiere inicialmente un tanque de neutralización, se asignara un valor cuantitativo de 1 a 5 a cada tratamiento en función de la cantidad de tanques que requieran para su funcionamiento, como se puede observar en la tabla 11.

Tabla 11. Escala de valoración para el espacio requerido

<b>Cantidad de tanques</b>	<b>Calificación</b>
1 tanque pequeño	5
1 tanque mediano	4
1 tanque grande	3
2 tanques medianos	2
Más de 2 tanques medianos	1

Fuente: Elaboración propia.

- **Operatividad:** A la hora de poner en funcionamiento el tratamiento es importante tomar en consideración los requerimientos técnicos que este exige a los operarios para que funcione adecuadamente, esto tiene en consideración la dificultad para operar cotidianamente y para realizar un adecuado mantenimiento. Se asignará un valor entre 1 y 5 en función de la complejidad que representa poner en funcionamiento el tratamiento, como se aprecia en la tabla 12.

Tabla 12. Escala de valoración para la operatividad

<b>Complejidad de operación</b>	<b>Calificación</b>
Fácil manejo y mantenimiento	5
Fácil manejo y dificultad en el mantenimiento	4
Difícil manejo y fácil mantenimiento	3
Difícil manejo y mantenimiento	2
	1

Fuente: Elaboración propia.

- **Costo de implementación:** Uno de los factores que más influye en la decisión de desarrollar o no un proyecto es el dinero, esto implica tanto costos asociados como rentabilidad generada, la implementación de una PTAR para el laboratorio trae consigo una inversión de capital por lo que se busca seleccionar una alternativa que cumpla con los requerimientos técnicos sin afectar la viabilidad financiera de su implementación. Este parámetro se evaluará tomando en consideración los costos de inversión inicial y de mantenimiento y funcionamiento del tratamiento. En la tabla 13 se puede apreciar la valoración entre 1 y 5 de los costos de implementación.

Tabla 13. Escala de valoración para los costos de implementación

<b>Cantidad de tanques</b>	<b>Calificación</b>
Bajo costo de inversión y de operación	5
Bajo costo de inversión y alto costo de operación	4
Alto costo de inversión y bajo costo de operación	3
Alto costo de inversión y de operación	2
	1

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los parámetros de evaluación se asignó un porcentaje de relevancia a cada uno para satisfacer las necesidades propias del laboratorio donde se busca implementar, de esta manera se asignó un mayor valor de importancia a la eficiencia de remoción y a la generación de residuos puesto que la meta del laboratorio es cumplir la normativa y disminuir los residuos generados, el espacio requerido y los

costos de implementación son los siguientes en orden de importancia debido al poco espacio disponible en el laboratorio y a los requerimientos económicos, y finalmente la operatividad en el último rango de importancia puesto que los técnicos con que cuenta el laboratorio pueden ser capacitados para realizar el tratamiento. En la tabla 14 se pueden apreciar los porcentajes de relevancia otorgados a cada parámetro.

Tabla 14. Porcentajes de relevancia

<b>Parámetro</b>	<b>Porcentaje de relevancia</b>
Eficiencia de remoción	25%
Generación de residuos	25%
Espacio requerido	20%
Operatividad	10%
Costo de implementación	20%
<b>Total</b>	<b>1</b>

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la escala se realizó la ponderación de cada alternativa de tratamiento para determinar cuál presentaba una mayor ponderación, los resultados se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 15. Matriz de selección de alternativa de tratamiento

<b>Tratamiento\Parámetro</b>	<b>Eficiencia de remoción</b>	<b>Generación de residuos</b>	<b>Espacio requerido</b>	<b>Operatividad</b>	<b>Costo de implementación</b>	<b>Total*</b>
Coagulación-floculación	5	2	2	4	3	3.15
Electrocoagulación	4	4	4	5	5	4.3
Lodos activados	5	4	1	4	3	3.45
Ozonificación	4	5	4	5	2	3.95

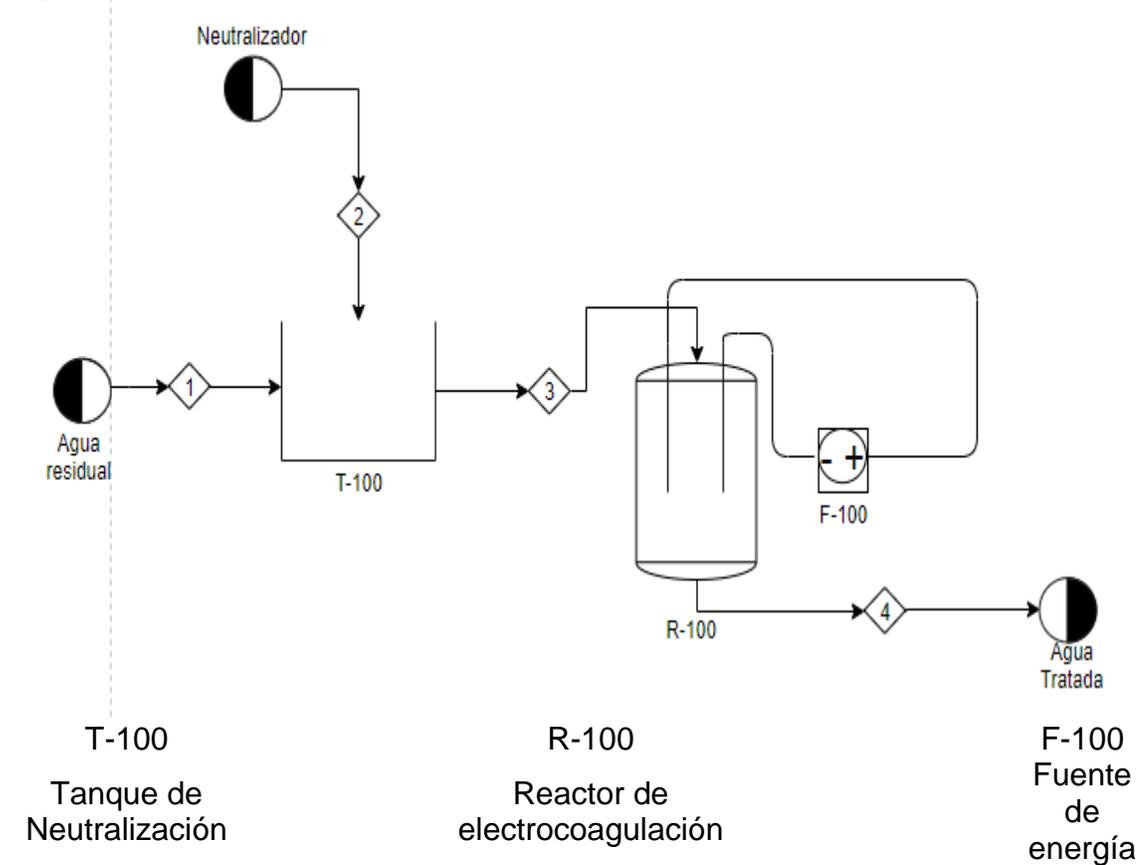
Fuente: Elaboración propia.

\* El total fue calculado multiplicando cada valor asignado al parámetro por su porcentaje de relevancia. (Eficiencia de remoción\*0.25+Generación de residuos\*0.25+Espacio requerido\*0.2+Operatividad\*0.1+Costo de implementación\*0.25)

Evaluadas las cuatro alternativas de tratamiento se selecciona la electrocoagulación al obtener un valor ponderado de 4.3; de esta manera el sistema de tratamiento quedaría conformado por una neutralización para aumentar el pH y finalmente un reactor de electrocoagulación donde se busca reducir contaminantes orgánicos y sólidos suspendidos.

En el siguiente diagrama se puede apreciar el sistema de tratamiento seleccionado

Figura 7. PFD sistema de tratamiento



Corriente	1	2	3	4
Composición	Agua sin tratar	Hidróxido de Sodio (sólido)	Agua neutralizada	Agua tratada
pH	2.9	-	7	7

Fuente: Elaboración propia

## 4. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Seleccionado el tratamiento se deben establecer las condiciones operacionales y los parámetros técnicos y de dimensionamiento de equipos, para ello se realizó un estado del arte donde se recopiló información y resultados obtenidos en estudios a partir del año 1997 hasta la fecha, para posteriormente realizar un análisis minucioso y establecer de acuerdo a las necesidades específicas del proyecto los parámetros técnicos y de diseño.

### 4.1 ESTADO DEL ARTE

La electrocoagulación se basa en el principio de la coagulación de sedimentos dentro del efluente a ser tratado mediante una electro disolución de ánodos solubles<sup>47</sup>, en este proceso los coagulantes se generan por la oxidación in situ de los electrolitos que se utilicen<sup>48</sup>. En las siguientes páginas se detallarán los parámetros técnicos y de operación que diferentes estudios previos han empleado para realizar el proceso de la electrocoagulación.

- Los electrodos de acero inoxidable se han estudiado para la remoción de metales (Ni, Zn) procedentes del proceso de revestimiento con níquel y zinc. Este estudio se centró en la evaluación de los parámetros operacionales como la densidad de corriente ( $2.25-9 \text{ mA cm}^{-2}$ ), pH inicial de 6 y un tiempo de retención (0-180 min). Los mejores resultados se presentaron con una densidad de corriente de  $9 \text{ mA cm}^{-2}$  (valores superiores no aumentaron el porcentaje de remoción) y un tiempo de residencia de 120 min para la eliminación de metales (Ni, Zn) en su totalidad y un 66% de remoción de materia orgánica<sup>49</sup>.
- Se han utilizado los electrodos de aluminio en paralelo para la separación de lodos, empleando también una entrada de aire comprimido con el fin de mantener un flujo de corriente turbulento y mejorar la eficiencia de disolución del electrodo aumentando el área de la superficie anódica<sup>50</sup>.
- Por otro lado, también se han evaluado electrodos de aluminio y acero inoxidable para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil que produce telas sintéticas de poliéster con el fin de remover los sólidos suspendidos (ss) y el DQO que se presentan en el agua. Se utilizaron 6 varillas de aluminio de

---

<sup>47</sup> GARDAIS, Daniel. Environnement et electricité. Avon: Dopee, 1990. ISBN 9782869950153

<sup>48</sup> MOLLAH, M. Yousuf A., et al. Electrocoagulation (EC) — science and applications. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 84, no. 1, p. 29-41

<sup>49</sup> KABDAŞLI, Işık, et al. Complexing agent and heavy metal removals from metal plating effluent by electrocoagulation with stainless steel electrodes. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 165, no. 1, p. 838-845

<sup>50</sup> MOLLAH, M. Yousuf A., et al. Electrocoagulation (EC) — science and applications. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 84, no. 1, p. 29-41

0.6cm de diámetro y 11 cm de longitud conectadas a una varilla común para formar el ánodo y el cátodo, la distancia entre estos es de 2mm. Con este diseño se obtuvieron porcentajes de remoción de 99% ss, 62% DQO en 5 min y 66% DQO pasados los 60 min<sup>51</sup>.

- Se evaluaron las condiciones operativas como el pH y la densidad de corriente de los electrodos de aluminio para la remoción de aguas con contenido de metales (Ni, Cu, Zn), determinando que estos pueden trabajar como neutralizadores para pH mayores a 4.7 y para mejorar su eficiencia en la remoción de metales se recomendó aplicar una concentración mínima de 600ppm de NaCl logrando obtener una remoción de metales del 98%<sup>52</sup>.
- Se evaluó el tratamiento de electrocoagulación en un agua sintética conformada por agua potable y harina de sangre en donde se pretendió remover el DQO, DBO y color de esta; El tratamiento se diseñó empleando electrodos de aluminio variando el caudal, la distancia entre los electrodos y el voltaje. Los mejores resultados se presentaron con una distancia de 1cm a 30V y un caudal de 50ml/min obteniendo porcentajes de remoción del 78.26% de DBO, 90.26% de DQO y 81.49% de color<sup>53</sup>.
- Los electrodos de aluminio también se han empleado para el tratamiento de agua potable con el objetivo de eliminar el hierro del grifo de agua tomando algunas variables constantes como el pH, la concentración de sal y la conductividad, y modificando el tiempo de retención (0-35 min), la densidad de corriente (0.01-0.04 A m<sup>-2</sup>) y la distancia entre los electrodos (0.0005-0.02 m). El porcentaje de remoción de hierro más alto fue del 99,2% en un tiempo de 35 min, con la mayor densidad de corriente y a una mínima distancia entre electrodos, así mismo se relacionó directamente el aumento de la densidad de corriente con el aumento en la eliminación de Hierro <sup>54</sup>.
- Los electrodos de aluminio se han usado para la eliminación del carbono orgánico total (TOC) de un efluente de la fabricación de gelatinas, para tener una buena eficiencia en la remoción se debió agregar bicarbonato al electrodo para poder precipitar el calcio contenido en el agua y reducir las incrustaciones, en este estudio las variables fueron el flujo de entrada de agua (1,5,7 L/h) y el tiempo de

---

<sup>51</sup> RAJU, G. Bhaskar, et al. Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation–electrooxidation. En: CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL. vol. 144, no. 1, p. 51-58

<sup>52</sup> MOUEDHEN, G., et al. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 150, no. 1, p. 124-135

<sup>53</sup> López Escobar Guisela Pamela. DISEÑO DE UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACION PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE YOGURT. 2014.

<sup>54</sup> GHOSH, D.; SOLANKI, H. and PURKAIT, M. K. Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 155, no. 1, p. 135-143

residencia (513,720 y 3600 s) con una densidad de corriente de 12.6 mA cm<sup>-2</sup> donde se obtuvieron porcentajes de remoción de TOC de acuerdo al flujo de entrada de 65%,41% y 37% respectivamente<sup>55</sup>.

- Se estudió que los electrodos de aluminio presentan pasivación en soluciones electrolíticas neutras a muy pequeñas densidades de corriente, se demostró que la capa de pasivación crece linealmente; se plantearon soluciones como agregar al electrodo iones de Cl<sup>-</sup> lo cual aumenta el costo del proceso de electrocoagulación y pone en riesgo su viabilidad económica, o emplear electrodos con la superficie rugosa disminuyendo la eficiencia de remoción pero permitiendo una mejor viabilidad económica<sup>56</sup>.
- En un estudio se utilizó el proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio para eliminar el Acetamiprid, un pesticida de tercera generación perteneciente a la clase de neonicotinoides, los cuales se han caracterizado por ser un problema para los microorganismos debido a su no biodegradabilidad y toxicidad. Se evaluó este método por sus grandes ventajas como un fácil manejo y la posibilidad de automatización; Se establecieron variables como el pH (7-11), tiempo de retención (0-60 min), densidad de corrientes (0.1-0.5 A dm<sup>-2</sup>) y concentración de sal (0.75 mg/L), con los resultados de este modelo experimental se planteó un diseño con la herramienta Minitab14 y se encontró que la eliminación máxima estaba alrededor del 97.6% bajo condiciones de: densidad de corriente 0.5 A dm<sup>-2</sup>, pH 7.77, tiempo de residencia 60 min y concentración de sal 0.75 mg/L<sup>57</sup>.
- Se estudió la implementación del proceso de electrocoagulación para las aguas residuales en los campos petroleros donde se investigó el valor del pH inicial (5.5, 7, 8.5), la concentración de polímero (HPAM), la densidad de corriente (4 mA m<sup>-2</sup>) y el tipo de electrodo (Al, Fe), se mostró que la mayor eficiencia se da con un pH neutro seguido del ácido y por último el alcalino, la concentración de polímero fue inversamente proporcional a la calidad del agua tratada, la densidad de corriente y el tiempo fueron directamente proporcional a la calidad del agua y el aluminio fue seleccionado como electrodo ya que formó floculos más grandes los cuales son más fáciles de coagular y asentar en menor tiempo que el hierro; la eficiencia de este tratamiento se evaluó midiendo la fracción de aceite y turbidez en función del

---

<sup>55</sup> LAKSHMI KRUTHIKA, N., et al. Efficacy of electrocoagulation and electrooxidation for the purification of wastewater generated from gelatin production plant. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL CHEMICAL ENGINEERING. Sep.vol. 1, no. 3, p. 183-188

<sup>56</sup> MECHELHOFF, Martin; KELSALL, Geoff H. and GRAHAM, Nigel J. D. Electrochemical behaviour of aluminium in electrocoagulation processes. En: CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE. May 24, vol. 95, p. 301-312

<sup>57</sup> JOHN, Sminu; SOLOMAN, Pooppana Antony and FASNABI, Puthenkattil Abdulkunji. Study on Removal of Acetamiprid from Wastewater by Electrocoagulation. En: PROCEDIA TECHNOLOGY. vol. 24, p. 619-630

tiempo. Se obtuvo una remoción del 98.99% de eliminación de aceite y 99.74% de turbidez<sup>58</sup>.

- Se estudió la viabilidad del proceso de electrocoagulación, nanofiltración o un proceso híbrido entre ellos para la eliminación de DQO, color, sólidos suspendidos y la turbiedad de las aguas residuales provenientes de la industria textil. Para este estudio se evaluaron tres tipos de electrodos (Al, Fe, Ti), se evaluó el tiempo de retención (0-300min) con una densidad de corriente de 20 mA cm<sup>-2</sup> y un pH neutro, el electrodo de aluminio dio la mejor eficiencia removiendo aproximadamente un 65% DQO, 94% color, 99% turbidez, 95% sólidos suspendidos. La electrocoagulación se presenta como un proceso que, combinándolo con el método de nano filtrado, aumenta la eliminación del DQO a un 81%. Se recomienda el proceso híbrido debido a la gran cantidad de tintes y sales que puede retener la membrana del proceso<sup>59</sup>.

- Se estudió la eliminación de DQO y color, junto con la reducción en la toxicidad del agua residual proveniente de las tintas de impresión mediante el proceso de electrocoagulación, este ha sido la primera investigación que se realizó con un DQO tan alto (10.000 mg/L), el proceso se realizó con electrodos de hierro y aluminio además las variables de evaluación fueron la densidad de corriente (20.83, 41.67, 83.33 mA cm<sup>-2</sup>) y el tiempo de retención (10,15,30 min) con un pH neutral. Aunque los dos electrodos presentaron eficiencias similares los mejores resultados se obtuvieron con el electrodo de aluminio a mayor tiempo y densidad de corriente, luego de este tiempo no se presentaron cambios significativos, estos resultados fueron 75% de DQO y 99% de color<sup>60</sup>.

- En los últimos años se han utilizado procesos híbridos para aumentar la eficiencia de los tratamientos de agua residual en aguas difíciles de tratar, los lixiviados de los vertederos se consideran residuos difíciles de tratar por su alto contenido orgánico, inorgánico y microbiano; Para este tipo de aguas es necesario aplicar un tratamiento híbrido. En este estudio se planteó un proceso de electrocoagulación y biofiltración; La electrocoagulación se desarrolló particularmente para eliminar DQO y ácidos húmicos del agua sin embargo también disminuyó otros contaminantes como la turbidez, el color, el Zn y el fósforo de manera significativa, este proceso se realizó usando un electrodo de aluminio como ánodo y un electrodo de acero inoxidable como cátodo con una densidad de

---

<sup>58</sup> LIU, Fei, et al. Experimental study on treatment of tertiary oil recovery wastewater by electrocoagulation. En: CHEMICAL ENGINEERING AND PROCESSING - PROCESS INTENSIFICATION. Oct.vol. 144, p. 107640

<sup>59</sup> TAVANGAR, Tohid, et al. Toward real textile wastewater treatment: Membrane fouling control and effective fractionation of dyes/inorganic salts using a hybrid electrocoagulation – Nanofiltration process. En: SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY. Jun 1, vol. 216, p. 115-12

<sup>60</sup> PAPADOPOULOS, Konstantinos P., et al. Treatment of printing ink wastewater using electrocoagulation. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. May 1, vol. 237, p. 442-448

corriente de 8 mA cm<sup>-2</sup> y un tiempo de retención de 20 min. Se eliminó aproximadamente un 37% DQO inicial, 15% de TOC, 6% de amonio, 60% color, 82% turbidez, 82% de fósforo, 95% de metales (Zn, Fe)<sup>61</sup>.

- Se analizó la combinación de electrodos de Aluminio y Hierro en industrias como la fabricación de materiales semiconductores teniendo aguas residuales del pulido mecánico-químico de estos, estas aguas contienen un alto contenido de sólidos suspendidos(ss) (aproximadamente de 4000 mg/L), turbidez, DQO y contenido de cobre. Para este proceso se realizaron pruebas con 5 tipos de electrodos distintos (Al-Al, Fe-Fe, Ti-Fe, Fe-Al, Al-Fe) para ver qué pareja establecía mejores porcentajes de remoción variando parámetros como el voltaje (10-30V) y el tiempo de residencia (30-90 min). Con un voltaje de 20 V y un tiempo de 40 min se obtuvieron los mejores porcentajes de remoción de 99% de cobre, 75% de DQO, 96.5% de turbidez y a los 30 minutos los sólidos suspendidos se sedimentaron con un tamaño de partícula promedio de 100 nm<sup>62</sup>.
- También se utilizó esta combinación de electrodos en una fábrica de papel para el tratamiento de aguas residuales de esta, con el fin de remover el DQO, color y el contenido de fenoles, esta experimentación se realizó con variables como el pH (2-10), densidad de corriente (70 mA cm<sup>-2</sup>) y la temperatura (20-60°C). Los mejores resultados se dieron con la menor temperatura ya que a medida que se aumenta se reduce el porcentaje de eliminación además de un pH inicial entre 5 y 7, se logró un porcentaje de remoción de fenoles mayor o igual al 94%, DQO mayor al 80% y color mayor al 75%<sup>63</sup>.
- Se estudió la posibilidad de combinar la electrocoagulación con la ozonificación como método híbrido para eliminar el color y el DQO de un agua residual proveniente de una destilería, se evaluaron los dos métodos por separado y la combinación de estos; mostrando un mejor resultado, el método híbrido en donde se emplearon cuatro diferentes combinaciones de electrodos (Fe-Fe, Fe-Al, Al-Fe, Al-Al), estableciendo variables como el pH inicial (2-10), concentración inicial de DQO (2500 mg/L), densidad de corriente (1-5 A m<sup>-2</sup>) y la distancia entre electrodos (1 cm). Los mejores resultados se presentan con los electrodos de Fe-Fe, un pH inicial de 6, concentración de DQO inicial de 2500 mg/L, densidad de corriente de 3 A m<sup>-2</sup> y una distancia de 1 cm entre los electrodos logrando un

---

<sup>61</sup> DIA, Oumar, et al. Hybrid process, electrocoagulation-biofiltration for landfill leachate treatment. En: WASTE MANAGEMENT. May.vol. 75, p. 391-399

<sup>62</sup> LAI, Chen L. and LIN, Sheng H. Electrocoagulation of chemical mechanical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. En: CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL. vol. 95, no. 1, p. 205-211

<sup>63</sup> KATAL, Reza and PAHLAVANZADEH, Hassan. Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. En: DESALINATION. vol. 265, no. 1, p. 199-205

porcentaje de remoción del 83% DQO al pasar las 4 horas y el color se eliminó completamente en 2 horas<sup>64</sup>.

- Se estudió el tratamiento de agua residual del yogurt condensado para eliminar el DQO, el DBO y los sólidos suspendidos con una combinación de electrodos de hierro y aluminio, para esto se evaluaron parámetros como el voltaje 6.0V y el tiempo de retención (0-60 min), se observó que a mayor tiempo de retención se obtuvo un mayor porcentaje de remoción y estos fueron aproximadamente 93% de DQO, 82% de DBO y 76% de sólidos suspendidos<sup>65</sup>.
- Para la industria de curtiembre se han utilizado procesos combinados de electrocoagulación y electrodiálisis para la remoción de parámetros como el DQO, el NH<sub>3</sub>, el Cr y el color de sus aguas; se realizó un análisis de las variables del tiempo de retención (25-150 min) y la densidad de corriente (7-14 mA cm<sup>-2</sup>) para electrodos de aluminio y hierro los cuales presentaron una eficiencia similar siendo los electrodos de aluminio mejores con porcentajes de remoción del 93% DQO, 100% de NH<sub>3</sub>, Cr y color. Todo esto con un tiempo de 45 minutos, pH de 6 ajustado con NaCl o HCl 0.01M según se necesite y una conductividad de 0.371 mS/cm; y para el hierro se presentaron porcentajes de 87% DQO, 100% de NH<sub>3</sub>, Cr y color. Todo esto con un tiempo de 75 minutos, pH de 7 ajustado con NaCl o HCl 0.01M según se necesite y una conductividad 1.5 mS/cm<sup>66</sup>.
- En la industria del petróleo se profundizó mucho en el proceso de electrocoagulación ya que por medio de este se pretendía separar las gotas de petróleo que se encuentran en el agua, esto se experimentó con el fin de ayudar a la producción y también puede servir para corregir daños ambientales. A continuación, se muestra la combinación de una unidad de electrocoagulación y una unidad electroquímica para eliminar las gotas de aceite del agua:

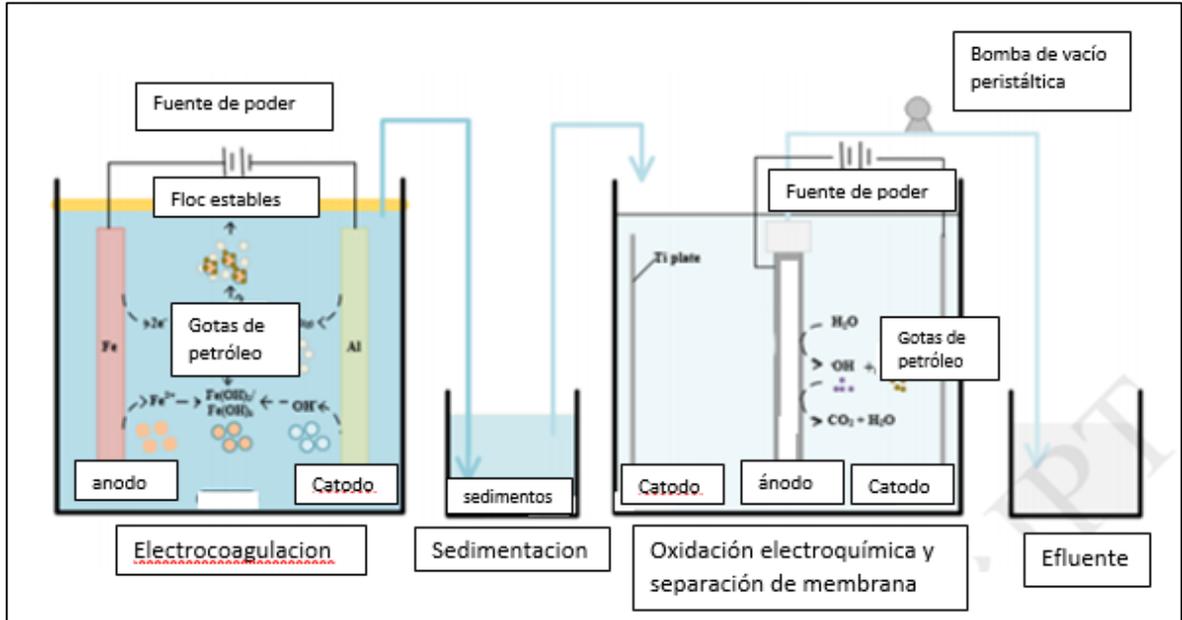
---

<sup>64</sup> ASAITHAMBI, P., et al. Ozone assisted electrocoagulation for the treatment of distillery effluent. En: DESALINATION. Jul 3, vol. 297, p. 1-7

<sup>65</sup> MEDINA CEVALLOS, Juan Felipe and PERALTA CALDERÓN, Marco Orlando. Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria. [1]:2015.

<sup>66</sup> DEGHLES, Abdalhadi and KURT, Ugur. Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process. En: CHEMICAL ENGINEERING & PROCESSING: PROCESS INTENSIFICATION. Jun.vol. 104, p. 43-50

Figura 8. Sistema de tratamiento para la eliminación de gotas de aceite



Fuente. LI,Chen, et al. 2018. A novel electrocoagulation (EC)-carbon membrane coupling with electrochemical anodic oxidation (CM/EAO) integrated system was designed and constructed for oily wastewater treatment.

Esta imagen muestra el proceso en donde entra el agua con un contenido de petróleo o aceite de 200 mg/L pasa por un proceso de electrocoagulación normal con electrodos de Fe-Al donde se elimina un 75% de aceite con una densidad de corriente  $2 \text{ mA cm}^{-2}$ , concentración de NaCl 0.5 g/L, un pH neutro y un tiempo de residencia de 60 minutos para luego pasar a una unidad electroquímica combinada con una membrana de separación y llegar a obtener un contenido de aceite de 6mg/L<sup>67</sup>.

- Se utilizó la combinación de electrodos de Aluminio y Titanio para evaluar el porcentaje de remoción de turbidez, DQO, tenso activo (MBAS) y fosfatos en el agua residual de una lavandería donde se utilizaron tres placas de aluminio entre dos placas de titanio con cargas opuestas para tener reacciones anódicas en el lado positivo y reacciones catódicas en el lado negativo todo esto variando parámetros de pH inicial (3-10), tiempo de residencia (0-30 min) y la corriente (0.8-2 A). con un pH inicial de (5-9) llevándolo a este valor con NaOH o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> según se necesite, un tiempo de residencia (10-30min) y una corriente de (1.2-2 V) se obtuvieron los

<sup>67</sup> LI, Chen, et al. Improved oil removal ability by the integrated electrocoagulation (EC)-carbon membrane coupling with electrochemical anodic oxidation (CM/EAO) system. En: COLLOIDS AND SURFACES A: PHYSICOCHEMICAL AND ENGINEERING ASPECTS. Dec 20, vol. 559, p. 305-313

mejores porcentajes de remoción tales como DBO>70%, turbidez>90%, tamaño de floculos: 20-70  $\mu\text{m}$ , tenso activos y fosfatos>90%<sup>68</sup>.

- En el siguiente trabajo se estudiaron las variables del pH inicial (4-7), la densidad de corriente (10-40  $\text{A m}^{-2}$ ), el tiempo de residencia (10-100 min) y la concentración inicial de fósforo (5.01-52.13 mg/L) para la eliminación de este último del agua residual doméstica, este proceso se realizó en un reactor tipo Batch utilizando un ánodo híbrido (Al-Fe) y un cátodo de Ti, la eliminación de fósforo en este proceso fue del 99.99% en condiciones pH inicial de 4, densidad de corriente 20  $\text{A m}^{-2}$  y un tiempo de residencia de 80 min y el pH del efluente de este proceso aumento hasta 8.8 por lo cual no requiere ajuste para verter en el alcantarillado<sup>69</sup>. También se estudiaron ánodos de aluminio que generaron una remoción del 99.98% con un pH inicial de 4, densidad de corriente 20  $\text{A m}^{-2}$  y un tiempo de residencia de 50 min y el pH del efluente aumento 8.52 mientras que con el hierro se generó un remoción igual con un pH inicial de 4 densidad de corriente 20  $\text{A m}^{-2}$  y un tiempo de residencia de 100 min y el pH del efluente aumento 10.62 el cual tendría que ser tratado antes de verter al alcantarillado<sup>70</sup>.
- Se utilizaron los electrodos de grafito (mineral muy suave, corta con presión muy ligera y tiene una gravedad especifica muy baja, es muy resistente al calor, es resistente a la acción de las bases y ácidos no oxidados en ausencia de oxígeno<sup>71</sup>) para el proceso de electro flotación con el fin de producir la mayor cantidad de burbujas de gas y formar lodos, este estudio se realizó variando la corriente:10-30V con un flujo tipo Batch, se llegó a la conclusión de que la cantidad de burbujas producidas en este proceso son una función de la potencia aplicada y la carga ionizante<sup>72</sup>.
- Se seleccionó trabajar con electrodos de hierro en el tratamiento de agua residual de una lavandería donde se evaluaron tres tipos de electrodos (Al, Fe, Ti) para remover Arsénico (III, V) del agua teniendo un pH (6-8) y una densidad de corriente (0.65 a 1.53  $\text{mA cm}^{-2}$ ), en ese rango de pH no se afecta el porcentaje de remoción de Arsénico (III, V) mientras que si se aumenta la densidad de corriente

---

<sup>68</sup> GE, Jiantuan, et al. New bipolar electrocoagulation–electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. En: SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY. vol. 36, no. 1, p. 33-39

<sup>69</sup> OMWENE, Philip Isaac; KOBYA, Mehmet and CAN, Orhan Taner. Phosphorus removal from domestic wastewater in electrocoagulation reactor using aluminium and iron plate hybrid anodes. En: ECOLOGICAL ENGINEERING. Nov.vol. 123, p. 65-73

<sup>70</sup> OMWENE, P. I. and KOBYA, M. Treatment of domestic wastewater phosphate by electrocoagulation using Fe and Al electrodes: A comparative study. En: PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION. May.vol. 116, p. 34-51

<sup>71</sup> Mineríaenlinea. 10-junio-. [Consultado el 24-junio-2020]. Disponible en: [https://mineriaenlinea.com/rocas\\_y\\_minerales/grafito/](https://mineriaenlinea.com/rocas_y_minerales/grafito/)

<sup>72</sup> BURNS, S. E.; YIACOUMI, S. and TSOURIS, C. Microbubble generation for environmental and industrial separations. En: SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY. vol. 11, no. 3, p. 221-232

se alcanza más rápido la remoción de Arsénico (III, V)<sup>73</sup>. Años después se estudió este proceso con la alimentación de aire donde se evaluaron placas y bolas de hierro como electrodos; Para este estudio se establecieron parámetros operacionales como el pH (6.6-8.6), corriente (0.1-0.5A), área del electrodo (210-630 cm<sup>2</sup>), caudal de aire (0-6 L/min) y un tiempo de retención (0-20 min). Las condiciones óptimas para este proceso fueron una corriente de 0.3A, un área de 210 cm<sup>2</sup>, un caudal de 6 L/min y un tiempo de retención de 20 minutos; el rango de pH no tuvo un efecto significativo para la eliminación del Arsénico cuyo porcentaje de remoción fue del 99.3% y el costo operativo de 1.55 dólares/m<sup>3</sup><sup>74</sup>.

- Investigaciones más avanzadas muestran que se han implementado celdas de combustible con un electrodo de hierro y aire para eliminar el arseniato de las aguas residuales; esta celda se diseñó para lugares donde sea muy difícil suministrar energía, se estudiaron también tres especies de electrolitos para agregar a la celda (NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaHCO<sub>3</sub>) de estos el electrolito más efectivo fue el NaCl y posteriormente se obtuvo que la celda de hierro y aire con 10 mm de NaCl puede tratar aproximadamente 300 L de solución de arseniato de 1 ppm y eliminar este hasta por debajo de 10 ppb durante un día, basado en tiempos de retención de 60 minutos<sup>75</sup>.

- En una fábrica de celulosa y pulpa de papel se estudió el proceso de electrocoagulación para reducir su DQO, absorbancia y turbidez del agua residual; Para este proceso se probaron dos combinaciones de electrodos (Al-Al, Fe-Fe) donde se obtienen eficiencias similares, se tomó la decisión de usar los electrodos de hierro, el proceso se realizó con un pH inicial de 6, tiempo de retención (10-90 min) y una densidad de corriente (153 A m<sup>-2</sup>), con estos parámetros establecidos se removió un 90% de turbidez y un 50% de DQO<sup>76</sup>.

- En el estudio de Boroski se presenta la electrocoagulación como un pretratamiento del agua residual de una industria farmacéutica que contiene residuos de peptona, materiales refractarios y alto contenido de sólidos suspendidos y disueltos para luego ser pasada a un reactor fotocatalítico, la electrocoagulación se realizó con electrodos de hierro manteniendo una densidad de corriente (763A m<sup>-2</sup>), variando el pH (4,5,6,7 y 10) ajustado con la adición de HCl y NaOH por agitación y

---

<sup>73</sup> RATNA KUMAR, P., et al. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. En: CHEMOSPHERE. vol. 55, no. 9, p. 1245-1252

<sup>74</sup> KOBAYA, M., et al. Arsenic removal from groundwater of Sivas-Şarkışla Plain, Turkey by electrocoagulation process: Comparing with iron plate and ball electrodes. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL CHEMICAL ENGINEERING. Jun.vol. 3, no. 2, p. 1096-1106

<sup>75</sup> KIM, Jung Hwan; MAITLO, Hubdar Ali and PARK, Joo Yang. Treatment of synthetic arsenate wastewater with iron-air fuel cell electrocoagulation to supply drinking water and electricity in remote areas. En: WATER RESEARCH. May 15, vol. 115, p. 278-286

<sup>76</sup> BOROSKI, Marcela, et al. The effect of operational parameters on electrocoagulation-flotation process followed by photocatalysis applied to the decontamination of water effluents from cellulose and paper factories. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 160, no. 1, p. 135-141

el tiempo de retención (30-120min); se presentaron los mejores resultados con un pH inicial de 6 y un tiempo de retención de 9 min con una eliminación de más del 90% en sólidos suspendidos y disueltos además de más del 86% en DQO<sup>77</sup>.

- Los electrodos de hierro también se utilizaron para mejorar la calidad del agua potable, en el siguiente estudio se presenta la eliminación de dureza cálcica y total de la red de agua de la ciudad de Anar ubicada al noroeste de la provincia de Kerman en Irán. Las variables para evaluar este proceso fueron pH (3,7,10), corriente (6,12,24V) y tiempo de retención (10-60min). Se presentan los mejores resultados con un pH de 10, una corriente de 12V y un tiempo de retención de 60 minutos donde se obtuvo un porcentaje de remoción del 98.2% para dureza cálcica y 97.4% para dureza total<sup>78</sup>.

- Se evaluó la eficiencia de la electrocoagulación en la eliminación de ácidos de cobre y resinas puras del agua residual generada en los molinos en el proceso de pulpa de papel, en este estudio se utilizaron electrodos de hierro con una dimensión de 70-50mm y se utilizó el modelo de mínimos cuadrados para evaluar las variables de pH inicial, densidad de corriente y tiempo de residencia, se presentaron los mejores resultados con un pH inicial de 5, una corriente de 2V y un tiempo de retención de 60 segundos para remover entre 72% y 97% de ácidos de cobre y hasta un 97% de resinas puras del agua<sup>79</sup>.

- Se estudió el tratamiento de agua residual del yogurt condensado para eliminar el DQO con electrodos de hierro, este estudio presentó una idea innovadora debido a que los lodos formados en el proceso de electrocoagulación se pueden utilizar como materia prima en la producción de pigmentos cerámicos de color negro y marrón, para esto se evaluaron parámetros como la densidad de corriente (20-30 mA cm<sup>-2</sup>), el tiempo de retención (0-90 min), la concentración inicial (6500mg/L), el pH inicial (4.53) y la adición de polielectrolitos probado tanto en la superficie del ánodo como en la del cátodo. (0.05 a 0.2M de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Se observó que la eliminación de DQO es directamente proporcional al aumento de la densidad de corriente y el tiempo de retención e inversamente proporcional a la adición de

---

<sup>77</sup> BOROSKI, Marcela, et al. Combined electrocoagulation and TiO<sub>2</sub> photoassisted treatment applied to wastewater effluents from pharmaceutical and cosmetic industries. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. Feb.vol. 162, no. 1, p. 448-454

<sup>78</sup> MALAKOOTIAN, M.; MANSOORIAN, H. J. and MOOSAZADEH, M. Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. En: DESALINATION. vol. 255, no. 1, p. 67-71

<sup>79</sup> VEPSÄLÄINEN, Mikko, et al. Removal of toxic pollutants from pulp mill effluents by electrocoagulation. En: SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY. vol. 81, no. 2, p. 141-150

electrolitos, la cual presento mejores resultados al probarse en la superficie del cátodo, obteniendo una eliminación del 84% de DQO<sup>80</sup>.

- Normalmente el proceso de electrocoagulación no es un proceso continuo, el estudio de Tezcan es el primero que se plantea empleando un reactor de flujo continuo tipo tornillo con electrodos de hierro para remover el DQO del tratamiento de agua residual de una fábrica de producción de suero de queso, los factores operativos fueron el pH, el tiempo de retención y la densidad de corriente, donde se llegó a la conclusión de que el tiempo de retención y la densidad de corriente aumentan linealmente a la eliminación del DQO mientras que el pH aumenta de manera exponencial. Se obtuvo un porcentaje de remoción del 86.4% de DQO, con una concentración inicial de 15500 mg/L<sup>81</sup>.
- Se utilizaron sistemas híbridos de electrocoagulación y membrana dinámica para el tratamiento de aguas residuales oleosas, para esto se probaron electrodos de aluminio y hierro pero el hierro tuvo un mejor rendimiento, los parámetros operacionales fueron densidad de corriente ( $4\text{-}30\text{ mA cm}^{-2}$ ) y los siguientes valores de pH (3.2, 6.2, 7.1, 9.7), las tasas de eliminación de aceite del efluente aumentaron con el aumento de la densidad de corriente y la disminución del pH inicial se presentó una tasa de eliminación de aceite del 65%<sup>82</sup>.
- Se ha diseñado un reactor con un proceso híbrido de electrocoagulación utilizando electrodos de hierro y agregando ozono como gas para la decoloración de agua residual con contenido de tinte marrón, con variables operativas como el pH, la concentración inicial de sal y colorante, la densidad de corriente, la inyección de gas y la velocidad de decoloración. En óptimas condiciones se descubrió que la decoloración solo dependió de la variable del tiempo (30 minutos) para eliminar totalmente<sup>83</sup>.
- Se optimizó la eliminación del carbono orgánico total (TOC) de las aguas residuales provenientes de la industria litográfica mediante la combinación del proceso de electrocoagulación y un reactor foto catalítico, para este proceso se utilizaron electrodos de hierro y con las variables del pH y densidad de corriente se

---

<sup>80</sup> TEZCAN UN, Umran and OZEL, Emel. Electrocoagulation of yogurt industry wastewater and the production of ceramic pigments from the sludge. En: SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY. Dec 13, vol. 120, p. 386-391

<sup>81</sup> TEZCAN UN, Umran, et al. Continuous electrocoagulation of cheese whey wastewater: An application of Response Surface Methodology. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. Dec 15, vol. 146, p. 245-250

<sup>82</sup> YANG, Tao, et al. Improving performance of dynamic membrane assisted by electrocoagulation for treatment of oily wastewater: Effect of electrolytic conditions. En: DESALINATION. May 1, vol. 363, p. 134-143

<sup>83</sup> BEHIN, Jamshid, et al. Ozone assisted electrocoagulation in a rectangular internal-loop airlift reactor: Application to decolorization of acid dye. En: JOURNAL OF WATER PROCESS ENGINEERING. Dec.vol. 8, p. 171-178

estableció una correlación la cual presento un coeficiente de correlación alto  $R^2$  de 0.9231 y mediante este proceso se obtuvo una eliminación del 65% en 30 minutos<sup>84</sup>.

- Al pasar los años se han necesitado obtener mayores eficiencias, por ello se ha estudiado la combinación del proceso de electrocoagulación con otros procesos llegando a ser parte de un tratamiento electroquímico, en este estudio se desarrollaron diversos procesos de electrocoagulación híbrido con electrodos de hierro, estos procesos fueron: electrocoagulación, foto electrocoagulación, peroxi-electrocoagulación y foto-peroxi-electrocoagulación; todos estos se evaluaron para la eliminación del color, el DQO y el consumo de energía en los efluentes de una destilería; El proceso de peroxi-electrocoagulación presentó los mejores resultados de remoción con un 100% de color y 86% de DQO con un consumo de energía de 1.20 kWh/m<sup>3</sup> estableciendo las siguientes variables: densidad de corriente 0.13 A dm<sup>-2</sup>, concentración inicial de DQO 2500 ppm, pH inicial de 7, concentración H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 234mg/L, velocidad de agitación 100 rpm y tiempo de retención 240 min<sup>85</sup>.

- El Titanio es uno de los metales de transición los cuales presentan propiedades como su alta dureza, puntos de ebullición y fusión elevados además de que son muy buenos conductores de energía y calor<sup>86</sup>. Se ha utilizado como electrodo mostrado como algo novedoso en el proceso de la electrocoagulación sustituyendo a los electrodos tradicionales de hierro y usando como complemento un electrodo de aluminio como ánodo de sacrificio en el proceso esto con el fin de eliminar los ácidos húmicos del agua, los floculos generados por este proceso TiO<sub>2</sub> muestran una alta capacidad fotocatalítica por lo cual pueden reciclarse siendo más eficiente que los procesos con aluminio y hierro, para este proceso se evaluaron las variables de tiempo de residencia (0-140min) y corriente (0,0.1,1.3A) y se estableció que la eliminación de ácidos húmicos aumento significativamente con el aumento de la corriente<sup>87</sup>.

A continuación, se presenta la tabla resumen con los datos más relevantes del estado del arte de acuerdo a cada autor.

---

<sup>84</sup> SUÁREZ-ESCOBAR, Andres; PATAQUIVA-MATEUS, Alis and LÓPEZ-VASQUEZ, Andrés. Electrocoagulation—photocatalytic process for the treatment of lithographic wastewater. Optimization using response surface methodology (RSM) and kinetic study. En: CATALYSIS TODAY. May 15, vol. 266, p. 120-125

<sup>85</sup> ASAITHAMBI, P., et al. Performance evaluation of hybrid electrocoagulation process parameters for the treatment of distillery industrial effluent. En: PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION. Nov.vol. 104, p. 406-412

<sup>86</sup> OUTLETMINERO. Titanio - Ti. [0]. febrero-. Disponible en: <https://outletminero.org/titanio/>

<sup>87</sup> CHEN, Xin and DENG, Huiping. Removal of humic acids from water by hybrid titanium-based electrocoagulation with ultrafiltration membrane processes. En: DESALINATION. Aug 15, vol. 300, p. 51-57

Tabla 16. Estado del arte

Autor	Material del Electrodo	Contaminantes	Condiciones	Resultados
BURNS,S. E (1997)	Grafito	Producción de burbujas Formación de lodos	Voltaje: 20-30 V Flujo tipo Batch	la cantidad de burbujas producidas en este proceso es una función de la potencia aplicada y la fuerza ionizante
MOLLAH,M. (2001)	Aluminio (Al)	Separación de lodos	Electrodos de aluminio en paralelo agregando una corriente comprimida de aire	Se le agrega aire comprimida para mantener un flujo turbulento y mejorar la eficiencia de disolución del electrodo aumentando el área de la superficie anódica
LAI,Chen (2003)	Ánodo: Aluminio (Al) Cátodo: Hierro(Fe)	Sólidos suspendidos (SS) DQO, Turbidez y Cobre	Voltaje de: 10-30 V mayor eficiencia 20 V Tiempo de residencia: 30-90 min Mejor tiempo: 40 min	40 min 99% cobre 75% DBO 96.5% turbidez 30 min sólidos suspendidos sedimentados Tp= 68-120 nm
GE,Jiantuan, (2004)	Titanio(Ti) Aluminio (Al)	Turbidez, DQO, Tensoactivo (MBAS) y Fosfatos	pH: 5-9 NaOH o H2SO4 Tiempo de residencia: 10-30 min corriente: 1.2-2 A Alternada	DBO>70% Turbidez>90% floculos de 20-70 µm Tensoactivo>90% Fosfatos>90%
RATNA KUMAR,P.,(2004)	Hierro	Arsénico (III-V)	pH: 6-8 Densidad de corriente: 0.65-1.53 mA cm-2	Remoción de Arsenio (III-V)> 99%
RAJU,G. Bhaskar (2008)	Aluminio	Sólidos suspendidos (ss) DQO	Densidad de corriente: 12-30 mA cm-2 Tiempo de residencia: 5-60 min	99% de SS 62% de DQO a 5 min 66% de DQO a 60 min

Tabla 16. (Continuación)

Autor	Material del Electrodo	Contaminantes	Condiciones	Resultados
MOUEDHEN,G (2008)	Aluminio	Metales (Ni, Cu, Zn)	pH Densidad de corriente	El electrodo sirve como neutralizador con pH>4.7 Densidad de corriente inversamente proporcional al tiempo de residencia Electrodo con concentración de Cl- 60 ppm mínimo 98% metales
BOROSKI,Marcela, (2008)	Hierro	DQO y Turbidez	pH=6 tiempo de residencia: 10-90 min densidad de corriente: 153 A m <sup>-2</sup>	50% DQO 90% Turbidez
GHOSH,D (2008)	Aluminio	Fe (II)	Tiempo de residencia: 35 min Densidad de corriente: 0.01-0.04 A m <sup>-2</sup> Distancia de electrodos: 0.0005-0.02 m	99.2% Fe (II)
BOROSKI,Marcela (2009)	Hierro	Sólidos suspendidos y disueltos DQO	Tiempo de residencia: 90 min Densidad de corriente: 763 A m <sup>-2</sup> Tamaño: 12.5*2.5*0.1 cm	Sólidos suspendidos y disueltos > 90% DQO>86%
KABDAŞLI,Işık, (2009)	Acero inoxidable	Materia orgánica Metales (Ni, Zn)	Tiempo de residencia: 120 min pH: 6 Densidad de corriente: 9 mA cm <sup>-2</sup>	Materia orgánica=66% Metales (Ni, Zn) en su totalidad

Tabla 16. (Continuación)

Autor	Material del Electrodo	Contaminantes	Condiciones	Resultados
MALAKOOTIAN,M (2010)	Hierro	Dureza total y dureza cálcica	Tiempo de residencia: 60 min pH: 10 Corriente: 12 V	Dureza cálcica =98.2% Dureza total=97.4%
KATAL,Reza and PAHLAVANZADEH,Hassan (2011)	Aluminio Hierro	DBO Color Fenoles	Densidad de corriente: 70 mA cm <sup>-2</sup> pH: 5-7 temperatura 20°C	DQO>80% Fenoles>94% Color>75%
VEPSÄLÄINEN,Mikko (2011)	Hierro	Ácidos de cobre Resinas puras	Tiempo de residencia: 60 s pH: 5 corriente: 2 V	Ácidos de cobre 72-97% Resinas puras<=97%
CHEN,Xin and DENG,Huiping (2012)	Titanio	Ácidos húmicos	Tiempo de residencia: 0-140 min Corriente: 0,0.1,1,3 A	Se eliminaron exitosamente los ácidos húmicos
ASAITHAMBI,P., et al (2012)	Hierro	DQO y color	Tiempo de residencia: 0-4 Hr Densidad de corriente: 3 A m <sup>-2</sup> pH: 6 Distancia: 1 cm Concentración inicial: 2500 DQO	100% color 83% DQO
LAKSHMI KRUTHIKA,N., (2013)	Aluminio	TOC	Tiempo de residencia: 513,720,3600 s Densidad de corriente: 12.6 mA cm <sup>-2</sup> Caudal: 1,5,7 L/Hr	65% TOC con caudal de 1 L/Hr 41% TOC con caudal de 5 L/Hr 37% TOC con caudal de 7 L/Hr

Tabla 16. (Continuación)

Autor	Material del Electrodo	Contaminantes	Condiciones	Resultados
TEZCAN UN, Umran and OZEL, Emel. (2013)	Hierro	DQO y formación de lodo	Tiempo de residencia: 90 min Densidad de corriente: 30 mA cm <sup>-2</sup> pH inicial: 4.53 concentración inicial DQO: 6500 mg/L polielectrolitos: 0.05M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	84% DQO Formación de lodos como materia prima para pigmentos de cerámica, colores negro y marrón.
TEZCAN UN, Umran. (2014)	Hierro	DQO	Tiempo de retención y densidad de corriente aumenta linealmente a la eliminación del DQO y el pH aumenta de forma exponencial	86.4% DQO
López Escobar Guisela Pamela. (2014)	Aluminio	DQO DBO SS	Voltaje 6V Tiempo de residencia: 60 min	93% DQO 82% DBO 76% SS
MEDINA CEVALLOS, Juan Felipe and PERALTA CALDERÓN, Marco Orlando (2015)	Aluminio Hierro	DQO DBO color	Voltaje 30 V	78% DBO 90% DQO 81% color
YANG, Tao, et al. (2015)	Hierro	aceite	pH: 3.2 densidad de corriente: 30 mA cm <sup>-2</sup>	65% aceite
BEHIN, Jamshid. (2015)	Hierro	Color	Tiempo de residencia: 30 min	Se eliminó completamente el color en el tiempo establecido

Tabla 16. (Continuación)

Autor	Material del Electrodo	Contaminantes	Condiciones	Resultados
KOBYA,M., (2015)	Hierro	Arsénico	pH: 6.6-8.6 tiempo de residencia: 0-20 min área: 210 cm <sup>2</sup> corriente: 0.3 A caudal: 6 L/min	99.3% Arsenio
SUÁREZ-ESCOBAR, Andrés; PATAQUIVA-MATEUS, Alis and LÓPEZ-VASQUEZ, Andrés. (2016)	Hierro	TOC	Tiempo de residencia: 30 min Correlación entre el tiempo de residencia y la densidad de corriente.	65% TOC
DEGHLES, Abdalhadi and KURT, Ugur. (2016)	Hierro	DQO, NH <sub>3</sub> , Cr y color	Tiempo de residencia: 75 min pH inicial: 7 conductividad: 1.5 mS/cm	87% DQO 100% NH <sub>3</sub> , Cr y color
DEGHLES, Abdalhadi and KURT, Ugur. (2016)	Aluminio	DQO, NH <sub>3</sub> , Cr y color	Tiempo de residencia: 45 min pH inicial: 6 conductividad: 0.371 mS/cm	93% DQO 100% NH <sub>3</sub> , Cr y color
JOHN, Sminu; SOLOMAN, Poopana Antony and FASNABI, Puthenkattil Abdukunji. (2016)	Aluminio	Acetamiprid (pesticida)	Tiempo de residencia: 60 min pH: 7.77 densidad de corriente: 0.5 A dm <sup>-2</sup> concentración de sal: 0.75 mg/L	97.6% modelando el modelo experimental.

Tabla 16. (Continuación)

Autor	Material del Electrodo	Contaminantes	Condiciones	Resultados
ASAITHAMBI,P., (2016)	Hierro	DQO y color	Tiempo de residencia: 240 min Densidad de corriente: 0.13 A dm <sup>-2</sup> pH: 7 Concentración inicial DQO: 2500 ppm Concentración inicial H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 234 mg/L Velocidad de agitación : 100 rpm	86% DQO 100% Color Consumo de 1.20 kWh/m <sup>3</sup>
KIM,Jung Hwan; MAITLO,Hubdar Ali and PARK,Joo Yang (2017)	Hierro y aire comprimido con 10mm NaCl	Arseniato	Tiempo de retención: 60 minutos Caudal: 300 L/día	99% arseniato
OMWENE, Philip Isaac; KOBYA, Mehmet and CAN, Orhan Taner. (2018)	Hierro y aluminio Titanio	Fosforo	Tiempo de retención 80 min pH inicial: 4 densidad de corriente: 20 A m <sup>-2</sup>	99.99% P pH final 8.8
OMWENE,P. I. and KOBYA,M. (2018)	Hierro	Fosforo	Tiempo de residencia: 100 min pH inicial: 4 densidad de corriente: 20 A m <sup>-2</sup>	99.98% P pH final 8.52
OMWENE,P. I. and KOBYA,M. (2018)	Aluminio	Fosforo	Tiempo de residencia: 50 min pH inicial: 4 densidad de corriente: 20 A m <sup>-2</sup>	99.98% P pH final 10.62

Tabla 16. (Continuación)

Autor	Material del Electrodo	Contaminantes	Condiciones	Resultados
LI,Chen, (2018)	Hierro Aluminio	Petróleo o aceite	Tiempo de residencia: 60 min pH inicial: neutro densidad de corriente: 2 mA cm <sup>-2</sup> concentración de NaCl 0.5g/L	75% gotas de petróleo o aceite
DIA,Oumar, (2018)	Aluminio Acero inoxidable	DQO, TOC, N-NH <sub>4</sub> , color, turbidez, P, Zn, Fe	Tiempo de residencia: 20 min Densidad de corriente: 8 mA cm <sup>-2</sup>	37% DQO 15% TOC 6% N-NH <sub>4</sub> 60% color 82% turbidez 82% P 95% Zn, Fe
LIU,Fei. (2019)	Aluminio	Aceite y turbidez	Tiempo de residencia: 28 min Densidad de corriente 4 mA m <sup>-2</sup>	98.99% aceites 99.74% turbidez
TAVANGAR,Tohid, (2019)	Aluminio	DQO, Turbidez, SS y color	Tiempode residencia: 0-300 min Densidad de corriente: 20 mA cm <sup>-2</sup>	65% DQO 94% color 99% turbidez 95% SS
PAPADOPOULOS,Konstantinos P., (2019)	Aluminio	DQO y color	Tiempo de residencia: 30 min Densidad de corriente 83.33 mA cm <sup>-2</sup>	75% DQO 99% color

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS

Una vez realizada la recopilación de información bibliográfica se procede a realizar el dimensionamiento de los equipos, así como el establecimiento de los parámetros operacionales para el tratamiento; para iniciar, se debe considerar el volumen de agua a tratar el cual es de 2.2174 m<sup>3</sup> equivalente al agua desechada el día de lavado. Dicha cantidad implica emplear un tanque cuyas dimensiones considerando un 20% de sobredimensionamiento (2.6609 m<sup>3</sup>) superan los 1.3 m, valores que sobrepasan el espacio disponible en el laboratorio considerando adicionalmente que se deben emplear dos tanques, el primero para el proceso de neutralización y el segundo para la electrocoagulación. De acuerdo a lo anterior se establecerán dimensiones que permitan ubicar en el laboratorio ambos tanques.

**4.2.1 Tanque de neutralización.** Basándose en el autor William Antonio Lozano y su curso “Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales”<sup>88</sup> se establecen algunas condiciones iniciales, estas son, emplear preferentemente un tanque circular y con diámetro igual a la profundidad, si se emplea un mezclador mecánico que este emplee una potencia de entre 40 y 80 W por m<sup>3</sup> de tanque para garantizar la mezcla completa del neutralizador, y emplear un tiempo de residencia entre los 5 y los 30 minutos. Adicionalmente se van a tener en cuenta 2 condiciones más, la primera, referente al ancho con que se cuenta en la entrada para ingresar al laboratorio, este valor no puede superar los 0.8 m de ancho, y el segundo es la altura máxima con que se cuenta en el laboratorio la cual no debe superar los 2.24 m.

Teniendo en cuenta todo lo anterior se procede a calcular las dimensiones; tomando como objetivo que el tanque cubra el mayor volumen posible para reducir las repeticiones que se deben hacer para evacuar en su totalidad las aguas de desecho. Se plantea dimensionar de tal forma que el proceso deba repetirse cuatro veces para completar el volumen a desechar lo cual implica manejar un volumen incluyendo el sobredimensionamiento de 0.6652 m<sup>3</sup> y definiendo una altura del tanque de 1.6 m para facilitar el manejo del equipo por el personal y sin que el equipo supere la altura máxima del laboratorio, se emplea la ecuación 5. para calcular el diámetro del equipo.

Ecuación 5. Diámetro del equipo

$$d = 2 * \sqrt{\frac{V}{h * \pi}}$$

---

<sup>88</sup> LOZANO RIVAS, William Antonio. Diseño De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales. Diseño De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales. Bogotá, Colombia: 2012.

$$d = 2 * \sqrt{\frac{0.6652 \text{ m}^3}{1.6 \text{ m} * \pi}}$$

$$d = 0.728 \text{ m}$$

De esta manera se empleará un tanque cilíndrico de 1.6 m de altura y un diámetro de 0.728 m. A continuación, se debe escoger el material del equipo; considerando factores como la facilidad de transporte e instalación, así como el costo y la resistencia a los ataques químicos de álcali y ácidos, se plantea emplear un tanque de Polietileno de alta densidad, el cual es altamente resistente a ataques químicos y actualmente se utiliza industrialmente para contenedores de líquidos.

Finalmente, se deben determinar tres parámetros operacionales correspondientes al producto químico a utilizar, el tiempo de residencia en el tanque y la potencia del mezclador requerido; de acuerdo con la bibliografía recopilada, se plantea emplear el hidróxido de sodio como neutralizador debido a la baja producción de lodos residuales, este si bien genera un costo adicional con respecto a otras alternativas debido al bajo volumen a tratar no genera valores significativos para no utilizarlo, el objetivo del tanque de neutralización es establecer el pH del agua lo más cercano a 7 no solo para cumplir con la normatividad sino porque los estudios presentados previamente indican la obtención de mejores porcentajes de remoción en aguas neutras. La potencia como se mencionó anteriormente debe encontrarse entre los 40 y los 80 W por m<sup>3</sup> de tanque, con esto en consideración se busca emplear la mayor potencia de mezclado para reducir el tiempo de residencia disminuyendo el tiempo de duración del proceso completo considerando que se deben realizar cuatro repeticiones. De esta manera se realiza una regla de tres para ajustar los 80 W por m<sup>3</sup> al volumen del tanque. En la ecuación 6 se puede apreciar el resultado.

Ecuación 6. Potencia

$$P = \frac{0.6652 \text{ m}^3 * 80 \text{ W}}{1 \text{ m}^3}$$

$$P = 53.22 \text{ W} \approx 55 \text{ W}$$

Empleando una alta potencia de mezclado se espera que el tiempo de residencia se reduzca, sin embargo, es recomendable realizar procedimientos experimentales para ajustar los parámetros, esto implica realizar las curvas de titulación en laboratorio, se recomienda un tiempo de residencia de entre 5 y 10 minutos para neutralizar el agua.

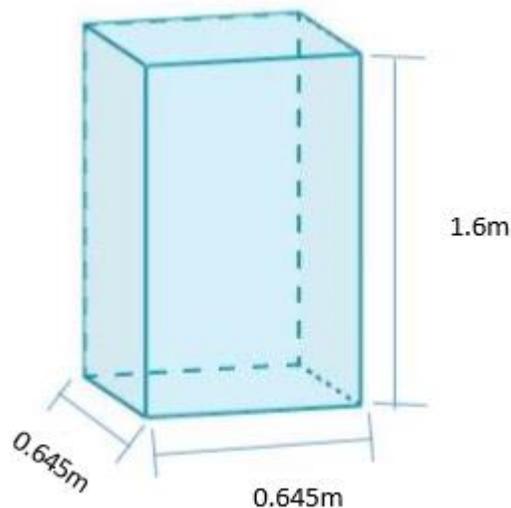
**4.2.2 Tanque de electrocoagulación.** Al igual que con el tanque de neutralización se plantea el uso de una altura de 1.6 m, sin embargo, el diseño de este tanque será rectangular con el objetivo de facilitar el diseño de los electrodos en forma de placas. Considerando lo anterior se procede a calcular la longitud de la base en la siguiente ecuación.

Ecuación 7. Longitud del tanque

$$l = \sqrt{\frac{0.6652 \text{ m}^3}{1.6 \text{ m}}}$$
$$l = 0.645 \text{ m}$$

Las dimensiones del tanque serian entonces una base cuadrada de 0.645 m de longitud y una altura de 1.6 m. Este proceso se realizará como reactor tipo Batch debido al bajo volumen a tratar y que la operación se realiza una vez al mes. En la siguiente figura se puede apreciar las dimensiones del tanque.

Figura 9. Dimensiones del tanque de electrocoagulación



Fuente: Elaboración propia

El material a emplear en este tanque será el polimetilmetacrilato debido a su alta resistencia mecánica y química, sus principales ventajas son que al ser plástico no es conductor eléctrico evitando costos asociados a recubrimientos si se emplease un tanque metálico, y que es un material altamente transparente lo cual a términos prácticos facilita la visualización del proceso y la revisión del estado de los electrodos y del tanque ayudando al mantenimiento del equipo.

Ahora bien, para el dimensionamiento de los electrodos se busca que estos encajen en el tanque para que puedan ajustarse y retirarse fácilmente, así como que se encuentren totalmente sumergidos en el agua a tratar generando la mayor área de contacto para el proceso. De esta manera se determinó una longitud de 0.6m y un espesor de 3mm, mientras que la altura se determinó mediante la siguiente ecuación considerando el volumen real de líquido a tratar en el tanque (volumen de agua sin el sobredimensionamiento), esto con la finalidad de no sobredimensionar la altura de los electrodos, pero asegurándose de que los mismos se encuentren en su totalidad sumergidos.

Ecuación 8. Altura de los electrodos

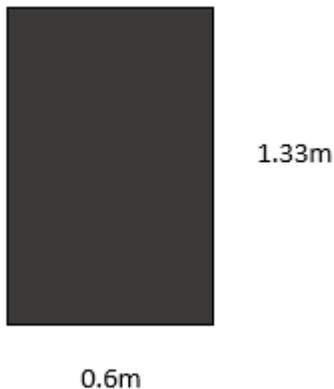
$$h = \frac{V_{real}}{l^2}$$

$$h = \frac{0.5544 \text{ m}^3}{(0.645 \text{ m})^2}$$

$$h = 1.33 \text{ m}$$

En la siguiente figura se pueden apreciar las dimensiones de los electrodos.

Figura 10. Dimensiones de los electrodos



Fuente: Elaboración propia

Para la determinación del número de electrodos se utilizó la siguiente ecuación.

Ecuación 9. Número de electrodos<sup>89</sup>

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{Ancho de celda}) - 2 * (\text{Dist. electrodos a cara lateral})}{(\text{Dist. maxima entre electrodos} + \text{espesor de placa})}$$

Todo en milímetros; En el mismo estudio<sup>90</sup> se determinó que una separación entre electrodos de 10 mm resulta ser lo más conveniente para obtener altos porcentajes de remoción de DQO. Así mismo se estableció una distancia de 2 cm entre las caras laterales del tanque y los electrodos, de este modo aplicando la ecuación se obtiene que.

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(645 \text{ mm}) - 2 * (20 \text{ mm})}{(10 \text{ mm} + 3 \text{ mm})}$$

$$\text{Número de electrodos} = 46.54 \approx 47$$

Considerando la cantidad de electrodos se presenta la dificultad de un aumento del 20% del volumen debido al espacio ocupado por estos, dejando sin sobredimensionamiento de seguridad al electrocoagulador; para solucionarlo se decide reducir la altura de los electrodos para disminuir el volumen que estos ocupan. La altura de 0.8 m permite tener un 10% de volumen libre que será empleado como seguridad. Las nuevas dimensiones se muestran en la figura 11.

Figura 11. Dimensiones de los electrodos corregida



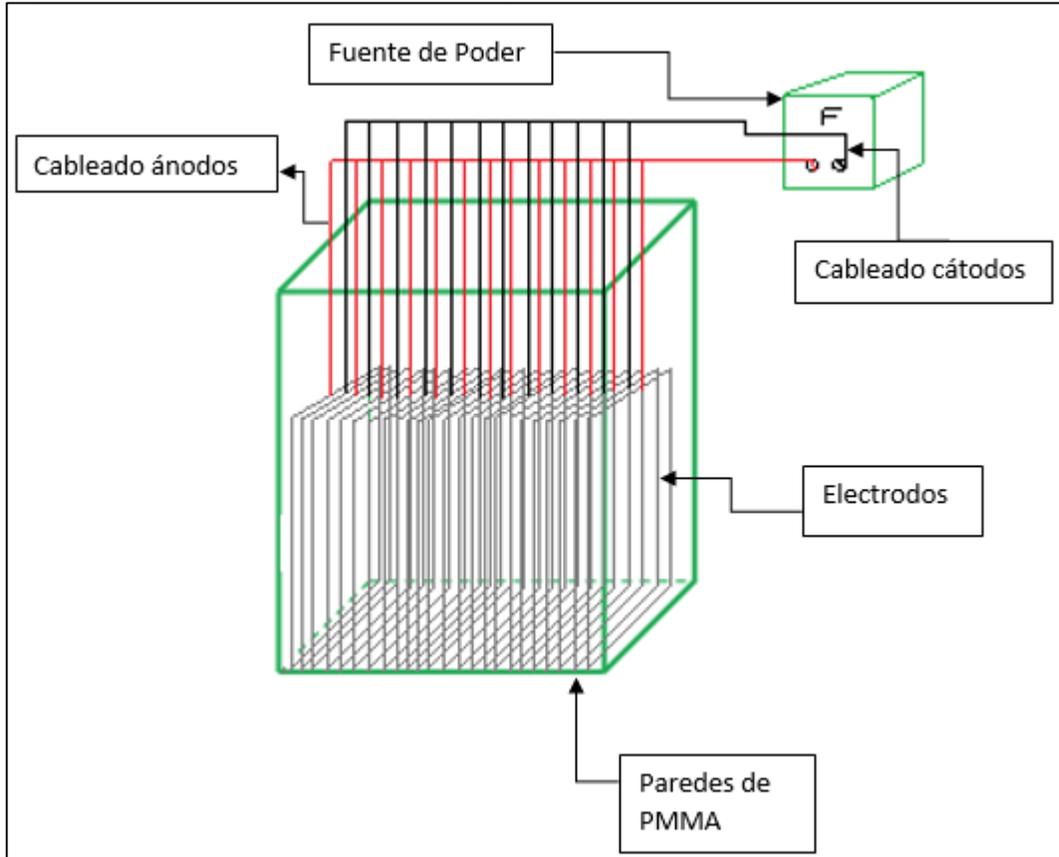
Fuente: Elaboración propia

En la figura 12 se puede observar el esquema final del electrocoagulador con los electrodos.

<sup>89</sup> ARANGO RUIZ, Álvaro y GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*. 2007, vol. 43, nro. 147. pp. 56-67

<sup>90</sup> *Ibid.*, p. 58.

Figura 12. Esquema del electrocoagulador



Fuente: Elaboración propia

Teniendo las dimensiones del tanque, de los electrodos y la cantidad necesaria de estos, se procede a determinar los parámetros operacionales, estos son el voltaje a aplicar, el material de los electrodos y el tiempo de residencia. La densidad de corriente si bien se ha tomado como variable en diversos estudios teniendo un área de electrodo constante y con el valor de resistividad del material empleado para estos se puede calcular, aumentando el voltaje se aumenta la intensidad de corriente y por ende la densidad de corriente también.

El primer parámetro es el material de los electrodos, de acuerdo con la bibliografía se plantean como opciones el aluminio y el hierro, el primero ha mostrado porcentajes de remoción superiores al 90% aunque con mayor costo, mientras que el hierro con porcentajes en ocasiones cercanos al 90% pero con menor costo; por otro lado, el aluminio presenta problemas de pasivación mientras que el Hierro se deshace durante el proceso aumentando los niveles de este en el agua. Para determinar la mejor alternativa se debe experimentar con ambos electrodos, empleando las combinaciones de ánodo y cátodo de Al-Al, Fe-Fe, Al-Fe y Fe-Al respectivamente para ajustarlo específicamente al agua del laboratorio.

A continuación, se determina el Voltaje a utilizar, algunos estudios han determinado que emplear voltajes altos favorece la reacción química provocando liberación de iones de los electrodos los cuales aportan a la coagulación de contaminantes, por este motivo se plantea emplear para evaluación experimental voltajes entre los 10 y los 30 V, dado que la cantidad de agua no es grande, no se requieren voltajes superiores y este rango ha sido el más estudiado y el que mejores resultados ha arrojado previamente.

Finalmente se determina el tiempo de residencia, el cual según estudios anteriores se debe encontrar entre los 30 y los 60 minutos, presentando porcentajes de remoción del 70 al 90%.

## 5. ANÁLISIS DE COSTOS

Establecidas las especificaciones técnicas del tratamiento, se debe realizar un análisis económico con el fin de determinar los costos de inversión y de operación que genera la implementación del mismo. Para cumplir con este objetivo, considerando que el análisis técnico se estableció empleando un rango para cada variable operacional, se realizará la estimación de costos para el límite inferior y superior de cada parámetro, al final del capítulo se resumirá en una tabla los costos de cada posibilidad planteada.

### 5.1 COSTOS DE INVERSIÓN

La inversión hace referencia a aquellos costos iniciales que se deben realizar para la adquisición de los equipos (costos directos), así como la mano de obra requerida para la instalación y puesta en marcha del sistema de tratamiento (costos indirectos). En la tabla 17, se pueden apreciar los costos directos que no están sujetos a variación por los parámetros operacionales.

Tabla 17. Costos directos constantes

Equipo	Cantidad	Valor unitario COP	Valor Total COP
Placa de PMMA <sup>91</sup>	5	\$ 816,176	\$ 4,080,880
Tanque de neutralización <sup>92</sup>	1	\$ 6,331,413	\$ 6,331,413
Válvula de compuerta <sup>93</sup>	4	\$ 20,990	\$ 83,960
Bomba centrífuga <sup>94</sup>	2	\$ 469,900	\$ 939,800
Fuente de Poder <sup>95</sup>	1	\$ 776,711	\$ 776,711
<b>Total</b>			<b>\$ 12,212,764</b>

Fuente: Elaboración propia

A los costos de inversión anteriores se les debe agregar el costo de los electrodos, estos como se mencionó en el capítulo anterior pueden emplearse en cuatro

<sup>91</sup> PMMA 2000\*1000\*10. [En línea]. Bricoplastico.com On Line. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <http://www.metacrilato-policarbonato-online.com/tienda/metacrilato-incoloro-1/incoloro-10-mm/pmma-1000-1000-10mm-45-detail>

<sup>92</sup> Tanque dosificador 700 litros de plástico PE, agitador. [En línea]. IBC Rührwerke Containerrührwerke Shop. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <https://www.ibc-mixer.de/es/dosierbehaelter-500-liter-pe-kunststoffbehaelter-ruehrwerk.html>

<sup>93</sup> Válvula Compuerta 3/4" GRI-0142 Standard. [En línea]. Easy Cencosud. [Consultado: jul 1, 2020]. Disponible en: [https://www.easy.com.co/p/valvula-compuerta-3-4%22-gri\\_0142-standard/](https://www.easy.com.co/p/valvula-compuerta-3-4%22-gri_0142-standard/)

<sup>94</sup> Bomba De Agua Centrífuga 0.5hp. [En línea]. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-485167045-bomba-de-agua-centrifuga-05hp- JM>

<sup>95</sup> Exttech 382200. [En línea]. FinalTest.com. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <https://www.FinalTest.com.mx/product-p/382200.htm>

arreglos diferentes los cuales generan costos de inversión diferentes. En la Tabla 18 se muestran los valores de los electrodos para las cuatro alternativas.

Tabla 18. Costos de los electrodos

Alternativa	Electrodos	Cantidad	Valor unitario COP	Valor Total COP	Total
<b>Al-Al</b>	Aluminio	47	\$ 185,000	\$ 8,695,000	\$ 8,695,000
<b>Al-Fe</b>	Aluminio	24	\$ 185,000	\$ 4,440,000	\$
	Hierro	23	\$ 112,000	\$ 2,576,000	7,016,000
<b>Fe-Al</b>	Aluminio	23	\$ 185,000	\$ 4,255,000	\$
	Hierro	24	\$ 112,000	\$ 2,688,000	6,943,000
<b>Fe-Fe</b>	Hierro	47	\$ 112,000	\$ 5,264,000	\$ 5,264,000

Fuente: Elaboración propia

En las opciones empleando los dos materiales como electrodos, el mayor número de estos es para los cátodos.

Finalmente se puede apreciar en la tabla 19, los costos indirectos producto de la mano de obra requerida para la instalación y puesta en marcha, requiriendo un operario y un ingeniero químico durante un tiempo de trabajo de un mes.

Tabla 19. Costos indirectos

Empleado	Cantidad	Salario mensual COP	Tiempo (meses)	Costo total COP
<b>Ingeniero</b>	1	\$ 1,500,000	1	\$ 1,500,000
<b>Operario</b>	1	\$ 877,802	1	\$ 877,802
<b>Total</b>				<b>\$ 2,377,802</b>

Fuente: Elaboración propia

Calculados todos los costos de inversión se realiza la sumatoria respectiva, en la tabla 20. se puede apreciar el costo de inversión de las cuatro posibilidades de electrodos.

Tabla 20. Costos de inversión

Alternativa	Costos directos fijos	Costo electrodos	Costos indirectos	Costo de inversión total
Al-Al		\$ 8,695,000		\$ 23,285,566
Al-Fe		\$ 7,016,000		\$ 21,606,566
Fe-Al	\$ 12,212,764	\$ 6,943,000	\$ 2,377,802	\$ 21,533,566
Fe-Fe		\$ 5,264,000		\$ 19,854,566

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar como emplear exclusivamente electrodos de Aluminio implica un aumento del 17% del costo de inversión con respecto a emplear únicamente electrodos de Hierro; Así mismo se puede apreciar que el uso de electrodos de Aluminio representa un 37.3% de los costos de inversión mientras que los de Hierro representan un 26.5% del costo de inversión.

## 5.2 COSTOS OPERATIVOS

Una vez calculado el costo de puesta en marcha del sistema de tratamiento, se deben calcular los costos mensuales de su operación, esto hace referencia al costo energético generado por el electro coagulador, el costo del neutralizador y el costo de la mano de obra, en este último aspecto ya se cuenta con un operario encargado de realizar el desecho de las aguas residuales por lo cual no se generan costos adicionales por mano de obra.

**5.2.1 Costo del neutralizador.** Para establecer el costo concreto mensual de este parámetro es necesario contar con las curvas de titulación para determinar la cantidad de Soda Caustica que se debe aplicar durante el proceso, por este motivo, se asumirá este parámetro como fijo donde se deberá comprar una cantidad grande para mantener en stock. La cantidad de Soda al 99% cotizada es de 25 kg con un valor \$115,900<sup>96</sup>.

**5.2.2 Costo energético del electro coagulador.** Para calcular el costo energético se deben tener dos variables, el valor del kWh de la empresa de energía el cual en

<sup>96</sup> Soda Caustica Escamas Al 99% - L a \$4636. [En línea]. Mercado Libre. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-565936488-soda-caustica-escamas-al-99-JM>

la ciudad de Cali para el año 2020 es de \$680.0636 por kWh<sup>97</sup>, y la cantidad de energía consumida por el electro coagulador, para este último se van a evaluar cuatro escenarios, el primero asumiendo el menor valor de voltaje del rango establecido previamente (10 V) con el menor tiempo de residencia (30 min), el segundo empleando el menor voltaje (10 V) con un tiempo de residencia mayor (60 min), el tercero empleando mayor voltaje (30 V) y un tiempo de residencia menor (30 min), y finalmente el mayor voltaje (30 V) con mayor tiempo de residencia (60 min). Estos escenarios contemplan los límites de los rangos establecidos para poder establecer un rango de costos energéticos provenientes del electrocoagulador.

En la ecuación 10 se aprecia el cálculo del costo energético.

Ecuación 10. Costo energético

$$C_e = E_c * V_{kw}$$

Donde

$C_e$  = costo energético del coagulador (COP)

$E_c$  = Energía consumida (kWh/m<sup>3</sup>)

$V_{kw}$  = valor de kWh del servicio publico

Para los cuatro escenarios se evaluará empleando la ecuación 11 considerando una intensidad de corriente de 1A, valor que brinda la fuente de poder.

Ecuación 11. Energía consumida<sup>98</sup>

$$E_c = \frac{V * i * t}{V_{ef}}$$

Donde:

$V$  = Voltaje (V)

$i$  = Intensidad de corriente (A)

$t$  = Tiempo de residencia (h)

$V_{ef}$  = Volumen efectivo del electro coagulador (m<sup>3</sup>)

Reemplazando los valores respectivos para cada escenario se obtienen la energía consumida en cada caso.

---

<sup>97</sup> Tarifas Mercado Regulado 2020. [En línea]. EMCALI. [Consultado: jul 1, 2020]. Disponible en: <https://www.emcali.com.co/web/energia/mercado-regulado>

<sup>98</sup> OZYONAR Fuat y KARAGOZOGLU Bunyamin. Operating Cost Analysis and Treatment of Domestic Wastewater by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes.2011. p. 177

Escenario 1: 10 V y 30 min

$$Ec = \frac{10 V * 1 A * 0.5 h}{0.554 m^3 * 1000}$$

$$Ec = 0.009 \frac{kWh}{m^3}$$

Multiplicando el costo por m<sup>3</sup> por la cantidad de agua que se trata se obtiene el consumo

$$Ec = 0.009 \frac{kWh}{m^3} * 2.2174 m^3$$

$$Ec = 0.02 kWh$$

Finalmente se calcula el costo energético

$$Ce = 0.02 kWh * 680.0636 \frac{\$}{kWh}$$

$$Ce = \$13.6 \text{ Pesos}$$

Escenario 2: 10 V y 60 min

$$Ec = \frac{10 V * 1 A * 1 h}{0.554 m^3 * 1000}$$

$$Ec = 0.018 \frac{kWh}{m^3}$$

Multiplicando el costo por m<sup>3</sup> por la cantidad de agua que se trata se obtiene el consumo

$$Ec = 0.018 \frac{kWh}{m^3} * 2.2174 m^3$$

$$Ec = 0.04 kWh$$

Finalmente se calcula el costo energético

$$Ce = 0.04 kWh * 680.0636 \frac{\$}{kWh}$$

$$Ce = \$27.22 \text{ Pesos}$$

Escenario 3: 30 V y 30 min

$$Ec = \frac{30 V * 1 A * 0.5 h}{0.554 m^3 * 1000}$$

$$Ec = 0.027 \frac{kWh}{m^3}$$

Multiplicando el costo por m<sup>3</sup> por la cantidad de agua que se trata se obtiene el consumo

$$Ec = 0.027 \frac{kWh}{m^3} * 2.2174 m^3$$

$$Ec = 0.06 kWh$$

Finalmente se calcula el costo energético

$$Ce = 0.06 kWh * 680.0636 \frac{\$}{kWh}$$

$$Ce = \$40.83 \text{ Pesos}$$

Escenario 4: 30 V y 60 min

$$Ec = \frac{30 V * 1 A * 1 h}{0.554 m^3 * 1000}$$

$$Ec = 0.054 \frac{kWh}{m^3}$$

Multiplicando el costo por m<sup>3</sup> por la cantidad de agua que se trata se obtiene el consumo

$$Ec = 0.054 \frac{kWh}{m^3} * 2.2174 m^3$$

$$Ec = 0.12 kWh$$

Finalmente se calcula el costo energético

$$Ce = 0.12 kWh * 680.0636 \frac{\$}{kWh}$$

$$Ce = \$81.66 \text{ Pesos}$$

Una vez calculados los costos energéticos para cada escenario se puede apreciar que la electrocoagulación para volúmenes de agua tan bajos no presenta un gasto excesivo de energía, donde el laboratorio debe asumir un pago adicional con respecto al consumo actual que estará entre los \$13 y los \$82 pesos por cada repetición que se realice al mes.

## 6. CONCLUSIONES

- Se realizó un diagnóstico al laboratorio para conocer el estado del agua residual proveniente del ingreso de muestras que se vierten en el alcantarillado, en el análisis de esta agua residual se identificaron los parámetros que no cumplían con el artículo 16 de la resolución 631 de 2015 los cuales fueron: la demanda biológica del oxígeno (DBO) con 135.1 mg/L, demanda química de oxígeno (DQO) con 319 mg/L, sólidos suspendidos totales (SST) con 202.6 mg/L y un pH mínimo de 2.9.
- Se seleccionó de manera teórica un sistema de tratamiento que incluye dos etapas, primero un tanque de neutralización y luego un proceso de electrocoagulación, según los resultados investigados se espera que el agua después del tratamiento sea apta para verter en el alcantarillado.
- Se realizó la respectiva especificación técnica del sistema de tratamiento incluyendo material y dimensiones de los tanques de neutralización y electrocoagulación, así como el material y la cantidad de electrodos requeridos, incluyendo un rango operacional de las variables más importantes en el proceso como el voltaje, y el tiempo de residencia esperando con estos parámetros alcanzar porcentajes de remoción superiores al 70%.
- Se calcularon los gastos de inversión y de operación del sistema de tratamiento, identificando una diferencia considerable entre la inversión inicial y los costos operativos, estos últimos no sugieren un aumento considerable en el presupuesto actual de la empresa requiriendo un rango entre los \$13 y los \$82 pesos por repetición del tratamiento. Por otro lado, los costos de los electrodos representan un 26% de los costos de inversión al emplear como material el hierro mientras que representan el 37% cuando se emplea Aluminio, así mismo, comparativamente al resto de la inversión, los electrodos representan un 36% y un 60% respectivamente.

## 7. RECOMENDACIONES

- Evaluar el sistema de tratamiento de manera experimental teniendo en cuenta los parámetros establecidos, para de esta manera realizar la selección de parámetros más adecuada técnica y financieramente.
- Realizar el estudio geométrico del reactor para favorecer la sedimentación de los sólidos
- Realizar curvas de titulación para dosificar el proceso de neutralización
- Aumentar la intensidad de corriente con el objetivo de poder generar un mayor rendimiento de los electrodos usados y un menor tiempo de residencia.
- Establecer los porcentajes de remoción de DQO, DBO, SS de manera experimental con el sistema de tratamiento planteado.
- Realizar la caracterización de las aguas residuales si se presentan muestras nuevas al laboratorio que no estén contempladas en el sistema, con el fin de identificar posibles infracciones en la normatividad por nuevos contaminantes.
- Realizar un seguimiento del proceso de electrocoagulación para establecer tiempos de mantenimiento y durabilidad de los electrodos.

## REFERENCIAS

AguaSistec. Ósmosis Inversa. [En línea]. Disponible en: <http://www.aguasistec.com/osmosis-inversa.php>

AguaSistec. Planta de Tratamiento de Agua Potable – PTAP. [En línea]. Disponible en: <http://www.aguasistec.com/planta-de-tratamiento-de-agua-potable.php>

AMADOR BAEZ, Kevin Stevan y RANGEL CALDERON, Harold. Propuesta de un sistema de tratamiento de agua residual industrial en el proceso de elaboración de la panela en la empresa Doña Panela LTDA. [en línea]Fundación Universidad de América, 2019.

ARANGO RUIZ, Alvaro y GARCES GIRALDO, Luis Fernando. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*. 2007, vol. 43, nro. 147. pp. 56-67

Arnaiz Carmen; Isac Laura y Lebrato juMan. Tratamiento biológico de aguas residuales. *Revista Tecnología del Agua*. 2000.

ASAITHAMBI, P., *et al.* Performance evaluation of hybrid electrocoagulation process parameters for the treatment of distillery industrial effluent. *Process Safety and Environmental Protection*. 2016, vol. 104, pp. 406-412

ASAITHAMBI, P., *et al.* Ozone assisted electrocoagulation for the treatment of distillery effluent. *Desalination*. 2012, vol. 297, pp. 1-7

Barbaho Luz Edith. Conceptos Básicos De La Contaminación Del Aguay Parámetros De Medición. Conceptos Básicos De La Contaminación Del Aguay Parámetros De Medición. Universidad del Valle,

BEHIN, Jamshid, *et al.* Ozone assisted electrocoagulation in a rectangular internal-loop airlift reactor: Application to decolorization of acid dye. *Journal of Water Process Engineering*. 2015, vol. 8, pp. 171-178

BENÍTEZ, F. Javier, *et al.* Ozone and membrane filtration based strategies for the treatment of cork processing wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 152, nro. 1. pp. 373-380

Bomba De Agua Centrifuga 0.5hp. [En línea]. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-485167045-bomba-de-agua-centrifuga-05hp- JM>

BOROSKI, Marcela, *et al.* The effect of operational parameters on electrocoagulation–flotation process followed by photocatalysis applied to the

decontamination of water effluents from cellulose and paper factories. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 160, nro. 1. pp. 135-141

BOROSKI, Marcela, *et al.* Combined electrocoagulation and TiO<sub>2</sub> photoassisted treatment applied to wastewater effluents from pharmaceutical and cosmetic industries. *Journal of Hazardous Materials*. 2009, vol. 162, nro. 1. pp. 448-454

BURNS, S. E.; YIACOUMI, S. y TSOURIS, C. Microbubble generation for environmental and industrial separations. *Separation and Purification Technology*. 1997, vol. 11, nro. 3. pp. 221-232

CABRERA BERMUDEZ, Xiomara; FLEITES RAMIREZ, Marisol y CONTRERAS MOYA, Ana. Estudio del proceso de coagulación- floculación de aguas residuales de la empresa textil "desembarco del Granma" a escala de laboratorio. *Tecnología Química*. 2009, vol. 29, nro. 3. pp. 64-73

Características de las aguas residuales. [En línea]. Disponible en: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>

CASTELLANOS NIÑO, Javier Eduardo y QUINTERO CUBILLOS, Andres Felipe. Desarrollo de una propuesta de sistema de tratamiento de aguas residuales generada en la empresa Producción y Gestión S.A.S [en línea]Fundación Universidad de América, 2019.

CHEN, Xin y DENG, Huiping. Removal of humic acids from water by hybrid titanium-based electrocoagulation with ultrafiltration membrane processes. *Desalination*. 2012, vol. 300, pp. 51-57

Concepto de parámetro. [En línea]. Disponible en: <https://deconceptos.com/general/parametro>

Constitución política de Colombia 1991. Bogotá: 1991.

Cordonchem Envitech. SISTEMAS CON REACTORES AERÓBICOS PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES. [En línea]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/sistemas-con-reactores-aerobicos-para-tratar-aguas-residuales/>

Cyclus. Tratamiento Primario. [En línea]. Disponible en: <http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-primario/>

CYTED. Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. [En línea]. Disponible

en: [http://www.cyted.org/sites/default/files/tratamiento\\_anaerobio\\_de\\_aguas\\_residuales.pdf](http://www.cyted.org/sites/default/files/tratamiento_anaerobio_de_aguas_residuales.pdf)

DE RIJK, Sander E.; Jaap H.J.M. aivan der, Graaf y DEN BLANKEN, Jan G. Bubble size in flotation thickening. *Water Research*. 1994, vol. 28, nro. 2. pp. 465-473

DEGHLES, Abdalhadi y KURT, Ugur. Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*. 2016, vol. 104, pp. 43-50

DESHPANDE, A. M.; SATYANARAYAN, S. y RAMAKANT, S. Treatment of high-strength pharmaceutical wastewater by electrocoagulation combined with anaerobic process. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 2010, vol. 61, nro. 2. pp. 463-472

DIA, Oumar, *et al.* Hybrid process, electrocoagulation-biofiltration for landfill leachate treatment. *Waste Management*. 2018, vol. 75, pp. 391-399

Diane Williamson. Interacción hospedador-patógeno y evasión inmunitaria. [En línea]. British society for immunology. [Consultado: Ago 1, 2020]. Disponible en: <https://www.immunology.org/es/public-information/bitesized-immunology/pathogens-and-disease/interacci%C3%B3n-hospedador-pat%C3%B3geno-y>

Emilio Serrano. Preparación de agua residual sintética. [En línea]. Aguasresiduales.info. [Consultado: agosto 10, 2020]. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/expertos/tus-consultas/preparacion-de-agua-residual-sintetica-VYAgl#:~:text=Este%20cliente%20para%20determinar%20el,se%20le%20denomina%20aguas%20sint%C3%A9ticas.>

Extech 382200. [En línea]. FinalTest.com. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <https://www.FinalTest.com.mx/product-p/382200.htm>

FAQ De la Contaminación Del Agua. [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/faq-contaminacion-agua.htm>

Feire Espin Pablo Andres. análisis y evaluación de un sistema de tratamientos de aguas residual para la empresa Teimsa-ambato [en línea]Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, 2012.

GE, Jiantuan, *et al.* New bipolar electrocoagulation–electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Separation and Purification Technology*. 2004, vol. 36, nro. 1. pp. 33-39

GHOSH, D.; SOLANKI, H. y PURKAIT, M. K. Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 155, nro. 1. pp. 135-143

Hernández Johan y Mejía Stephany. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA DISMINUIR LA CARGA CONTAMINANTE A ESCALA DE LABORATORIO [en línea]Fundación Universidad de América, 2019.

IDEAM. Toma de muestra de agua. [En línea]. Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428)

Ing. Manuel Sanchez Del Castillo. Elimina la turbiedad del agua. *Agua y Ambiente*. 2016, nro. 12. pp. 20

Ing. Yolanda Andía Cárdenas. TRATAMIENTO DE AGUA. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN. Lima, Peru: 2000.

IngeoExpert. Tratamientos físicos en las tecnologías de depuración de aguas residuales. [En línea]. Disponible en: <https://ingeoexpert.com/articulo/tratamientos-fisicos-las-tecnologias-depuracion-aguas-residuales/?v=42983b05e2f2>

Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN AGUA SECADOS A 103 – 105 °C. [En línea]. IDEAM. (agosto 2.). [Consultado: marzo 19, 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>

Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales. Demanda Química de Oxígeno por refluo cerrado y voluntaria. [En línea]. IDEAM. (diciembre 28.). [Consultado: mar 18, 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

JACHIMOWSKI, Artur. Efficiency of Pollutant Removal from Surface Water in a Conventional Water Treatment System. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 86, pp. 30

JOHN, Sminu; SOLOMAN, Poopana Antony y FASNABI, Puthenkattil Abdulkunji. Study on Removal of Acetamiprid from Wastewater by Electrocoagulation. *Procedia Technology*. 2016, vol. 24, pp. 619-630

KABDAŞLI, Işık, *et al.* Complexing agent and heavy metal removals from metal plating effluent by electrocoagulation with stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2009, vol. 165, nro. 1. pp. 838-845

KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven R. *Manufactura, ingeniería y tecnología* (5a. ed.). Distrito Federal: Pearson Educación, 2008. 148-152 p.

KATAL, Reza y PAHLAVANZADEH, Hassan. Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. *Desalination*. 2011, vol. 265, nro. 1. pp. 199-205

KIM, Jung Hwan; MAITLO, Hubdar Ali y PARK, Joo Yang. Treatment of synthetic arsenate wastewater with iron-air fuel cell electrocoagulation to supply drinking water and electricity in remote areas. *Water Research*. 2017, vol. 115, pp. 278-286

KOBYA, M., *et al.* Arsenic removal from groundwater of Sivas-Şarkışla Plain, Turkey by electrocoagulation process: Comparing with iron plate and ball electrodes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015, vol. 3, nro. 2. pp. 1096-1106

KORDATZKI, W. Manual para la medida práctica del pH . segunda ed. Barcelona: M. Marín & Cía. Editores, 1953.

LAI, Chen L. y LIN, Sheng H. Electrocoagulation of chemical mechanical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. *Chemical Engineering Journal*. 2003, vol. 95, nro. 1. pp. 205-211

LAKSHMI KRUTHIKA, N., *et al.* Efficacy of electrocoagulation and electrooxidation for the purification of wastewater generated from gelatin production plant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2013, vol. 1, nro. 3. pp. 183-188

LAM LISA 2440 X 1220 3.0MM. [En línea]. El palacio del Aluminio Ltda. [Consultado: jul 1, 2020]. Disponible en: <https://www.elpalaciodelaluminio.com/index.php/lamina-lisa/la101-detail>

Lenntech Tratamiento de agua & purificación. Aluminio (Al). [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm>

Lenntech Tratamiento de agua & purificación. Hierro - Fe. [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/fe.htm>

Ley 99 De 1993. Ley 99 De 1993. g.

LI, Chen, *et al.* Improved oil removal ability by the integrated electrocoagulation (EC)-carbon membrane coupling with electrochemical anodic oxidation (CM/EAO)

system. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018, vol. 559, pp. 305-313

LIU, Fei, *et al.* Experimental study on treatment of tertiary oil recovery wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2019, vol. 144, pp. 107640

LIZARAZO BECERRA, Jenny Milena y ORJUELA GUTIÉRREZ, Martha Isabel. *Sistemas De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia*. Sistemas De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia. 2013.

LIZARAZO ESTUPIÑAN, Paula Andrea y VILLOTA SANTAMARIA, Katya Vanessa. *Desarrollo de una propuesta de un sistema para el tratamiento de aguas residuales provenientes del tratamiento térmico realizado por una empresa metalmecánica [en línea]*Fundación Universidad de América, 2017.

López Escobar Guisela Pamela. *DISEÑO DE UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACION PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE YOGURT [en línea]*2014.

LOZANO RIVAS, William Antonio. *Diseño De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales*. Diseño De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales. Bogotá, Colombia: 2012.

MALAKOOTIAN, M.; MANSOORIAN, H. J. y MOOSAZADEH, M. Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. *Desalination*. 2010, vol. 255, nro. 1. pp. 67-71

MANSOURI, Khaled, *et al.* Anodic Dissolution of Pure Aluminum during Electrocoagulation Process: Influence of Supporting Electrolyte, Initial pH, and Current Density. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011, vol. 50, nro. 23. pp. 13362-13372

MECHELHOFF, Martin; KELSALL, Geoff H. y GRAHAM, Nigel J. D. Electrochemical behaviour of aluminium in electrocoagulation processes. *Chemical Engineering Science*. 2013, vol. 95, pp. 301-312

MEDINA CEVALLOS, Juan Felipe y PERALTA CALDERÓN, Marco Orlando. *Validación De Un Prototipo De Electrocoagulación Para El Tratamiento De Aguas Residuales De Alta Carga Orgánica Presentes En La Industria*. Validación De Un Prototipo De Electrocoagulación Para El Tratamiento De Aguas Residuales De Alta Carga Orgánica Presentes En La Industria. 2015.

MENDEZ OCHOA, Leidy Vanessa y SOSA HERNANDEZ, Lorena Jaidiby. *Propuesta de mejora para la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de*

una empresa del sector cosmético [en línea]Fundación Universidad de América, 2019.

Decreto 3930 de 2010.

RESOLUCION 631 DE 2015.

RESOLUCION 3957 DE 2009.

Mipsa. Acero inoxidable. [En línea]. Disponible en: <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Que-es-acero-inoxidable>

MLAKAR, Matej; LEVSTEK, Marjetka y STRAŽAR, Marjeta. Physico-chemical treatment of liquid waste on an industrial plant for electrocoagulation. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 2017, vol. 76, nro. 7-8. pp. 2188-2194

MOLLAH, M. Yousuf A., *et al.* Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials*. 2001, vol. 84, nro. 1. pp. 29-41

MONOGRÁFICOS AGUA EN CENTROAMÉRICA. MANUAL DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS. [En línea]. Disponible en: <http://alianzaporelaqua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>

MOUEDHEN, G., *et al.* Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 150, nro. 1. pp. 124-135

MUÑOZ, Juan Fernando y ORTA, María Teresa. EFECTO DEL OZONO EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DISUELTA DE UN EFLUENTE SECUNDARIO. *Revista EIA*. 2012, nro. 18. pp. 171-178

OMWENE, P. I. y KOBYA, M. Treatment of domestic wastewater phosphate by electrocoagulation using Fe and Al electrodes: A comparative study. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018, vol. 116, pp. 34-51

OMWENE, Philip Isaac; KOBYA, Mehmet y CAN, Orhan Taner. Phosphorus removal from domestic wastewater in electrocoagulation reactor using aluminium and iron plate hybrid anodes. *Ecological Engineering*. 2018, vol. 123, pp. 65-73

OUTLETMINERO. Titanio - Ti. [En línea]. (febrero-). Disponible en: <https://outletminero.org/titanio/>

OZYONAR Fuat y KARAGOZOGLU Bunyamin. Operating Cost Analysis and Treatment of Domestic Wastewater by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes. 2011. p. 177

PAPADOPOULOS, Konstantinos P., *et al.* Treatment of printing ink wastewater using electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*. 2019, vol. 237, pp. 442-448

PEROZO CUICAS, Jesus Rafael y ABREU CUADRA, Rebeca Lesbeth. Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable. *Química Viva*. 2017, vol. 16, nro. 1. pp. 56-69

PLATIKANOV, S., *et al.* Chemometrics quality assessment of wastewater treatment plant effluents using physicochemical parameters and UV absorption measurements. *Journal of Environmental Management*. 2014, vol. 140, pp. 33-44

Pmma 2000\*1000\*10. [En línea]. Bricoplastico.com On Line. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <http://www.metacrilato-policarbonato-online.com/tienda/metacrilato-incoloro-1/incoloro-10-mm/pmma-1000-1000-10mm-45-detail>

PRIETO BERNAL WINNY JIMENA. EVALUACIÓN DE UNA PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA EL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL GENERADA EN UNA EMPRESA DE SABORIZANTES [en línea]FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA, 2019.

RAFFO LECCA, Eduardo y RUIZ LIZAMA, Edgar. Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*. 2014, vol. 17, nro. 1. pp. 71-80

RAJU, G. Bhaskar, *et al.* Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation–electrooxidation. *Chemical Engineering Journal*. 2008, vol. 144, nro. 1. pp. 51-58

RAMIREZ CAMPEROS, Esperanza. Fundamentos teóricos de lodos activados y aereación extendida. [En línea]. IDEAM. [Consultado: Marzo del 2020]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf>

Ramos Alvariño, *et al.* Revista CENIC. Ciencias Químicas ISSN: 1015-8553 Juan.Araujo@cnic.Edu.Cu Centro Nacional De Investigaciones Científicas Cuba. Revista CENIC. Ciencias Químicas ISSN: 1015-8553 Juan.Araujo@cnic.Edu.Cu Centro Nacional De Investigaciones Científicas Cuba.

RATNA KUMAR, P., *et al.* Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*. 2004, vol. 55, nro. 9. pp. 1245-1252  
RESIDUALES LIQUIDOS. [En línea]. Disponible en: [https://www.ecured.cu/Residuales\\_L%C3%ADquidos](https://www.ecured.cu/Residuales_L%C3%ADquidos)

RESTREPO MEJIA, Ana Patricia; ARANGO RUIZ, Alvaro y GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. La Electrocoagulación: Retos Y Oportunidades En El Tratamiento De Aguas. La Electrocoagulación: Retos Y Oportunidades En El Tratamiento De Aguas. 2006.

RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia; ARANGO RUÍZ, Álvaro y GARCÉS GIRALDO, Luís Fernando. La Electrocoagulación: Retos Y Oportunidades En El Tratamiento De Aguas. La Electrocoagulación: Retos Y Oportunidades En El Tratamiento De Aguas. Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012.

RESTREPO OSORNO, Hernán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación - floculación de una planta de tratamiento de agua potable [en línea]Universidad Nacional de Colombia, 2009.

Robles Mendoza Lindsay Karime, López Bueno Andrés Felipe. Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación. Trabajo de grado ingeniería civil. Bogotá D.C. Universidad de la Salle. Facultad de ingeniería.2017.60.p

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. 1999.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Teoría y principios de diseño. Tercera ed. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. 319-333 p.

SÁNCHEZ MARTÍNEZ, Hugo. TRATAMIENTO QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. [En línea]. (17 de marzo de). Disponible en: <https://prezi.com/fbwg5wwtruft/tratamiento-quimico-de-aguas-residuales/>

Soda Caustica Escamas Al 99% - L a \$4636. [En línea]. Mercado Libre. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-565936488-soda-caustica-escamas-al-99- JM>

Spinelli Monica. Efluentes. [En línea]. Disponible en: <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Efluentes.htm>

SUÁREZ-ESCOBAR, Andres; PATAQUIVA-MATEUS, Alis y LÓPEZ-VASQUEZ, Andrés. Electrocoagulation—photocatalytic process for the treatment of lithographic wastewater. Optimization using response surface methodology (RSM) and kinetic study. *Catalysis Today*. 2016, vol. 266, pp. 120-125

Tanque dosificador 700 litros de plástico PE, agitador. [En línea]. IBC Rührwerke Containerrührwerke Shop. [Consultado: Jul 1, 2020]. Disponible en: <https://www.ibc-mixer.de/es/dosierbehaelter-500-liter-pe-kunststoffbehaelter-ruehrwerk.html>

Tarifas Mercado Regulado 2020. [En línea]. EMCALI. [Consultado: jul 1, 2020]. Disponible en: <https://www.emcali.com.co/web/energia/mercado-regulado>

TAVANGAR, Tohid, *et al.* Toward real textile wastewater treatment: Membrane fouling control and effective fractionation of dyes/inorganic salts using a hybrid electrocoagulation – Nanofiltration process. *Separation and Purification Technology*. 2019, vol. 216, pp. 115-125

TEZCAN UN, Umran, *et al.* Continuous electrocoagulation of cheese whey wastewater: An application of Response Surface Methodology. *Journal of Environmental Management*. 2014, vol. 146, pp. 245-250

TEZCAN UN, Umran y OZEL, Emel. Electrocoagulation of yogurt industry wastewater and the production of ceramic pigments from the sludge. *Separation and Purification Technology*. 2013, vol. 120, pp. 386-391

Válvula Compuerta 3/4" GRI-0142 Standard. [En línea]. Easy Cencosud. [Consultado: jul 1, 2020]. Disponible en: [https://www.easy.com.co/p/valvula-compuerta-3~4%22-gri\\_0142-standard/](https://www.easy.com.co/p/valvula-compuerta-3~4%22-gri_0142-standard/)

Venegas Loaiza Andres. Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales. En: 16 de marzo de 2018.

VEPSÄLÄINEN, Mikko, *et al.* Removal of toxic pollutants from pulp mill effluents by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*. 2011, vol. 81, nro. 2. pp. 141-150

YANG, Tao, *et al.* Improving performance of dynamic membrane assisted by electrocoagulation for treatment of oily wastewater: Effect of electrolytic conditions. *Desalination*. 2015, vol. 363, pp. 134-143

ZAIED, M. y BELLAKHAL, N. Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. *Journal of Hazardous Materials*. 2009, vol. 163, nro. 2. pp. 995-1000

## ANEXOS

Artículo 16 de la Resolución 0631 de 2015. Tabla de valores límites para desecho en alcantarillado.

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	VALOR NUMERICO
<b>Generales</b>			
pH	Unidades de pH	5,00 a 9,00	5,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	Se aplican las mismas exigencias establecidas para el parámetro respectivo en la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales multiplicados por un factor de 1,5	225,00
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>		75,00
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L		75,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L		1,50
Grasas y aceites	mg/L		15,00
Compuestos semivolátiles fenólicos	mg/L	Se aplican las mismas exigencias establecidas para el parámetro respectivo en la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales	Análisis y reporte
Fenoles totales	mg/L		0,20
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L		Análisis y reporte
<b>Hidrocarburos</b>			
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	Se aplican los mismos valores límites máximos permisibles que los establecidos para la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales	10,00
Hidrocarburos aromáticos poli cíclicos (HAP)	mg/L		Análisis y reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L		Análisis y reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Absorbibles (AOX)	mg/L		Análisis y reporte

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	VALOR NUMERICO
<b>Compuestos de Fosforo</b>			
Orto fosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	Se aplicas las mismas exigencias establecidas para el parámetro respectivo en la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales multiplicados por un factor de 1,5	Análisis y reporte
Fósforo Total (P)	mg/L		Análisis y reporte
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>			
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Se aplicas las mismas exigencias establecidas para el parámetro respectivo en la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales multiplicados por un factor de 1,5	Análisis y reporte
Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L		Análisis y reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )	mg/L		Análisis y reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L		Análisis y reporte
<b>Iones</b>			
Cianuro Total (CN <sup>-</sup> )	mg/L	Se aplicas las mismas exigencias establecidas para el parámetro respectivo en la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales	0,10
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/L		250,00
Fluoruros (F <sup>-</sup> )	mg/L		5,00
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L		250,00
Sulfuros (S <sup>2-</sup> )	mg/L		1,00

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	VALOR NUMERICO
<b>Metales y Metaloides</b>			
Aluminio (Al)	mg/L	Se aplican las mismas exigencias establecidas para el parámetro respectivo en la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales	Análisis y reporte
Arsénico (As)	mg/L		0,10
Bario (Ba)	mg/L		1,00
Boro (B)	mg/L		Análisis y reporte
Cadmio (Cd)	mg/L		0,01
Zinc (Zn)	mg/L		3,00
Cobalto (Co)	mg/L		0,10
Cobre (Cu)	mg/L		1,00
Cromo (Cr)	mg/L		0,10
Estaño (Sn)	mg/L		2,00
Hierro (Fe)	mg/L		1,00
Mercurio (Hg)	mg/L		0,002
Níquel (Ni)	mg/L		0,10
Plata (Ag)	mg/L		0,20
Plomo (Pb)	mg/L		0,10
Selenio (Se)	mg/L		0,20
Vanadio (V)	mg/L	1,00	
<b>Otros Parámetros para análisis y reporte</b>			
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Se aplican las mismas exigencias establecidas para el parámetro respectivo en la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales	Análisis y reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>		Análisis y reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>		Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>		Análisis y reporte
Color real Medidas de absorbancia a longitudes de onda: 436, 525 y 620 nm	m <sup>-1</sup>		Análisis y reporte