

TRATAMIENTO DE AGUAS CON TRAZAS DE HIDROCARBUROS  
ALMACENADAS EN UN TANQUE SUMIDERO DE UNA TERMINAL DE  
COMBUSTIBLES.

KARENT JINNETH FERNÁNDEZ LOZANO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2017

TRATAMIENTO DE AGUAS CON TRAZAS DE HIDROCARBUROS  
ALMACENADAS EN UN TANQUE SUMIDERO DE UNA TERMINAL DE  
COMBUSTIBLES.

KARENT JINNETH FERNÁNDEZ LOZANO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Química

DIRECTOR:  
LUZ YOLANDA VARGAS FIALLO  
Química, Msc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2017

## DEDICATORIA

A Dios por regalarme la vida y permitirme cumplir esta meta.

A mi familia por todo su amor e incondicional apoyo en todos los momentos de mi vida.

***“Todos tenemos sueños. Pero para convertir los sueños en realidad, se necesita una gran cantidad de determinación, dedicación, autodisciplina y esfuerzo”.***

*Jesse Owens.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al personal del Laboratorio Químico de Consultas Industriales LQCI de la Universidad Industrial de Santander, por toda su colaboración y los buenos momentos compartidos en este tiempo, en especial a la profesora Luz Yolanda Vargas Fiallo, por su dirección en este proyecto y por toda su confianza y enseñanzas.

A mis amigos Laura, Angie y Yeison, quienes con su amistad sincera, apoyo y comprensión, se convirtieron en una parte fundamental de mi vida.

A Angie M, quien fue como mi hermana durante toda la carrera y me demostró que siempre podré contar con ella.

A Edward M, por su amistad y colaboración en el desarrollo del presente documento.

Y a todas las demás personas, que de una u otra forma me ayudaron durante estos años.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	19
1.1. AGUA.....	19
1.2. CALIDAD DEL AGUA <sup>7</sup> .....	19
1.3. CONTAMINACIÓN HÍDRICA <sup>8</sup> .....	20
1.3.1. CONTAMINACIÓN HÍDRICA POR HIDROCARBUROS <sup>8</sup> .....	20
1.4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES <sup>9</sup> .....	21
1.4.1. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN <sup>10</sup> .....	22
1.4.2. ADSORCIÓN <sup>12</sup> .....	27
1.4.3. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA) <sup>15</sup> .....	29
1.5. REUTILIZACIÓN DEL AGUA <sup>18</sup> .....	30
2. MARCO LEGAL.....	32
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	39
3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA.....	39
3.2. COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.....	39
3.3. ADSORCIÓN.....	40
3.4. FENTON.....	40
3.5. DISPOSICIÓN FINAL DEL AGUA TRATADA.....	41
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	42
4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA.....	42
4.1.1. COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.....	43
4.1.1.1. Dosis óptima de coagulante.....	43

4.1.1.2.Influencia del pH .....	46
4.1.2.ADSORCIÓN .....	51
4.1.3.FENTON.....	54
4.1.4.SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO.....	55
4.1.4.1.Volumen de lodos producidos.....	58
4.1.4.2.Análisis de costos .....	58
4.1.5.DISPOSICIÓN DE LAS AGUAS TRATADAS.....	59
5. CONCLUSIONES .....	66
6. RECOMENDACIONES .....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68
ANEXOS .....	71

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Proceso de coagulación y floculación en el agua. ....	22
<b>Figura 2.</b> Equipo utilizado en pruebas de jarras. ....	27
<b>Figura 3.</b> Estructura química del carbón activado. ....	28
<b>Figura 4.</b> Normas Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego. ....	37
<b>Figura 5.</b> Diagrama de flujo de la metodología utilizada. ....	39
<b>Figura 6.</b> Gráfica del valor de pH frente a la concentración de coagulante.....	44
<b>Figura 7.</b> Gráfica del valor del color frente a la concentración de coagulante.....	45
<b>Figura 8.</b> Gráfica del valor de la turbiedad frente a la concentración de coagulante. .....	45
<b>Figura 9.</b> Gráfica de corrección del pH para el S.A tipo A al agregar alcalite como alcalinizante.....	48
<b>Figura 10.</b> Gráfica de corrección del pH para el S.A tipo B al agregar alcalite como alcalinizante. ....	48
<b>Figura 11.</b> Gráfica de corrección del pH para el PAC al agregar alcalite como alcalinizante.....	49
<b>Figura 12.</b> Grafica del valor de color frente a la concentración de alcalite. ....	49
<b>Figura 13.</b> Gráfica del valor de la turbiedad frente a la concentración de alcalite. ....	50
<b>Figura 14.</b> Gráfica del valor del color frente a la concentración de coagulante.....	52
<b>Figura 15.</b> Gráfica del valor de la turbiedad frente a la concentración de coagulante.....	52
<b>Figura 16.</b> Gráfica del comportamiento del CAP frente al color. ....	53
<b>Figura 17.</b> Gráfica del comportamiento del CAP frente a la turbiedad. ....	54

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Calificación del agua según su salinidad efectiva. ....	33
<b>Tabla 2.</b> Calificación del agua según RAS.....	34
<b>Tabla 3.</b> Calificación del agua según CSR. ....	34
<b>Tabla 4.</b> Calificación del agua según PSI. ....	35
<b>Tabla 5.</b> Calificación del agua según ISL.....	36
<b>Tabla 6.</b> Calificación del agua según ISL modificado por CARRIER.....	36
<b>Tabla 7.</b> Calificación del agua para riego según las normas Riverside. ....	37
<b>Tabla 8.</b> Evaluación del riesgo de inducir toxicidad del agua de riego. ....	38
<b>Tabla 9.</b> Parámetros operacionales para los ensayos en pruebas de jarras. ....	40
<b>Tabla 10.</b> Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua. ....	42
<b>Tabla 11.</b> Resultados de los ensayos para determinar la dosis óptima de S.A. tipo A.....	43
<b>Tabla 12.</b> Resultados de los ensayos para determinar la dosis óptima de S.A. tipo B.....	43
<b>Tabla 13.</b> Resultados de los ensayos para determinar la dosis óptima de PAC. ..	44
<b>Tabla 14.</b> Resultados de los ensayos para determinar la concentración de alcalite para la coagulación con S.A tipo A. ....	46
<b>Tabla 15.</b> Resultados de los ensayos para determinar la concentración de alcalite para la coagulación con S.A. tipo B. ....	47
<b>Tabla 16.</b> Resultados de los ensayos para determinar la concentración de alcalite para la coagulación con PAC.....	47
<b>Tabla 17.</b> Resultados de los ensayos de adsorción con CAP y S.A. tipo A. ....	51
<b>Tabla 18.</b> Resultados de los ensayos de adsorción con CAP y S.A tipo B. ....	51

<b>Tabla 19.</b> Resultados de los ensayos de adsorción con CAP y PAC.....	51
<b>Tabla 20.</b> Resultados de los ensayos de adsorción con CAP al agregarlo antes y después del coagulante. ....	53
<b>Tabla 21.</b> Resultados de los ensayos para la reacción de Fenton. ....	54
<b>Tabla 22.</b> Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua tratada con CAP mas S.A. tipo A .....	55
<b>Tabla 23.</b> Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua tratada con CAP mas PAC. ....	56
<b>Tabla 24.</b> % de remoción de los parámetros establecidos para el tratamiento del agua. ....	57
<b>Tabla 25.</b> Volumen de lodos producidos.....	58
<b>Tabla 26.</b> Volumen de lodos producidos al tratar toda el agua almacenada en el tanque sumidero. ....	58
<b>Tabla 27.</b> Precio de los reactivos utilizados en los tratamientos. ....	58
<b>Tabla 28.</b> Costos del tratamiento total de las aguas almacenadas en el tanque sumidero.....	59
<b>Tabla 29.</b> Costo del tratamiento total de las aguas almacenadas en el tanque sumidero.....	59
<b>Tabla 30.</b> Parámetros tratamiento con CAP + S.A. Tipo A. ....	60
<b>Tabla 31.</b> Parámetros para el tratamiento con CAP + PAC. ....	60
<b>Tabla 32.</b> Parámetros para el cálculo de SE.....	61
<b>Tabla 33.</b> Parámetros para el cálculo de SP.....	61
<b>Tabla 34.</b> Parámetros para el cálculo de SP.....	62
<b>Tabla 35.</b> Parámetros para el cálculo de CSR.....	62

<b>Tabla 36.</b> Parámetros para el cálculo de PSP. ....	63
<b>Tabla 37.</b> Parámetros para el cálculo de PSI.....	63
<b>Tabla 38.</b> Parámetros para el cálculo de ISL. ....	63
<b>Tabla 39.</b> Constantes para el cálculo de ISL. ....	64
<b>Tabla 40.</b> Parámetros para el determinar la clasificación del agua según las normas de Riverside.....	64
<b>Tabla 41.</b> Parámetros para el determinar la toxicidad del agua. ....	64
<b>Tabla 42.</b> Resultados de la toxicidad del agua. ....	65

## ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Resolución 1207 del 2104. “Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas” .....	72
<b>Anexo B.</b> Procedimiento para realizar los ensayos con pruebas de Jarras. ....	74
<b>Anexo C.</b> Cálculos para determinar las cantidades de $H_2O_2$ y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ . ....	75
<b>Anexo D.</b> Procedimiento para determinar el volumen de lodos producidos.....	76
<b>Anexo E.</b> Cálculos para el análisis de costos de los tratamientos. ....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
Σ	Sumatoria
Alc	Alcalinidad
CAP	Carbón activado en polvo
CSR	Carbonato de sodio residual
DC	Dureza cálcica
g	Gramos
ISL	Índice de saturación Langelier
L	Litros
LQCI	Laboratorio Químico de Consultas Industriales
meq	Miliequivalentes
mg	Miligramos
min	Minutos
mL	Mililitros
mS/cm	Milisiemens por centímetro
N	Normalidad
nm	Nanómetros
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
p/v	peso/volumen
PAC	Policloruro de aluminio
POA	Proceso de oxidación avanzada
ppm	Partes por millón
PSI	Por ciento de sodio intercambiable
PSP	Por ciento de sodio posible
RAS	Relación de adsorción de sodio
S.A. tipo A	Sulfato de aluminio tipo A
S.A. tipo B	Sulfato de aluminio tipo B
SE	Salinidad efectiva
SP	Salinidad potencial
SSED	Sólidos sedimentables
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
TPH	Hidrocarburos derivados del petróleo
uds.	Unidades
UIS	Universidad Industrial de Santander
UPC	Unidades de platino cobalto
µm	Micrómetro

## RESUMEN

**TÍTULO:** TRATAMIENTO DE AGUAS CON TRAZAS DE HIDROCARBUROS ALMACENADAS EN UN TANQUE SUMIDERO DE UNA TERMINAL DE COMBUSTIBLES.\*\*

**AUTOR:** KARENT JINNETH FERNÁNDEZ LOZANO \*\*

**PALABRAS CLAVES:** COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN, ADSORCIÓN, OXIDACIÓN AVANZADA, SULFATO DE ALUMINIO, POLICLORURO DE ALUMINIO, CARBÓN ACTIVADO, FENTON.

El presente documento muestra los resultados obtenidos en el estudio del tratamiento de aguas con trazas de hidrocarburos almacenadas en un tanque sumidero de una terminal de combustibles.

Como fase previa, antes de aplicar algún tratamiento, se realizó la caracterización fisicoquímica de estas aguas, donde se evidenció un alto contenido de hidrocarburos (11,92 mg/L) y de otros contaminantes como color (2575 UPC) y turbiedad (461 NTU). A continuación, se realizaron diferentes ensayos de laboratorio basados en los procesos de coagulación-floculación, adsorción y oxidación avanzada, con el fin de eliminar la mayor parte de contaminantes presentes en estas aguas y darles un reusó en el ambiente.

En el proceso de coagulación-floculación se utilizaron tres coagulantes: Sulfato de aluminio tipo A (S.A. tipo A), Sulfato de aluminio tipo B (S.A. tipo B) y Policloruro de aluminio (PAC), a cada uno se le determinó los parámetros operacionales como dosis óptima, concentración y pH.

Para el proceso de adsorción se utilizó carbón activado en Polvo (CAP), el cual se probó solo y en combinación con los tres tipos de coagulantes, donde se evidenció una mayor eficiencia al estar combinado con el coagulante.

Por último, se ensayó con la reacción de Fenton como Proceso de Oxidación Avanzada (POA), en el que se utilizaron como reactivos peróxido de hidrogeno y sulfato ferroso. Sin embargo, el tratamiento con este proceso no fue tan eficaz como se esperaba.

Al comparar los resultados de los ensayos realizados, se escogieron como los procesos más adecuados para el tratamiento de estas aguas el de CAP antes de la coagulación con S. A. tipo A y el de CAP antes de la coagulación con PAC, los cuales presentan una remoción del más del 90% de contaminantes.

---

\*\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de química. Director: Msc. Luz Yolanda Vargas Fiallo.

## ABSTRACT

**TITLE:** WATER TREATMENT WITH TRACES OF HYDROCARBONS STORED IN A SUMP TANK OF A FUEL TERMINAL \*

**AUTHOR:** KARENT JINNETH FERNÁNDEZ LOZANO \*\*

**KEYWORDS:** COAGULATION-FLOCCULATION, ADSORPTION, ADVANCED OXIDATION, ALUMINUM SULFATE, POLYALUMINUM CHLORIDE, ACTIVATED CARBON, FENTON.

The present paper shows the results obtained in the study of water treatment with traces of hydrocarbons stored in a sump tank of a fuel terminal.

As a preliminary phase, the physicochemical characterization of these waters was carried out before applying some treatment, where a high content of hydrocarbons (11.92 mg / L) and other contaminants such as color (2575 UPC) and turbidity (461 NTU) were evidenced. Then, different laboratory tests based on the coagulation-flocculation, adsorption and advanced oxidation processes were then carried out in order to eliminate most of the contaminants present in these waters and reuse them in the environment.

Three coagulants were used in the coagulation-flocculation process: Aluminum sulphate type A (S.A. type A), Aluminum sulphate type B (S.A. type B) and Polyaluminum Chloride (PAC). Operational parameters as an optimum dose, concentration and pH were determined for each one of them.

Powder activated carbon (CAP) was used for the adsorption process, which was tested alone and in combination with the three types of coagulants. A higher efficiency was showed when CAP was combined with coagulant.

Finally, it was tested with the Fenton reaction as Advanced Oxidation Process (POA), in which hydrogen peroxide and ferrous sulfate were used as reagents. However, treatment with this process was not as effective as expected.

When comparing the results of the tests carried out, CAP before the coagulation with S.A. type A and CAP before the coagulation with PAC were chosen as the most appropriate processes for the treatment of these waters, which presented a removal over 90% of pollutants.

---

\* Degree Work

\*\* Science Faculty. Chemistry Department. Director: Msc. Luz Yolanda Vargas Fiallo.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación de los recursos hídricos por hidrocarburos es un hecho que ocurre con relativa frecuencia. Este tipo de contaminación produce un cambio en las características organolépticas del agua que induce al rechazo de los consumidores, y su ingesta representa un riesgo para la salud, debido a su toxicidad química que podría generar efectos letales en los seres vivos; asimismo, el ecosistema puede sufrir afectaciones debidas al impacto negativo de estos contaminantes.<sup>1</sup> Por esta razón, es prioritario generar proyectos que permitan atenuar esta problemática, garantizando la descontaminación ambiental y la salud pública.

Actualmente, en una terminal de combustibles se encuentra un tanque sumidero, el cual contiene 5000 galones de agua con trazas de hidrocarburos provenientes del lavado de tanques de almacenamiento de combustible. Debido a las características que presentan estas aguas, la terminal requiere aplicar un tratamiento que incorpore transformaciones físicas y químicas con el fin de producir agua reutilizable en el ambiente, teniendo en cuenta la normatividad vigente que rige el reúso de aguas residuales en Colombia.

Los procesos conocidos para el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos son variados y comprenden desde procedimientos convencionales hasta unos más avanzados. Para este trabajo, resultan de particular interés los procesos que permiten la remoción de contaminantes basados en los principios de coagulación-floculación, adsorción y procesos de oxidación avanzada (POA).

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización química de las partículas coloides que se produce al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas, por medio de la adición de coagulantes y la aplicación de la energía de mezclado, seguido de esto viene la floculación, la cual consiste en la agitación suave de la masa coagulada para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar su tamaño y alcanzar el peso necesario para sedimentar con facilidad.<sup>2</sup> Estos procesos son de fácil acceso y bajo costo, debido a la metodología y reactivos que se usan.

La adsorción, es el proceso mediante el cual se extraen contaminantes presentes en el agua y se concentran sobre la superficie de un sólido; entre los absorbentes más usados se destaca el carbón activado, debido a su gran área superficial, su estructura microporosa altamente desarrollada y su química superficial,

propiedades que le confieren una buena capacidad de adsorción para remover diversos contaminantes del agua.<sup>3</sup>

Los POA se basan en su capacidad de generación in-situ del radical  $\bullet\text{OH}$ , especie con un elevado potencial de oxidación, mediante la combinación de un agente oxidante con un catalizador y/o radiación ultravioleta, estos radicales son capaces de oxidar muchos compuestos orgánicos de forma no selectiva y con altas velocidades de reacción. Dentro de estos procesos, uno de los más conocidos es Fenton, en el cual, la generación de radicales  $\bullet\text{OH}$  tiene lugar al combinar peróxido de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) con una sal de hierro (II).<sup>4</sup> Este proceso utiliza reactivos caros, por lo que el costo del proceso puede llegar a ser elevado, pero su efectividad en aguas con materia orgánica que no es capaz de degradarse por un proceso convencional, lo convierte en una alternativa viable.

Por todo lo anterior, este trabajo de investigación tiene como objetivo establecer un tratamiento óptimo que permita tratar las aguas con trazas de hidrocarburos almacenadas en la terminal de combustibles, basándose en la caracterización fisicoquímica previa de estas aguas, las condiciones operacionales de los procesos escogidos y los parámetros establecidos en la Resolución 1207 del 2014.

## 1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

A continuación se presentan algunos aspectos y fundamentos básicos en el tratamiento de aguas. Asimismo, se describen los principios de los experimentos empleados en el desarrollo del presente trabajo.

### 1.1. AGUA

Según la Real Academia Española, el agua (del latín aqua) es la “sustancia formada por la combinación de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno”, es líquida, inodora, insípida, en pequeñas cantidades es incolora y verdosa o azulada en grandes masas”. El agua es considerada como uno de los recursos naturales más fundamentales para el desarrollo de la vida, y junto con el aire, la tierra y la energía, constituye los cuatro recursos básicos en que se apoya el desarrollo de la vida.<sup>5</sup>

El agua es el compuesto más abundante en la Tierra, cubriendo las tres cuartas partes de esta. Sin embargo, diversos factores limitan la disponibilidad de agua para uso humano. El 97 % del agua total del planeta se encuentra en los océanos y otras masas salinas, lo que la hace inservible para el consumo, la agricultura y la mayor parte de usos industriales. El 3 % restante se conoce como agua dulce por su baja concentración de sales minerales disueltas, de esta, un 2,38 % aproximadamente, se encuentra en estado sólido, resultando prácticamente inaccesible y solo el 0,62 % que se encuentra en arroyos, ríos, lagos, lagunas y aguas subterráneas, es la usada por el hombre para su consumo y demás actividades agroindustriales.<sup>6</sup>

### 1.2. CALIDAD DEL AGUA<sup>7</sup>

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de esta, las características más comunes utilizadas para evaluar la calidad del agua se relacionan con la salud de los ecosistemas, seguridad de contacto humano y agua potable.

- **Características físicas:** Son llamadas así porque pueden impresionar a los sentidos y tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua. Las más importantes son: turbiedad, sólidos solubles e insolubles, color, olor y sabor, temperatura y pH.

- **Características químicas:**
  - **Inorgánicas:** abarca todos los cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^1$ ), aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{F}^-$ ), metales, etc. Todos indican, en cada momento, las características del agua que interesan para un objeto propuesto. Pueden encontrarse de diversas formas, como macroconstituyentes, elementos traza o incluso de manera esporádica.
  - **Orgánicas:** son el grupo más amplio y complejo, abarcando por un lado indicadores del contenido orgánico en general como la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) o bien otros como aceites y grasas, fenoles, etc.
- **Características biológicas:** Comprenden dos amplios campos muy diferenciados: los bacterianos como coliformes totales y fecales, mesófilos, entre otros, y los de los demás organismos vegetales o animales como pseudomonas,

Hoy en día, el principal problema relacionado con la calidad del agua lo constituye la contaminación, resultado de un aumento de compuestos que alteran la composición y propiedades del agua, afectando los diferentes usos que esta pueda tener.

### 1.3. CONTAMINACIÓN HÍDRICA<sup>8</sup>

Según Organización Mundial de la Salud, el agua está contaminada cuando su composición o estado están alterados de tal modo que ya no reúne las condiciones adecuadas para ser utilizada beneficiosamente en el consumo del hombre y demás seres vivos.

La contaminación de las aguas puede proceder de fuentes naturales o de actividades humanas. En la actualidad la más importante es la provocada por el hombre. El desarrollo y la industrialización implican un mayor uso de agua, una gran generación de residuos de los cuales muchos van a parar al agua y el aumento en el uso de medios de transporte fluvial y marítimo que, en muchas ocasiones, son causa de contaminación de las aguas.

#### 1.3.1. CONTAMINACIÓN HÍDRICA POR HIDROCARBUROS<sup>8</sup>

Los hidrocarburos son compuestos químicos constituidos principalmente por átomos de carbono e hidrógeno. Además, pueden contener otros elementos en menor proporción como oxígeno, nitrógeno, azufre, halógenos (cloro, bromo, yodo, flúor), fósforo, entre otros.

Los hidrocarburos derivados del petróleo (TPH), pertenecen a una gran familia de compuestos químicos originados de petróleo crudo. Debido a que hay muchos

productos químicos diferentes en el petróleo crudo y en otros productos de petróleo, no es práctico medir cada uno en forma separada. Sin embargo, es útil medir la cantidad de TPH en un sitio. Algunas sustancias químicas que pueden encontrarse en los TPH incluyen hexano, combustible, aceites minerales, benceno, tolueno, xileno, naftalina, etc.

Las diferentes fracciones de TPH tienen comportamientos muy diferentes en el medio ambiente, por sus características físicas o su composición química. Según el tipo de hidrocarburo tenderá a volatilizarse y a dispersarse con facilidad en el agua (los más ligeros) o a hundirse y sedimentar en el fondo (los más pesados).

De este modo, algunos de los efectos que tienen estos hidrocarburos sobre la salud humana y el medio ambiente son:

- Asfixia de animales acuáticos, ya que se genera una disminución del oxígeno disuelto y una reducción de la transmisión de luz.
- Toxicidad química, la cual puede generar efectos letales y sub letales en los seres vivos.
- Cambios ecológicos, por la pérdida de organismos en una comunidad o la pérdida total de esta.

#### **1.4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES<sup>9</sup>**

Los contaminantes presentes en las aguas residuales pueden eliminarse con procesos químicos, físicos y/o biológicos. Estos procesos se utilizan conjuntamente en los sistemas de tratamiento de aguas residuales con el fin de alcanzar una combinación óptima que permita llegar al objetivo de tratamiento establecido, y que se ajuste a las normativas legales que regulan la calidad del agua.

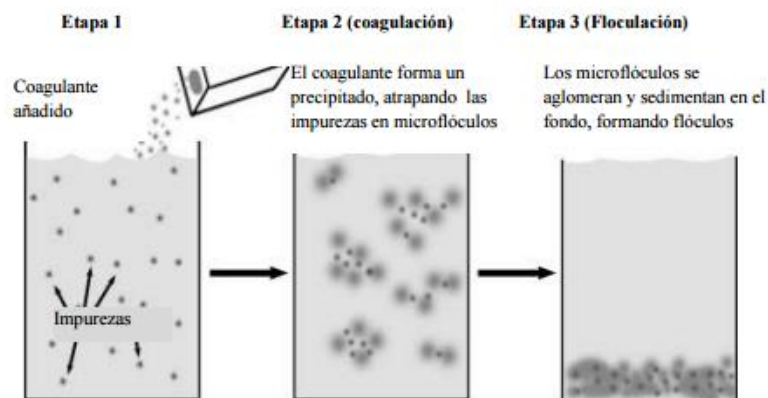
Los avances en investigaciones acerca del efecto de contaminantes, normas ambientales más estrictas, y factores económicos, han generado nuevas tecnologías. Algunas de ellas buscan recuperar ciertos materiales reutilizables que antes se desechaban, mientras que otras están encaminadas a eliminar contaminantes orgánicos tóxicos y persistentes, o simplemente reducen su concentración hasta niveles permitidos.

Los procesos más deseables para tratar aguas residuales son aquellos capaces de eliminar los compuestos contaminantes o transformarlos en materiales inocuos al hombre y a la naturaleza a un bajo costo.

### 1.4.1. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN <sup>10</sup>

La coagulación y floculación es un tratamiento esencial para remover aquellas partículas que, debido a su pequeño tamaño (usualmente menor a 10  $\mu\text{m}$ ), no precipitarían en un tiempo razonable (de 30 a 60 min).

La coagulación se define como el proceso que incluye a todas aquellas reacciones, mecanismos y productos involucrados en la desestabilización de las partículas en el agua. Esta definición abarca tanto la formación del coagulante in situ, la desestabilización de las partículas, así como el inicio del contacto físico entre ellas, para la formación de flóculos de partículas. La floculación, por otro lado, se refiere al proceso de contacto de los flóculos para formar conglomerados de mayor peso, tamaño y resistencia, que precipitan más rápidamente. El proceso de coagulación y floculación se representa en la Figura 1.



**Figura 1.** Proceso de coagulación y floculación en el agua. Tomado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5173/Te sis.pdf?sequence=1>

**Factores que influyen en el proceso de coagulación y floculación.** Son diversos los factores que influyen en este proceso para tratar el agua. Estos se pueden dividir en cuatro principales categorías:

- Características del coagulante: el tipo y la dosis del coagulante
- Características del agua: el pH, la concentración de partículas coloidales, el color, los aniones y cationes en solución, la temperatura.
- Características del mezclado: el tiempo y gradiente de la agitación del agua, equipo de mezclado
- Características de las partículas: el potencial Z, la capacidad de flotar (ej. en las algas).

El pH del agua es un factor determinante en la eficiencia de la coagulación y floculación de las partículas, especialmente cuando se utilizan sales metálicas como el sulfato de aluminio, debido a que la hidrólisis de dichas sales dependerá del valor del pH del agua. Para un agua en particular, existirán especies de la hidrólisis de la sal metálica que sean más efectivas para llevar a cabo la desestabilización de las partículas. Por ello, ajustar el pH a un intervalo donde se consigan las especies de la hidrólisis deseadas llevará a obtener una coagulación óptima.

La presencia de aniones en el agua, tales como sulfatos, silicatos o fosfatos, puede provocar que se dé un restablecimiento de la carga superficial de las partículas, inicialmente negativas, y que nuevamente se dispersen en el agua. Además, los aniones pueden aumentar la demanda de coagulante, pues, al igual que la superficie de las partículas, atraerán a las especies catiónicas del coagulante. Por otro lado, los cationes en el agua como  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , pueden tener un efecto positivo en la coagulación de las partículas en el agua, debido a que se pueden presentar los fenómenos de reducción de la carga negativa de la superficie de las partículas y la minimización de las fuerzas de repulsión eléctrica entre ellas, asistiendo así a la coagulación.

En el caso del mezclado del agua, los reactores de mezcla rápida deben proveer el tiempo y la intensidad de mezclado necesario para favorecer el contacto entre las partículas y el coagulante, para formar así los flóculos. Esto se debe a que la reacción de adsorción del coagulante y la desestabilización de carga de las partículas dura pocos segundos.

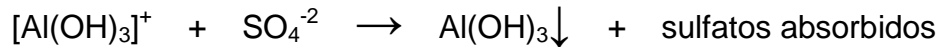
El potencial Z es la medida de la carga eléctrica que poseen las partículas en su superficie. Este número puede ser utilizado para conocer el momento en el que se ha alcanzado el punto “isoelectrico” en la suspensión (potencial Z igual a cero), es decir, cuando la carga superficial en las partículas ha sido neutralizada.

#### **1.4.1.1. REACTIVOS UTILIZADOS EN LA COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN. <sup>11</sup>**

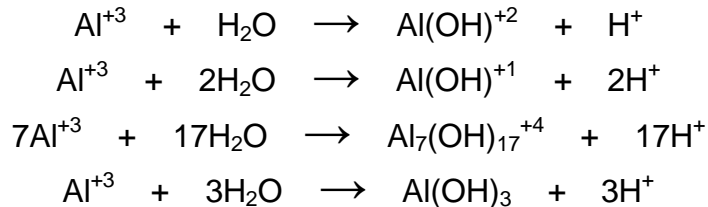
Las principales funciones de los reactivos coagulantes son desestabilizar las partículas en suspensión y aglomerar éstas en flóculos de mayor tamaño, peso y resistencia, respectivamente. Los reactivos deben tener un bajo costo, ser de fácil manejo, ser fácilmente disponibles y estables durante el periodo que se les almacene.

Los factores que influyen en la elección de la dosis y el tipo de coagulante son principalmente: las características del coagulante, la calidad del agua y las partículas en suspensión. Debido a esto y a que aún no es posible predecir con exactitud la interrelación de estos tres factores, se debe realizar la evaluación empíricamente.





También se puede afirmar que el  $\text{Al}^{+3}$  reacciona inmediatamente con el agua para formar iones acuimetalicos e hidrogeno.



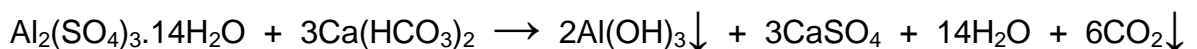
Estos iones acuimetalicos son adsorbidos por el coloide negativo y neutralizan su carga superficial permitiendo la coagulación.

Los coloides son barridos por los flóculos formados, al ser atrapados dentro de ellos durante la floculación y sedimentación; en otras palabras, los precipitados de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  atrapan los coloides efectuando una coagulación por barrido. Debe tenerse en cuenta, que si se sobredosifica el coagulante, el fenómeno puede revertirse y resurgir el coloide negativo causando nuevamente el problema de turbiedad y color.

Es importante que el sulfato de aluminio sea distribuido a través de toda el agua rápidamente, con el fin de que se logre el contacto con todas las partículas coloidales. Esto se logra mediante una mezcla instantánea que provea una buena distribución del coagulante en el menor tiempo posible.

Durante la floculación, generalmente un periodo de 10-30 minutos, se completa la aglomeración de las partículas y crecen los flóculos hasta una condición adecuada para su sedimentación. Durante la sedimentación el floculo se asienta para dejar un líquido clarificado.

Cuando se añade sulfato de aluminio al agua, éste reacciona con la alcalinidad natural del agua para formar flóculos de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ :



La producción de  $\text{CO}_2$  es indeseable puesto que incrementa la corrosividad del agua. Si el agua no contiene alcalinidad suficiente para reaccionar con el alumbre, es necesario añadir la alcalinidad necesaria, esto se hace con la ayuda de un alcalinizante.

- **Policloruros de aluminio (PAC,  $Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)} \cdot H_2O$ )** <sup>10</sup>

Cuando el sulfato de aluminio se agrega al agua, los iones metálicos se hidrolizan rápidamente, pero de manera no controlada, formando una amplia variedad de especies de la hidrólisis del metal. Esta diversidad de compuestos que podían obtenerse, motivó el desarrollo de coagulantes inorgánicos prehidrolizados que permitieran obtener sólo los productos de la hidrólisis que se deseaban, independientemente de las condiciones del proceso de coagulación. Estos productos ya habían sido desarrollados en Japón en los primeros años de la década de los 60's pero fue hasta 1985 cuando aparecieron en el mercado y fueron nombrados genéricamente como policloruros de aluminio o PAC.

Las principales ventajas de los PAC son las siguientes:

1. Liberan al agua especies iónicas altamente cargadas y con moderado peso molecular. Estas especies ya se encuentran preformadas por lo que no requieren condiciones específicas de temperatura, pH, alcalinidad, entre otras; como sucede con el sulfato de aluminio.
2. Pueden operar eficientemente sobre un amplio intervalo de pH (6-9) del agua.
3. Pueden utilizarse para el tratamiento de aguas de baja alcalinidad y alta turbiedad.
4. Causan una menor variación en el pH del agua tratada, si se le compara con aquella provocada por el sulfato de aluminio.
5. Producen menor cantidad de iones metálicos residuales.
6. Forman flóculos más compactos y densos, debido a que estos coagulantes contienen, en su estructura, especies poliméricas que atrapan a un mayor número de partículas.

Los PAC son producidos adicionando una base al cloruro de aluminio hasta lograr la fórmula empírica  $Al(OH)_nCl_{3n}$ , donde n toma valores que van de 1 a 2.5.

#### **1.4.1.2. PRUEBA DE JARRAS PARA EVALUAR LA COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN** <sup>10</sup>

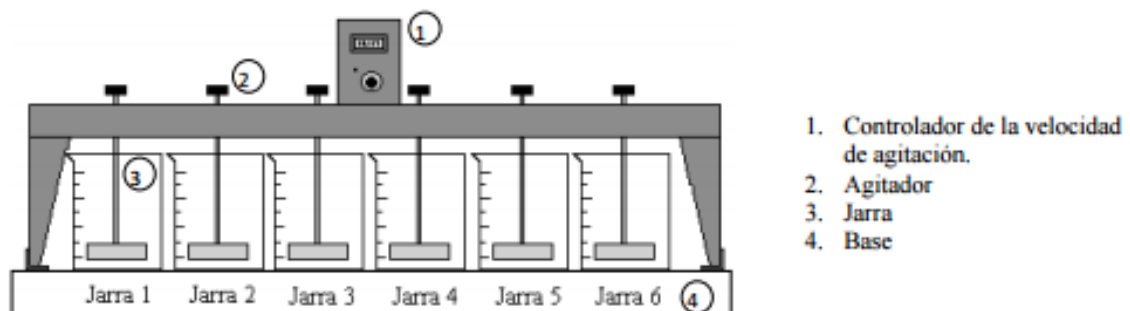
A pesar de que cada vez se conoce aún más de la teoría y las reacciones químicas que ocurren en la coagulación y la floculación, siempre es necesario emplear una prueba práctica para la selección final de las condiciones del proceso.

La prueba de jarras es útil cuando se requiere evaluar un número de condiciones y variables a pequeña escala y sin emplear altas cantidades de reactivos. Esta prueba es reconocida universalmente como la práctica más valiosa y común para simular en laboratorio el proceso de coagulación y floculación de la planta, debido

a que es una prueba rápida, de bajo costo y de la cual se pueden obtener resultados confiables, por lo que se utiliza en muchas aplicaciones.

El objetivo de la prueba de jarras es simular, lo mejor posible, las condiciones deseadas en las instalaciones de coagulación y floculación. El procedimiento general para esta prueba consiste en una mezcla rápida, donde se agrega el coagulante, seguida de un periodo de mezcla lenta para simular la floculación.

La Figura 2, muestra el equipo clásico que se utiliza para la realización de la prueba de jarras. El equipo consiste, por lo general, de seis contenedores (comúnmente de 1 L de capacidad y cilíndricos), y en cada uno se ubica un agitador (que puede ser de paleta, de barra magnética o hélice), sin embargo, las diferencias entre la capacidad de las jarras, su forma y el tipo de mezclador no tienen un impacto apreciable en el desempeño del aparato. El equipo de prueba de jarras cuenta además con un controlador de la velocidad de agitación del agua, lo que puede ayudar a simular las condiciones de mezclado reales a escala de planta.



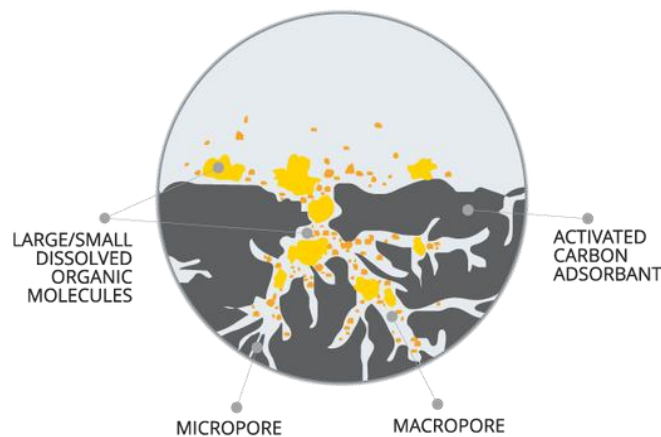
**Figura 2.** Equipo utilizado en pruebas de jarras. Tomado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5173/Tesis.pdf?sequence=1>

#### 1.4.2. ADSORCIÓN <sup>12</sup>

La adsorción es un proceso por el cual los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos, estas fuerzas de atracción son conocidas como " fuerzas de Van Der Waals". Por lo tanto al ser un fenómeno que ocurre en la superficie mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido, mejor adsorbente podrá ser.

El carbón activado, es el material más usado en los procesos de adsorción, ya que posee una estructura microcristalina similar a la del grafito. Esta estructura normalmente da lugar a una distribución de tamaño de poro bien determinada, en la que se pueden distinguir tres tipos de poros según su radio: macroporos ( $r > 25$  nm), mesoporos ( $25 > r > 1$  nm) y microporos ( $r < 1$  nm) (Figura 3).

Los microporos tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas que aproximadamente corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y muchos solventes. Los macroporos atrapan moléculas grandes, tales como las que son cloradas o las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) que se generan al descomponerse la materia orgánica. Los mesoporos son los apropiados para moléculas intermedias entre las anteriores.



**Figura 3.** Estructura química del carbón activado. Tomado de: <https://carbonverde.wordpress.com/2016/02/03/antecedentes/>.

Para el tratamiento de aguas residuales, el carbón activado es producido a partir de la madera en forma granular o en polvo. Este carbón posee una estructura macroporosa por lo cual su superficie interna es muy grande (del orden de los 1000 m<sup>2</sup>/g), haciendo que tenga una adsorción ideal para ser utilizado en la eliminación de contaminantes presentes en el agua.

El carbón activado granular consiste en partículas de tamaño entre 1-3 mm y este se coloca dentro del cuerpo de un tanque de manera similar como se coloca la resina o la arena en un tanque, donde es retenido mientras el agua pasa a través del lecho de carbón activado. El agua se disminuye uniformemente y se retrolava periódicamente para evitar canalizaciones y remover impurezas solidas que puedan depositarse en la superficie de las partículas de carbón.

El carbón activado en polvo se emplea en el tratamiento de aguas por medio de la adición al efluente directamente en las unidades de tratamiento o formando parte de los procesos fisicoquímicos, y su uso proporciona altos rendimientos de eliminación de contaminantes.

La materia orgánica disuelta se adsorbe en la superficie del CAP y la materia coloidal puede sedimentar por coagulación heterogénea causada por neutralización de la carga superficial entre el carbón activo y las partículas coloidales.<sup>14</sup>

La eliminación del carbón activo en polvo y también de la materia orgánica es más efectiva si se adiciona como coadyuvante junto con sales de  $\text{Al}^{+3}$  y  $\text{Fe}^{+3}$ . El CAP adsorbe algunos de los compuestos orgánicos disueltos y entonces estas partículas de CAP pueden unirse por adsorción y puentes de hidrogeno con el hidróxido metálico formado por el coagulante y ser eliminado por las operaciones convencionales de separación solido-liquido.<sup>14</sup>

Las condiciones óptimas de aplicación del CAP es de 3 a 5 minutos antes de la adición del coagulante, si las condiciones lo permiten, este tiempo de contacto es suficiente para adsorber la materia orgánica disuelta y formar parte del contenido de sólidos en suspensión. El CAP usado en el proceso se elimina con el lodo y puede ser regenerado.<sup>14</sup>

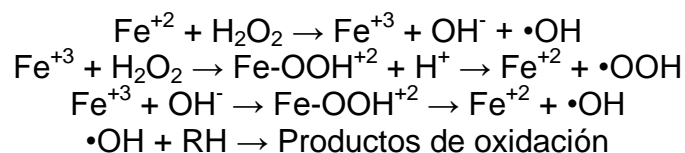
### 1.4.3. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)<sup>15</sup>

Los procesos de oxidación avanzada comúnmente llamados POA son aquellos tratamientos terciarios que están basados en la generación de especies fuertemente oxidantes, que tienen como objetivo principal la eliminación de compuestos solubles no biodegradables, presentes en las aguas residuales.

El proceso consiste en una oxidación química en condiciones suaves de presión y temperatura hasta la mineralización completa de contaminantes. El agente oxidante es una especie radical denominada hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) con una elevadísima capacidad oxidante y con tiempos de reacción muy cortos. Debido a la altísima reactividad de esta especie, es posible eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos logrando así una reducción de DQO y toxicidad en las aguas residuales tratadas. Además la generación de radicales se realiza a partir de oxígeno, agua oxigenada y catalizadores soportados, por lo que los subproductos de reacción son únicamente agua y dióxido de carbono.

La versatilidad de los POA se encuentra en el hecho de que ofrecen diferentes maneras de producir los radicales hidroxilos.

La reacción de Fenton fue propuesta por Henry John H. Fenton en 1894 para la oxidación de ácido tartárico utilizando una disolución de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y sales ferrosas ( $\text{Fe}^{+2}$ ), a  $\text{pH} < 3$ . Esta mezcla es capaz de oxidar compuestos orgánicos a través de la generación de radicales hidroxilos como resultado de la descomposición catalítica del peróxido en medio ácido, de acuerdo con las siguientes reacciones:<sup>16</sup>



Estas reacciones son propagadas por la generación del  $\text{Fe}^{+2}$  en la reacción, la cual ocurre por la reducción del  $\text{Fe}^{+3}$  en presencia del  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

Para que el procedimiento sea efectivo son necesarios los siguientes requisitos: <sup>17</sup>

- El pH del agua a tratar debe estar en el rango de 2 a 3. Debido a que, a valores más elevados, el hierro precipita como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  inactivando por tanto el sistema. Además, si el pH es elevado el  $\text{H}_2\text{O}_2$  se descompone hasta oxígeno.
- La adición de  $\text{H}_2\text{O}_2$  debe ser muy lenta con objeto de evitar fenómenos de descomposición.
- La dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  se debe determinar a partir de la concentración de DQO del agua, con el fin de obtener el peróxido estequiométrico necesario para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica. A partir de la siguiente ecuación se establece una relación entre la DQO y el agente oxidante:  
$$2 \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$$
donde 1 g de DQO equivale a 0,03125 mol  $\text{O}_2$  y 0,0625 mol  $\text{H}_2\text{O}_2$ .
- Las relaciones de  $\text{Fe}^{+2}:\text{H}_2\text{O}_2$  generalmente son de 1:5-10 en peso.

**Efecto del post-tratamiento**<sup>17</sup>: Como consecuencia de la degradación de compuestos orgánicos complejos en fragmentos más pequeños, el efluente peroxidado es generalmente más adecuado para el tratamiento convencional, ej. Floculación. La presencia de hierro en la mezcla de reacción lo hace particularmente deseable para la floculación con cal.

## 1.5. REUTILIZACIÓN DEL AGUA <sup>18</sup>

Cuando se dispone de suficiente agua es lógico pensar en eliminar el agua residual, pero las ubicaciones geográficas caracterizadas por periodos de sequía, han obligado a considerar su aprovechamiento y a calificar esta agua como un recurso más del que disponer.

Por esto, el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas, que normalmente se vierten a los cauces y mares, está recibiendo cada vez más atención como una fuente fiable de nuevos recursos, muy constante en el tiempo e independiente de sequías climáticas. La regeneración y posterior reutilización de las aguas supone un importante medio para mitigar la escasez, al tiempo que reduce el vertimiento de sustancias contaminantes al medio ambiente.

El agua regenerada constituye una fuente idónea para sustituir recursos de primera utilización en usos que no requieren un grado de calidad tan alto. Muchas aplicaciones de las aguas urbanas, comerciales, industriales y, por supuesto, agrícolas pueden satisfacerse con una calidad inferior a la potable.

El riego de césped, parques y de las vías públicas, el agua empleada en acondicionamiento de aire y torres de refrigeración, en algunos procesos industriales, en la higiene de servicios sanitarios, en la construcción, labores de limpieza y mantenimiento, las aguas utilizadas en fuentes y otros usos ornamentales, en aplicaciones medioambientales y recreativas, son algunos ejemplos de usos potenciales del agua regenerada. La reutilización directa para consumo humano no es todavía una opción disponible, debido a su especial incidencia sobre la salud pública.

Además, hoy en día ya no es necesario trasladar las aguas residuales a lugares remotos, a través de costosas redes de saneamiento a depuradoras de gran dimensión y difícil determinación. La regeneración y reutilización puede ser llevada a cabo por máquinas diseñadas y construidas para ser instaladas de forma rápida y eficiente en el lugar donde se encuentra el agua residual que ha de ser regenerada.

## 2. MARCO LEGAL

### **RESOLUCIÓN 1207 DE 2014. Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas**<sup>19</sup>

Con la expedición de esta resolución, se presentan alternativas viables que de realizarse correctamente podrían lograr un uso eficiente del agua; reducción de la contaminación; reducción de la demanda de agua en zonas con oferta limitada y hasta cierto punto la transformación de conflictos por agua.

La norma contempla una serie específica de potenciales usos del agua residual tratada y define las obligaciones que los usuarios generadores, usuarios receptores y las autoridades ambientales competentes deben cumplir para obtener, otorgar o modificar los permisos y autorizaciones a que haya lugar para llevar a cabo la reutilización del agua.

En esta resolución se encuentran los criterios de calidad para el uso de agua residual tratada según su uso. (Anexo 1)

Cuando el usuario quiera el agua tratada para un reusó en riego, la Resolución indica que se debe presentar un informe con el grado de restricción aplicable en términos de salinidad, sodicidad y toxicidad. Igualmente, deberá realizar el análisis y reporte de los resultados de los siguientes criterios: Relación de Absorción de sodio (RAS), porcentaje de sodio posible (PSP), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), salinidad efectiva (SE) y potencial (SP), carbonato de sodio residual (CSR).

Para entender mejor estos parámetros, a continuación se realiza una descripción de cada uno.

**SALINIDAD:** El riego continuo con aguas que tienen sales en solución puede traer como consecuencia la salinización de los suelos, reduciendo la disponibilidad de agua para la planta. Las sales incrementan el esfuerzo que la planta debe ejercer para extraer el agua.

Esta salinidad se evalúa mediante los índices de conductividad eléctrica, salinidad efectiva y salinidad potencial.<sup>20</sup>

**SODICIDAD:** Una concentración elevada de sodio en el suelo produce toxicidad en algunos cultivos y además, puede acelerar la degradación de la estructura del suelo. Cuando hay más salinidad, el daño del sodio sobre la estructura del suelo es menor por que las sales ayudan a flocular los componentes del suelo, acción opuesta a la del sodio.<sup>20</sup>

De esta forma, existen varios criterios que ayudan a estimar el daño que puede causar el sodio del agua, siendo los más usados el RAS, el CSR, el PSP y el PSI.

**TOXICIDAD:** Los problemas de toxicidad en las plantas, ocurren cuando un ión absorbido se acumula en las hojas, por efecto de transpiración, hasta el grado que daña la planta. El nivel de daño depende del tiempo, la concentración y la sensibilidad del cultivo y el consumo de agua. Los iones del agua de riego que pueden causar daño en forma individual o combinada son el cloro, el sodio y el boro.<sup>20</sup>

**SALINIDAD EFECTIVA (SE):** La salinidad efectiva mide el efecto de las sales solubles del agua cuando pasan a formar parte de la solución del suelo. Para el cálculo de este criterio se usan las siguientes reglas (meq/L):<sup>20</sup>

- a) Si  $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$ , entonces  

$$SE = \Sigma \text{cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$$
- b) Si  $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$ , pero si  $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ , entonces  

$$SE = \Sigma \text{cationes} - Ca^{2+}$$
- c) Si  $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$  y  $(Ca^{2+} + Mg^{+2}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ , entonces  

$$SE = \Sigma \text{cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$
- d) Si  $(Ca^{2+} + Mg^{+2}) < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ , entonces  

$$SE = \Sigma \text{cationes} - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

La escala de calificación para las aguas de riego según su salinidad efectiva se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 1.** Calificación del agua según su salinidad efectiva.

Escala (meq/L)	Calificación
SE < 5	Buena
5 < SE < 20	Condicionada
20 < SE	No recomendable

**SALINIDAD POTENCIAL (SP):** La salinidad potencial es un criterio que permite estimar el riesgo de las sales anteriores en altas concentraciones y su efecto sobre el potencial osmótico del suelo. Este criterio se calcula con la siguiente fórmula (meq/L):<sup>20</sup>

$$SP = Cl^- + \frac{1}{2} SO_4^{2-}$$

Para establecer la calificación de SP de las aguas de riego se usa la misma escala de clasificación implementada en la salinidad efectiva.

**RELACION DE ADSORCIÓN DE SODIO (RAS):** El RAS es un parámetro que refleja la posible influencia del ion sodio sobre las propiedades del suelo, ya que tiene efectos dispersantes sobre los coloides del suelo y afecta la permeabilidad.

Sus efectos no dependen solo de la concentración de sodio sino también del resto de cationes.

Se basa en una fórmula empírica que relaciona el contenido de sodio, calcio y magnesio; así mismo relaciona el porcentaje de sodio de intercambio en el suelo en situación de equilibrio. Este índice denota la proporción relativa en que se encuentra el sodio respecto al calcio y magnesio, cationes divalentes que con el sodio por los lugares de intercambio del suelo.

El RAS se calcula mediante la siguiente expresión (meq/L):<sup>20</sup>

$$RAS = \frac{Na}{Ca + Mg} \times 100$$

El riesgo según la concentración de sodio en aguas de riego se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 2.** Calificación del agua según RAS.

RAS	Calificación
RAS < 3	Ningún riesgo
3 < RAS < 9	Moderado
9 < RAS	Estricto

**CARBONATO DE SODIO RESIDUAL (CSR):** Este parámetro indica la peligrosidad del sodio una vez que han reaccionado los cationes de calcio y magnesio con los aniones carbonato y bicarbonato. Se calcula mediante la siguiente fórmula (meq/L):<sup>20</sup>

$$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

La calificación del agua según la concentración de CSR se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 3.** Calificación del agua según CSR.

CSR (meq/L)	Calificación
CSR < 1,25	Buena
1,25 < CSR < 2,5	Condicionada
2,5 < CSR	No recomendada

**PORCENTAJE DE SODIO POSIBLE (PSP):** Es la cantidad de sodio que resultaría después de que precipite el CaCO<sub>3</sub>, el MgCO<sub>3</sub> y el CaSO<sub>4</sub>. Con este fenómeno dichos compuestos tienen a aumentar relativamente la proporción de sodio sobre los demás cationes. Se calcula mediante la siguiente fórmula (meq/L):<sup>20</sup>

$$PSP = (Na^+ / SE) * 100$$

Valores por encima del 50 % hacen que el agua tenga una calidad no recomendable para riego.

**PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE (PSI):** La presencia de sodio intercambiable crea condiciones de inestabilidad de los agregados del suelo y del sistema poroso, el hinchamiento y la dispersión coloidal restringen la permeabilidad del suelo al agua y gases, y conduce consecuentemente a problema de enconstramiento, escurrimiento y pobre aireación. El PSI se relaciona con el RAS por medio de la siguiente ecuación: <sup>20</sup>

---

Para utilizar el PSI como índice de calidad de las aguas de riego se evalúa el riesgo de estas por la tendencia a desarrollar suelos sódicos. En la siguiente tabla se resume el riesgo de desarrollar suelos sódicos según el porcentaje de PSI del agua.

**Tabla 4.** Calificación del agua según PSI.

PSI (%)	Riesgo
PSI < 5	Bajo
5 < PSI < 15	Moderado
15 < PSI	No recomendable

Otros índices que pueden tenerse en cuenta para la calidad de agua de riego son los siguientes:

**INDICE DE SATURACION DE LANGELIER (ISL):** Ciertas aguas naturales pueden corroer en frío a metales, calizas, cemento y productos derivados. Esta corrosión, más particularmente llamada agresividad, depende principalmente de dos factores de entre los tres siguientes: anhídrido carbónico libre, alcalinidad y pH.

El ISL es un modelo de estabilidad con aplicaciones industriales que se basan en nomogramas y que deriva del concepto de solubilidad o saturación de sales poco solubles; en pocas palabras, es un indicador de dicha agresividad. Este índice se establece para una temperatura determinada y mide el estado de equilibrio del agua en relación con su carácter incrustante o corrosivo. El ISL correlaciona la solubilidad de las sales con el pH como variable principal, y con otros parámetros como la temperatura, la alcalinidad y la dureza. En el laboratorio, el ISL se calcula experimentalmente de acuerdo a la siguiente fórmula, siendo pH<sub>a</sub> el pH al que se encuentra el agua y pH<sub>s</sub> el valor al que comenzara a precipitar el CaCO<sub>3</sub>: <sup>20</sup>

$$\begin{aligned}
 \text{ISL} &= \text{pH} - \text{pHs} \\
 \text{pHs} &= (9,3 + A + B) - (C + D) \\
 A &= (1/10) * (\text{Log} [\text{ST}] - 1) \\
 B &= -13,12 * \text{Log} (T + 273) + 34,55 \\
 C &= \text{Log} [\text{DC}] - 0,4 \\
 D &= \text{Log} [\text{Alc}]
 \end{aligned}$$

Donde,

pH = pH real

pHs = pH de saturación

ST = Sólidos totales

T = Temperatura en °C

DC = Dureza cálcica expresada en mg CaCO<sub>3</sub>/L

Alc = Alcalinidad al metil-naranja en mg CaCO<sub>3</sub>/L

Las indicaciones para el ISL están basadas en los siguientes valores:

**Tabla 5.** Calificación del agua según ISL.

ISL	Indicación
ISL < 0	Agua no saturada con respecto a carbonato de calcio. El agua no saturada posee la tendencia de eliminar láminas de carbonato cálcico presentes que protegen las tuberías y equipos
ISL = 0	Agua considerada neutral. No existe formación de incrustaciones ni eliminación de las mismas.
ISL > 0	Agua sobresaturada con respecto a carbonato de calcio. Posible formación de incrustaciones

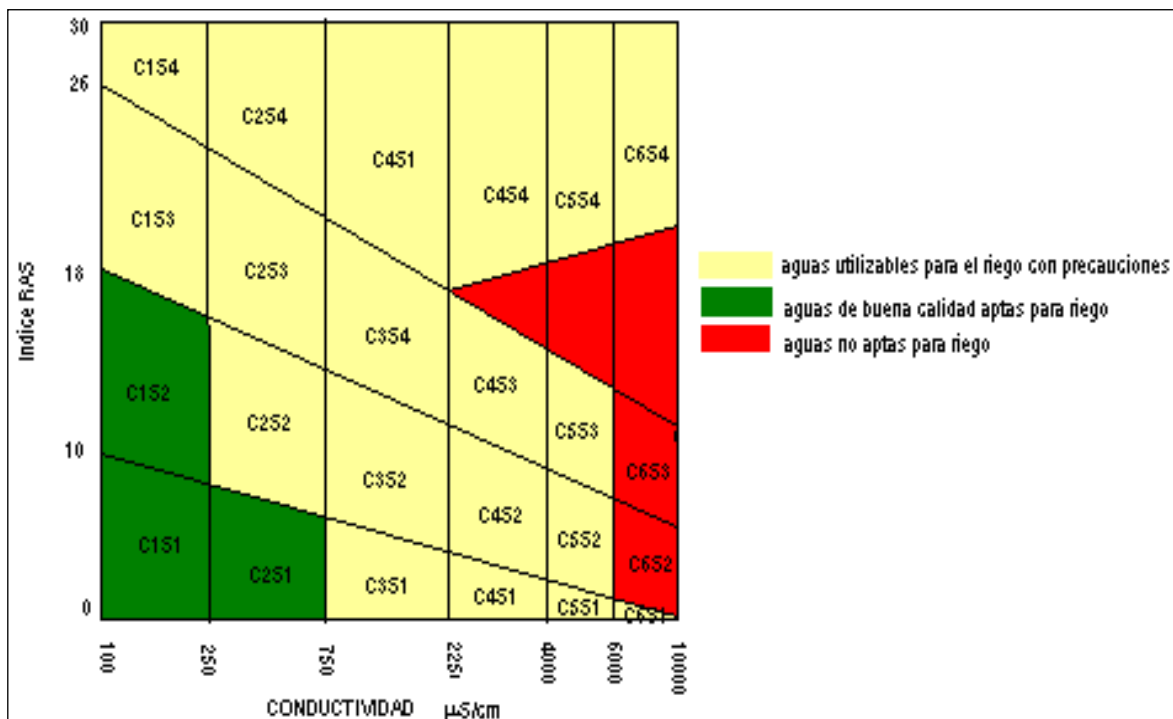
Si el ISL tiene un valor negativo se trata de agua con tendencia corrosiva; en cambio, para valores de ISL positivos el agua tendrá una tendencia incrustante provocando la deposición de CaCO<sub>3</sub>.

La calidad del agua también se puede medir según el ISL modificado por Carrier, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 6.** Calificación del agua según ISL modificado por CARRIER.

ISL (Carrier)	Indicación
-2,0 < ISL < -0,5	Corrosión severa
-0,5 < ISL < 0	Corrosión leve pero sin formación de incrustaciones
ISL = 0	Equilibrada pero posible corrosión leve
0 < ISL < 0,5	Formación leve de incrustaciones y corrosiva
0,5 < ISL < 2	Formación de incrustaciones pero no corrosiva

**NORMAS RIVERSIDE:** Las normas Riverside son un sistema de clasificación de las aguas para riego desarrollado por el servicio de agricultura de Estados Unidos. Tiene gran aceptación internacional porque basan su estructura en relación con dos criterios importantes: la conductividad eléctrica y el RAS (Figura 4). Según estos dos índices, se establecen categorías o clases de aguas enunciadas con las letras C y S afectadas de un subíndice numérico (Tabla 7.) De acuerdo con estas normas la muestra es analizada como un posible recurso hídrico que tiene determinada calidad de agua y se establece si es apta para el riego.<sup>20</sup>



**Figura 4.** Normas Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego. Tomado de: <http://es.slideshare.net/inveraceracosac3/manejo-nutricional-de-cultivos-y-su-relacion-con-los-analisis-de-sueloaguaplanta>

**Tabla 7.** Calificación del agua para riego según las normas Riverside.

Tipos	Calidad y normas de uso
C <sub>1</sub>	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
C <sub>2</sub>	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C <sub>3</sub>	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.

C <sub>4</sub>	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C <sub>5</sub>	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
S <sub>1</sub>	Agua con bajo contenido de sodio, apta para el riego en la mayoría de casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S <sub>2</sub>	Agua con contenido medio de sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas el suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario.
S <sub>3</sub>	Agua con alto contenido de sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
S <sub>4</sub>	Agua con contenido de sodio muy alto. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

**ELEMENTOS FITOTÓXICOS:** Para evaluar el riesgo de inducir toxicidad de un agua de riego, se sigue la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, en cuanto al contenido de sodio, cloruros y boro.<sup>20</sup>

**Tabla 8.** Evaluación del riesgo de inducir toxicidad del agua de riego.

Ión	Problema inexistente	Problema creciente	Problema grave
Na <sup>+</sup> (meq/L)	< 3	3 – 9	> 9
Cl <sup>+</sup> (meq/L)	< 4	4 – 10	> 1'
B (mg/L)	< 0,4	0,7 – 2	> 2

### 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología que se presenta en este apartado consistió en simular a nivel de laboratorio el tratamiento que se realizara a gran escala (Figura 5).



*Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología utilizada.*

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA

La caracterización físicoquímica del agua antes de aplicar algún tratamiento se realizó por medio de los métodos establecidos en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales (LQCI) de la UIS.

#### 3.2. COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Para esto se usaron tres tipos de coagulantes: S.A. tipo A, S.A. tipo B y PAC, además de alcalite como alcalinizante. Todos con una concentración inicial de 10% p/v.

En total se realizaron 42 ensayos y los parámetros operacionales empleados en cada ensayo fueron los siguientes:

**Tabla 9.** *Parámetros operacionales para los ensayos en pruebas de jarras.*

<b>Parámetro operacional</b>	<b>Tiempo (min)</b>
Mezcla rápida	1
Mezcla lenta	15
Sedimentación	30

**Dosis óptima de coagulante:** Se realizaron pruebas de jarras siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo 2, adicionando las siguientes cantidades progresivas de coagulante: 1 mL, 3 mL, 5 mL, 8 mL, 10 mL, 12 mL, 15 mL y 20 mL.

**Influencia del pH:** Se realizaron pruebas de jarras siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo 2, modificando el numeral 2 del anexo, para esto, se adiciona la dosis de coagulante seleccionada en los ensayos anteriores y posteriormente, se adicionan las siguientes cantidades progresivas de alcalinizante: 0 mL, 0.25 mL, 0.5 mL, 1 mL, 1.5 mL y 2 mL.

### **3.3. ADSORCIÓN**

Para este proceso se realizaron 15 ensayos, utilizando CAP, donde se llenaron vasos de precipitados con 500 mL de agua a tratar, a estos vasos se les adicionó las siguientes cantidades progresivas de CAP: 0 g, 1 g, 2 g, 4 g, 6 g e inmediatamente se comenzó una agitación rápida la cual se mantuvo por 5 minutos. Pasado este tiempo se siguió el mismo procedimiento descrito en el Anexo 2, adicionando las dosis seleccionadas de coagulante y de alcalinizante.

Posteriormente, se realizaron 3 ensayos más agregando el CAP después del coagulante y otro más agregando solo CAP.

### **3.4. FENTON**

En este proceso de oxidación con el reactivo de Fenton se realizaron 6 experimentos utilizando como reactivos  $H_2O_2$  30% y  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  en diferentes relaciones (2,5:1, 5:1 y 10:1). La cantidad de  $H_2O_2$  se calculó a partir del valor de la DQO, los cálculos se encuentran en el Anexo 3.

Al inicio del proceso se adicionaron 500 mL de agua a tratar y el pH de esta agua se llevó a 3 utilizando  $H_2SO_4$  concentrado. Posteriormente se adicionaron las diferentes cantidades de  $FeSO_4$ , las cuales se dejaron disolver por 5 minutos.

Pasado este tiempo, se adiciono el  $H_2O_2$  dando comienzo a la reacción, manteniendo una agitación por 2 horas. Para terminar la reacción se neutralizo el pH con NaOH 6 N.

Por último, el agua se filtró y se pasó a otro vaso de precipitados donde se hizo flocular con cal y CAP.

### **3.5. DISPOSICIÓN FINAL DEL AGUA TRATADA**

Una vez realizados los ensayos anteriores, se escogieron los dos que dieron mejores resultados. A estos dos tratamientos, se les determinó el volumen de lodos producidos, siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo 4.

Además, se les realizo una caracterización fisicoquímica y se calculó el % remoción de los contaminantes que estaban afectando la calidad del agua, adicionalmente se les realizó un análisis de costos.

Por último, se determinaron los parámetros de SE, SP, CSR, RAS, PSP, PSI, ISL y las normas de Riverside, con el fin analizar la calidad del agua tratada para riego.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA

La siguiente tabla presenta los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua almacenada en el tanque sumidero de la terminal de combustible:

**Tabla 10.** Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua.

Parámetro	Unidad	Valor
<b>Físicos</b>		
pH	<i>Unidades de pH</i>	8,11
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	2.440
Color	UPC	2575,00
Turbiedad	NTU	461,00
Solidos totales (ST)	mg/L	1590,00
Solidos suspendidos totales (SST)	mg/L	446,00
Solidos sedimentables (SSED)	mL/L	7,50
<b>Químicos</b>		
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3/\text{L}$	963,25
Grasas y aceites	mg/L	13,09
TPH	mg/L	11,91
DQO	$\text{mgO}_2/\text{L}$	3317,00
<b>Iones</b>		
Cloruros	$\text{mg Cl}/\text{L}$	127,23
Sulfatos	$\text{mg SO}_4^{2-}/\text{L}$	201,99
<b>Metales</b>		
Aluminio	$\text{mg Al}/\text{L}$	12,60
Cadmio	$\text{mg Cd}/\text{L}$	<0,01
Zinc	$\text{mg Zn}/\text{L}$	0,41
Cobre	$\text{mg Cu}/\text{L}$	<0,068
Cromo	$\text{mg Cr}/\text{L}$	<0,05
Hierro	$\text{mg Fe}/\text{L}$	52,12
Manganeso	$\text{mg Mn}/\text{L}$	0,69
Molibdeno	$\text{mg Mo}/\text{L}$	<0,12
Niquel	$\text{mg Ni}/\text{L}$	<0,05
Plomo	$\text{mg Pb}/\text{L}$	1,15
<b>Metaloides</b>		
Boro	$\text{mg B}/\text{L}$	1,73
<b>No metales</b>		
Selenio	$\text{mg Se}/\text{L}$	4,95

De acuerdo con estos resultados, el objetivo principal del tratamiento que se le aplique al agua almacenada en el tanque sumidero es la remoción de color, turbiedad e hidrocarburos, debido a la elevada concentración que presentan.

Para elegir la dosis óptima de coagulante, CAP y la mejor relación para la reacción de Fenton, se tuvieron en cuenta los parámetros de pH, color y turbiedad, por ser los más sencillos de determinar y de gran importancia en el resultado final del tratamiento. Los demás parámetros se consideraron en el momento de escoger el tratamiento final.

#### 4.1.1. COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

##### 4.1.1.1. Dosis óptima de coagulante

En las siguientes tablas se muestran los resultados de los ensayos realizados para la selección de la dosis óptima de cada coagulante.

**Tabla 11.** Resultados de los ensayos para determinar la dosis óptima de S.A. tipo A.

Jarra	Dosis (mL)	Concentración (ppm)	pH (uds. de pH)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
1	1	200	7,77	2440	440
2	3	600	7,42	2189	395
3	5	1000	7,00	1797	346
4	8	1600	6,49	1408	279
5	10	2000	6,06	1150	230
6	12	2400	5,77	1149	224
7	15	3000	5,35	1152	228
8	20	4000	4,91	1182	247

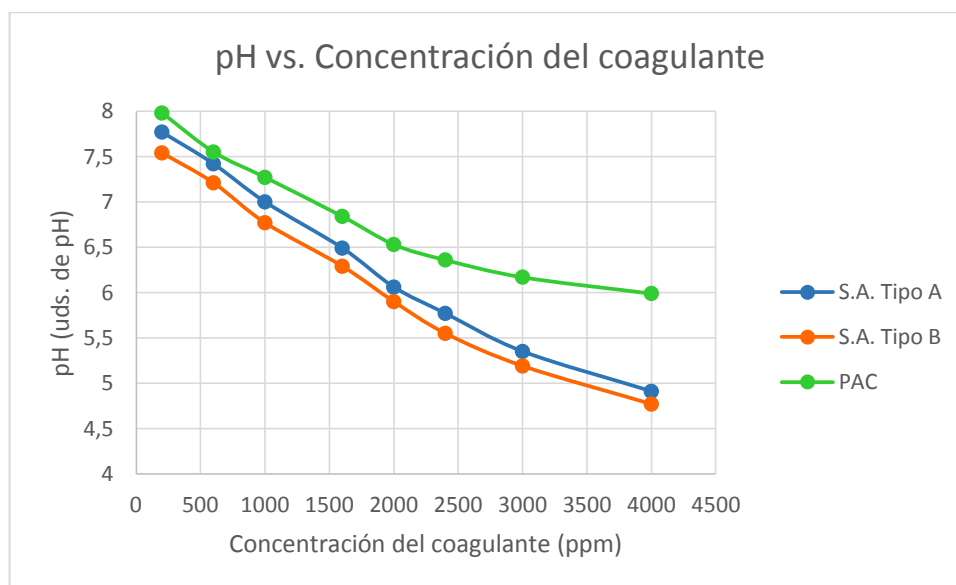
**Tabla 12.** Resultados de los ensayos para determinar la dosis óptima de S.A. tipo B.

Jarra	Dosis (mL)	Concentración (ppm)	pH (uds. de pH)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
1	1	200	7,54	2551	449
2	3	600	7,21	2214	405
3	5	1000	6,77	1889	353
4	8	1600	6,29	1494	286
5	10	2000	5,90	1211	241
6	12	2400	5,55	1212	235
7	15	3000	5,19	1219	238
8	20	4000	4,77	1276	255

**Tabla 13.** Resultados de los ensayos para determinar la dosis óptima de PAC.

Jarra	Dosis (mL)	Concentración (ppm)	pH (uds. de pH)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
1	1	200	7,98	2431	429
2	3	600	7,55	2088	379
3	5	1000	7,27	1699	328
4	8	1600	6,84	1262	249
5	10	2000	6,53	1050	216
6	12	2400	6,36	1062	212
7	15	3000	6,17	1078	214
8	20	4000	5,99	1114	238

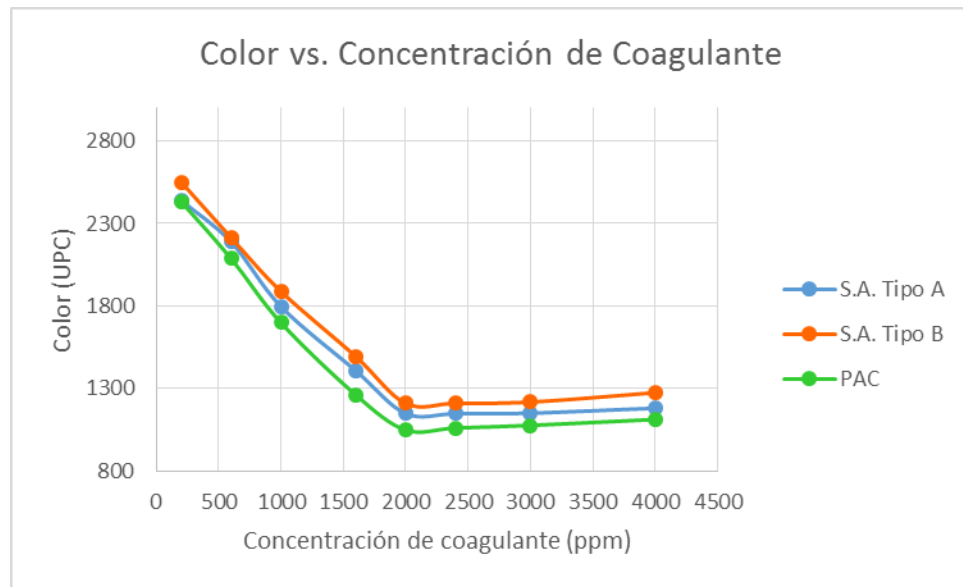
Para determinar la dosis óptima de cada coagulante se estudió la relación de las dosis aplicadas con el valor final del pH, el color y la turbiedad. De esta forma, se realizaron los siguientes gráficos.



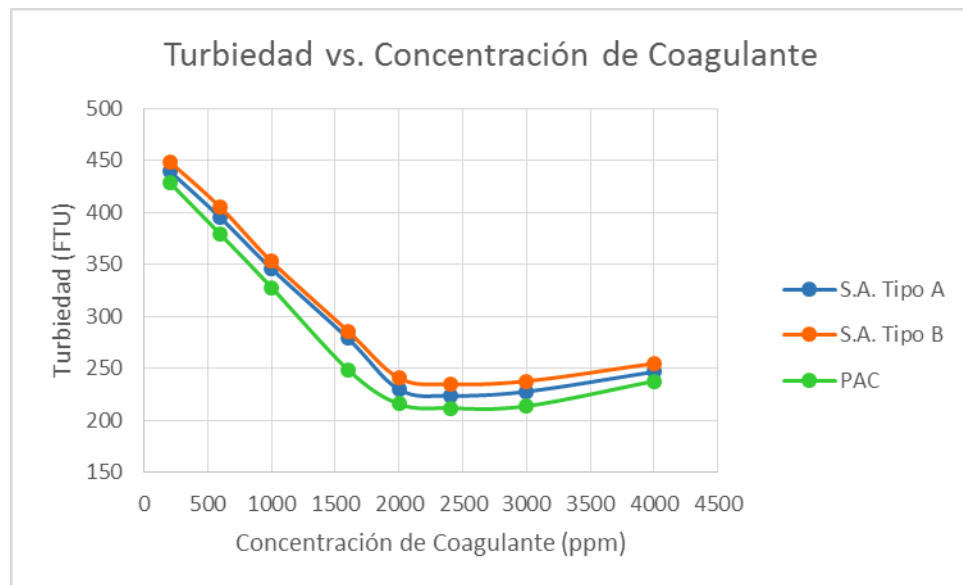
**Figura 6.** Gráfica del valor de pH frente a la concentración de coagulante.

En la figura 6, se observa como al ir aumentando la concentración de coagulante, el pH del agua se va reduciendo; esto se debe, a que cuando el coagulante entra en contacto con el agua, ocurren reacciones de hidrólisis intermedias antes de la formación del precipitado amorfo. En estas reacciones, se liberan protones, los cuales van consumiendo la alcalinidad del agua y de esta forma reduciendo el pH. Sin embargo, se observa que el PAC reduce en menor valor el pH del agua que los sulfatos, debido a su estructura, la cual contiene especies hidrolíticas de

aluminio preformadas de calidad superior y más estables ante las hidrolisis intermedias que se generan.



**Figura 7.** Gráfica del valor del color frente a la concentración de coagulante.



**Figura 8.** Gráfica del valor de la turbiedad frente a la concentración de coagulante.

Las figuras 7 y 8, muestran el comportamiento del color y la turbiedad con respecto a la concentración de coagulante. En estas gráficas, se observa como al ir aumentando la concentración de coagulante, el valor del color y turbiedad

empiezan a disminuir, pero después de una concentración de 3000 ppm estos valores comienzan a aumentar de nuevo.

Este comportamiento ocurre porque al adicionar el coagulante por debajo de la cantidad requerida, las cargas de las partículas coloidales no se alcanzan a neutralizar totalmente, por tanto, la formación de flóculos es escasa y la mayoría partículas como las generadoras de color y turbiedad quedan en solución. Al adicionar el coagulante en exceso, se produce una inversión en las cargas de las partículas, conduciendo a la formación de una gran cantidad de flóculos con tamaños muy pequeños y velocidades de sedimentación muy bajas, lo que hace que la mayoría de partículas, como en el caso anterior, queden en solución.

Por esta razón, es importante seleccionar la dosis adecuada de coagulante, en la cual se logre una neutralización por completo de las partículas coloidales. De esta forma, se determinó que la dosis óptima para los tres coagulantes es de 2000 ppm, ya que esta dosis es la que produce un menor valor de color y turbiedad.

#### 4.1.1.2. Influencia del pH

En las siguientes tablas se muestran los resultados de los ensayos realizados para la concentración de alcalite que se le debe agregar a la dosis óptima de coagulante elegida anteriormente, la cual es de 2000 ppm. En estos ensayos el pH<sub>1</sub> se refiere al pH del agua después de agregar el coagulante y el pH<sub>2</sub> al pH después de agregar el alcalite.

**Tabla 14.** Resultados de los ensayos para determinar la concentración de alcalite para la coagulación con S.A tipo A.

Jarra	Dosis alcalite (mL)	Concentración alcalite (mg/L)	pH <sub>1</sub> (uds. de pH)	pH <sub>2</sub> (uds. de pH)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
1	0,0	0	6,04	6,33	1150	230
2	0,25	50	6,06	6,46	1140	227
3	0,5	100	6,06	6,55	1123	225
4	1,0	200	6,05	6,67	1078	217
5	1,5	300	6,04	6,93	1015	206
6	2,0	400	6,05	7,59	1002	203

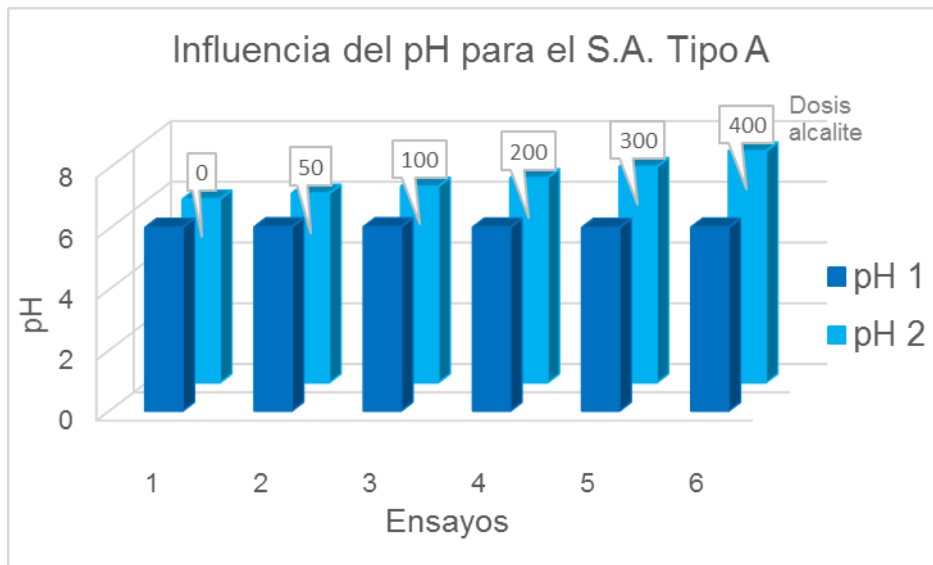
**Tabla 15.** Resultados de los ensayos para determinar la concentración de alcalite para la coagulación con S.A. tipo B.

Jarra	Dosis alcalite (mL)	Concentración alcalite (mg/L)	pH <sub>1</sub> (uds. de pH)	pH <sub>2</sub> (uds. de pH)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
1	0,0	0	6,03	6,02	1211	241
2	0,25	50	6,03	6,10	1193	239
3	0,5	100	6,01	6,32	1180	236
4	1,0	200	6,02	6,60	1142	230
5	1,5	300	6,01	6,88	1108	221
6	2,0	400	6,03	7,23	1070	214

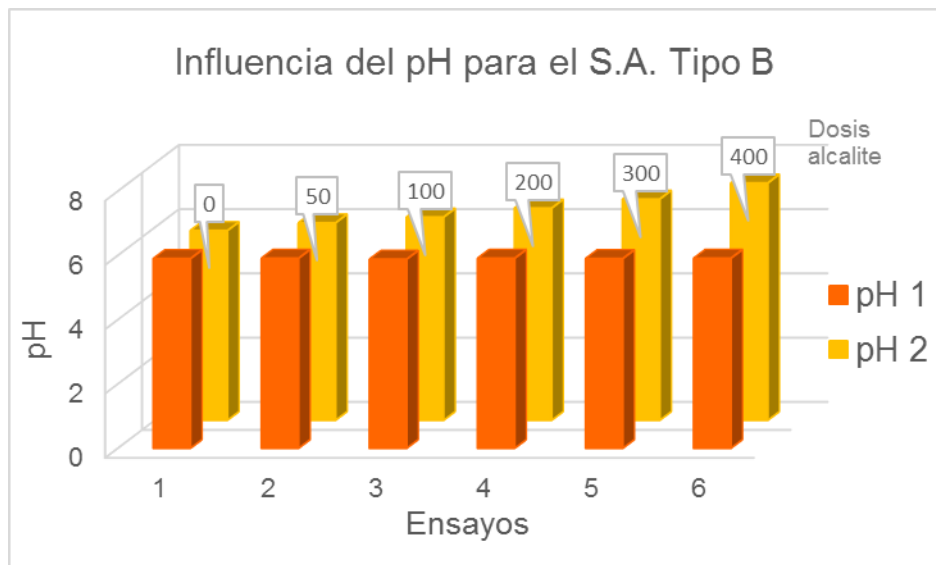
**Tabla 16.** Resultados de los ensayos para determinar la concentración de alcalite para la coagulación con PAC.

Jarra	Dosis alcalite (mL)	Concentración alcalite (mg/L)	pH <sub>1</sub> (uds. de pH)	pH <sub>2</sub> (uds. de pH)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
1	0,0	0	6,59	6,60	1050	216
2	0,25	50	6,60	6,71	1022	207
3	0,5	100	6,60	6,89	997	199
4	1,0	200	6,58	7,26	934	191
5	1,5	300	6,59	7,43	931	190
6	2,0	400	6,58	7,62	939	192

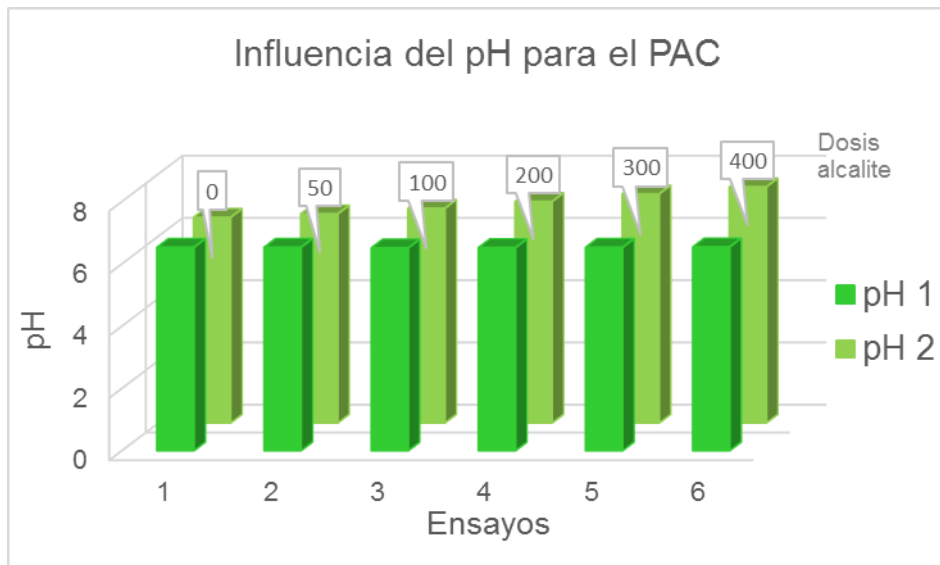
Las siguientes gráficas se realizaron para analizar el comportamiento del pH, el color y la turbiedad con la adición del alcalite



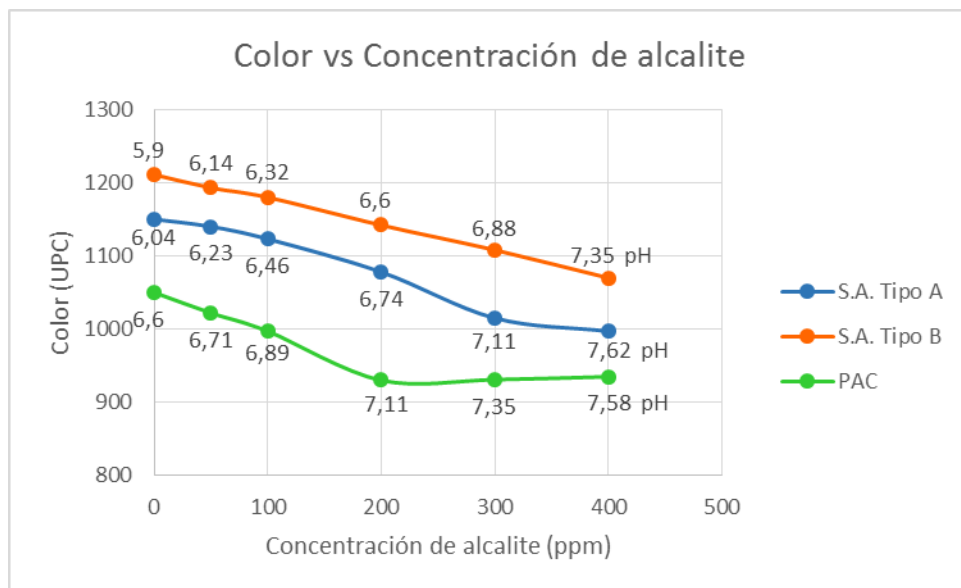
**Figura 9.** Gráfica de corrección del pH para el S.A tipo A al agregar alcalite como alcalinizante.



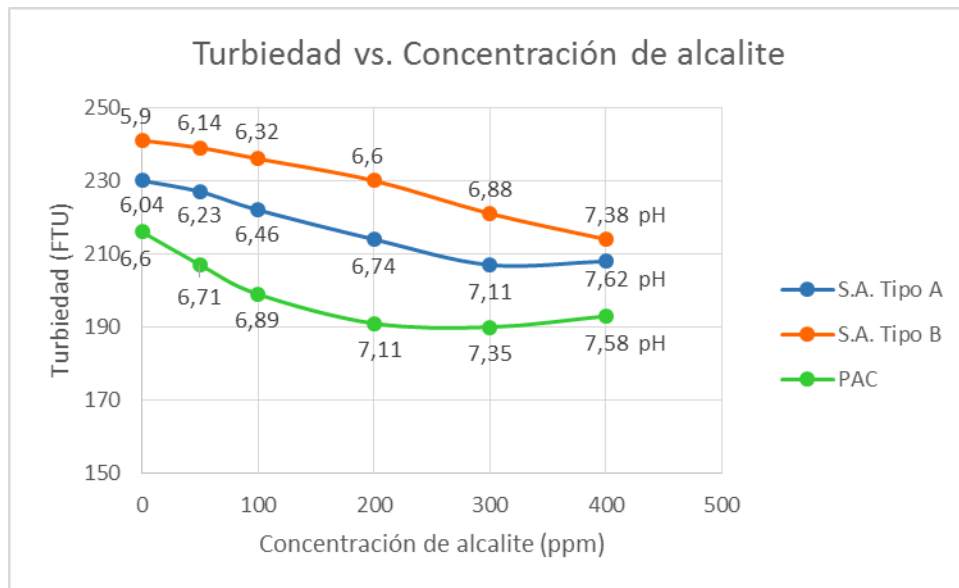
**Figura 10.** Gráfica de corrección del pH para el S.A tipo B al agregar alcalite como alcalinizante.



**Figura 11.** Gráfica de corrección del pH para el PAC al agregar alcalite como alcalinizante.



**Figura 12.** Gráfica del valor de color frente a la concentración de alcalite.



**Figura 13.** Gráfica del valor de la turbiedad frente a la concentración de alcalite.

En las figuras 9, 10 y 11, se observa la influencia del alcalite en el pH, a mayor concentración de alcalite, mayor es el pH del agua. Como se dijo anteriormente, al agregar el coagulante al agua, este presenta unas reacciones de hidrolisis donde se liberan protones, los cuales consumen la alcalinidad y reducen el pH del agua, por esta razón se agregó alcalite, ya que en solución libera sus iones carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos aumentando la alcalinidad del agua. La corrección en el pH se hace para permitir que el coagulante reaccione completamente con la alcalinidad.

En las figuras también se puede ver que el PAC, frente a los sulfatos de aluminio, requiere de menores dosis de alcalite para lograr un pH óptimo.

Por otro lado, las figuras 12 y 13, muestran como al ir corrigiendo el pH del agua se va reduciendo el valor del color y la turbiedad, ya que se va logrando una mayor reacción del coagulante, y por lo tanto, una mayor neutralización en las cargas de las partículas coloidales.

Con base a estos resultados, para el tratamiento del agua con una dosis de 2000 ppm de coagulante, se escogieron las siguientes dosis de alcalite que producen el menor valor de color y turbiedad: 360 ppm para el sulfato de aluminio tipo A, 400 ppm para el sulfato de aluminio tipo B y 200 ppm para el PAC.

#### 4.1.2. ADSORCIÓN

En estos ensayos se utilizó CAP, el cual se agregó 5 minutos antes del coagulante, con el fin de que adsorbiera la mayor parte de contaminantes y los retuviera en sus poros.

En las siguientes tablas se muestran los resultados de los ensayos de adsorción con CAP, seguido de la coagulación-floculación con cada coagulante.

- Dosis: 2000 mg/L de S.A. tipo A y 360 mg/L de alcalite

**Tabla 17.** Resultados de los ensayos de adsorción con CAP y S.A. tipo A.

Jarra	Cantidad de CAP (g)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
1	0	1005	207
2	1	861	173
3	2	686	138
4	4	384	70
5	6	59	12

- Dosis: 2000 mg/L de S.A tipo B y 400 mg/L de alcalite

**Tabla 18.** Resultados de los ensayos de adsorción con CAP y S.A tipo B.

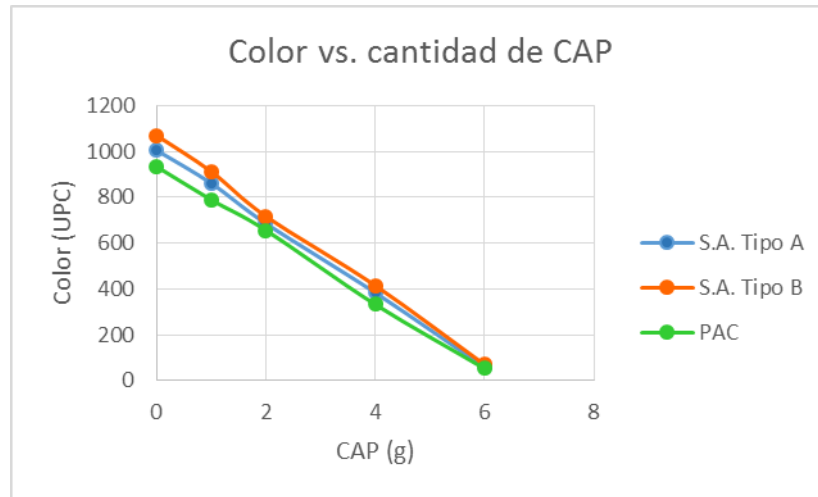
Jarra	Cantidad de CAP (g)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
1	0	1070	214
2	1	912	182
3	2	717	141
4	4	415	82
5	6	70	16

- Dosis: 2000 mg/L de PAC y 200 mg/L de alcalite

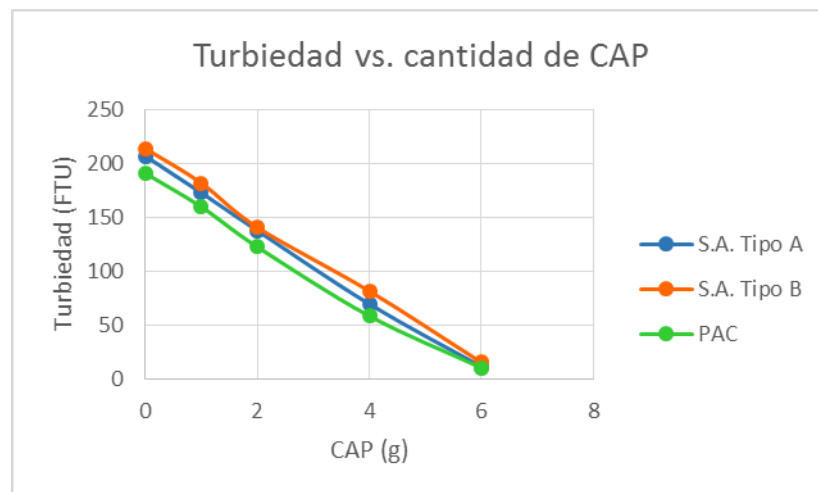
**Tabla 19.** Resultados de los ensayos de adsorción con CAP y PAC.

Jarra	Cantidad de CAP (g)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
1	0	934	191
2	1	789	160
3	2	656	123
4	4	333	59
5	6	53	11

Para estudiar el comportamiento del CAP se realizaron las siguientes gráficas.



**Figura 14.** Gráfica del valor del color frente a la concentración de coagulante.



**Figura 15.** Gráfica del valor de la turbiedad frente a la concentración de coagulante.

Las figuras 14 y 15, muestran como a medida que se aumenta la cantidad de CAP se disminuye el valor del color y la turbiedad, además al comparar con los ensayos anteriores, en estos casos se logra una remoción casi por completa de estos contaminantes. Esta alta efectividad del CAP, se debe a que tiene una alta área superficial y una gran cantidad de poros completamente disponibles para adsorber la mayoría de moléculas presentes en el agua, por eso, a mayor cantidad de CAP hay una mayor área superficial y una mayor cantidad de poros y por ende, un mayor poder de adsorción.

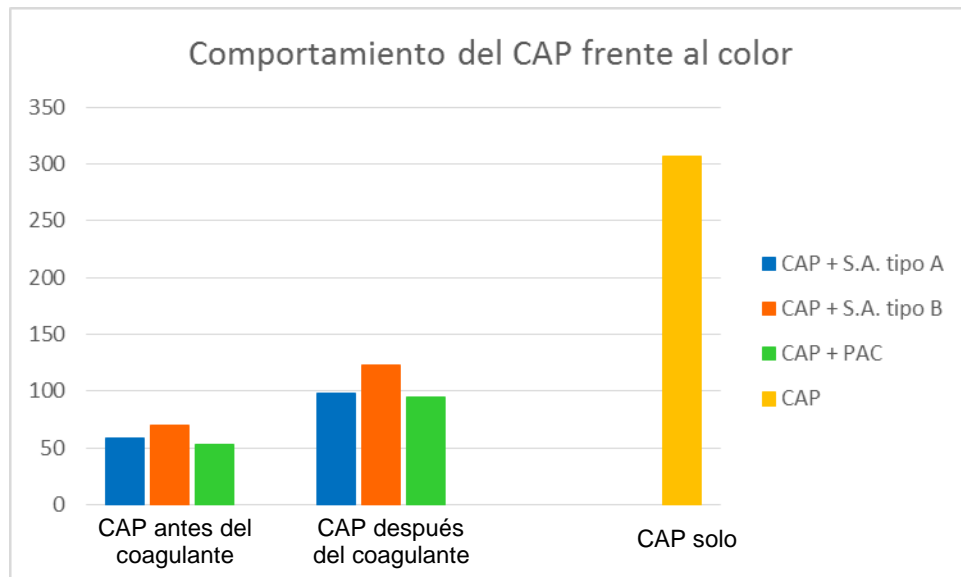
Según los resultados obtenidos, con 6 gramos de CAP se logran los valores más bajos de color y turbiedad.

Adicionalmente, se realizaron 4 ensayos más con el fin de comparar el comportamiento del CAP al agregarlo solo y antes o después del coagulante.

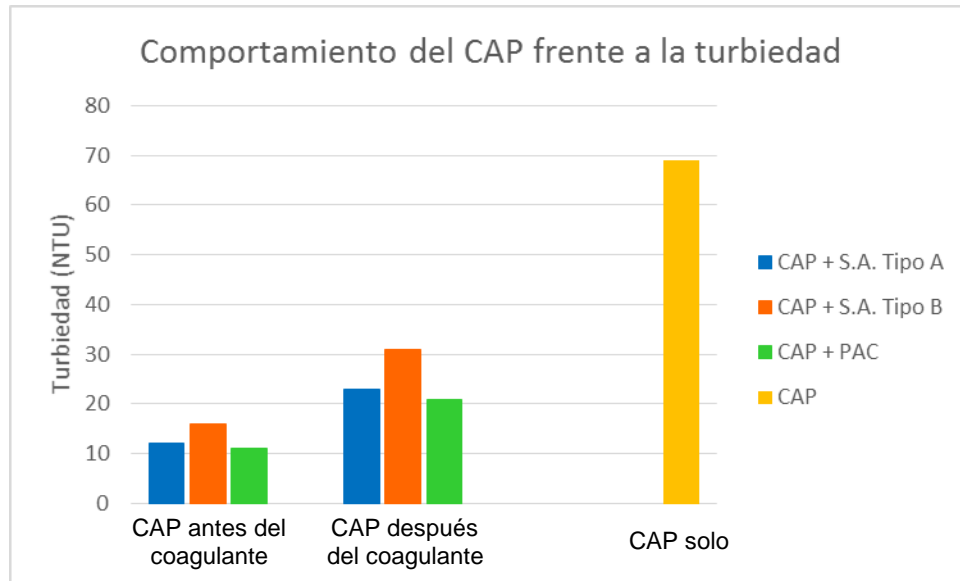
**Tabla 20.** Resultados de los ensayos de adsorción con CAP al agregarlo antes y después del coagulante.

<b>CAP + Sulfato de aluminio Tipo A</b>		
	<b>Color (UPC)</b>	<b>Turbiedad (NTU)</b>
CAP antes del coagulante	59	12
CAP después del coagulante	98	23
<b>CAP + Sulfato de aluminio Tipo B</b>		
CAP antes del coagulante	70	16
CAP después del coagulante	123	31
<b>CAP + PAC</b>		
CAP antes del coagulante	53	11
CAP después del coagulante	95	21
<b>CAP</b>		
CAP solo	307	69

Para estudiar el comportamiento del CAP al agregarse solo y antes o después del coagulante se realizó la siguiente gráfica.



**Figura 16.** Gráfica del comportamiento del CAP frente al color.



**Figura 17.** Gráfica del comportamiento del CAP frente a la turbiedad.

De acuerdo a las figuras 16 y 17, se ve como al utilizar el carbón activado 5 minutos antes que el coagulante, es más efectivo que agregarlo al tiempo o solo, ya que cuando se agrega el coagulante este comienza a reaccionar con el carbón activado, por lo tanto, si se agregan al tiempo, el carbón activado empieza a formar parte de los flóculos sin estar en contacto con el agua el tiempo suficiente para adsorber la mayoría de contaminantes, por otro lado, si se agrega solo, este no alcanza a tener un peso suficiente para precipitar en un tiempo oportuno. Por tal razón, lo mejor es agregarlo antes del coagulante para permitir su acción efectiva adsorbiendo y una precipitación adecuada.

#### 4.1.3. FENTON

Para la reacción de Fenton, la cantidad de  $H_2O_2$  se calculó a partir de la DQO, donde,  $1 \text{ g DQO} = 0,03125 \text{ mol } O_2 = 0,0625 \text{ mol } H_2O_2$ . (Los cálculos para las cantidades usadas de  $Fe^{+2}$  y  $H_2O_2$  se encuentran en el Anexo 3).

**Tabla 21.** Resultados de los ensayos para la reacción de Fenton.

Relación $Fe^{+2}:H_2O_2$	Color (UPC)	Color con cal (UPC)	Color con CAP (UPC)
1:2.5	1099	450	80
1:5	1088	443	76
1:10	1093	449	83

Relación Fe <sup>+2</sup> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Turbiedad (FTU)	Turbiedad con cal (FTU)	Turbiedad con CAP (FTU)
1:2.5	311	98	22
1:5	309	95	20
1:10	311	99	21

En la tabla 21, se puede ver como al cambiar la relación en las dosis de Fe<sup>+2</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no se aprecian cambios significativos en los valores de color y turbiedad, pero si al flocular con cal o con CAP.

Aunque los ensayos de floculación con CAP dieron los valores apropiados de color y turbiedad, no se contemplaron como posible tratamiento de las aguas, debido a que, por aparte se les determinó la conductividad y los TPH, los cuales dieron valores elevados, 17 mS/cm y 3,0 mg/L respectivamente, dejándolas inapropiadas para su reúso.

#### 4.1.4. SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO

Después de analizar todos los ensayos realizados, se determinó que los dos tratamientos con mejores resultados, fueron los siguientes:

\* Adsorción con 6 gramos de CAP, seguido de coagulación-floculación con 2000 ppm de S. A. tipo A más 360 ppm de alcalite.

\* Adsorción con 6 gramos de CAP, seguido de coagulación-floculación con 2000 ppm de PAC más 200 ppm de alcalite.

A las aguas tratadas con estos dos ensayos se les realizó una caracterización fisicoquímica, como se muestra en las siguientes tablas.

**Tabla 22.** Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua tratada con CAP mas S.A. tipo A .

Parámetro	Unidad	Valor
<b>Físicos</b>		
pH	<i>Unidades de pH</i>	7,76
Conductividad	<i>μS/cm</i>	3.300
Color	<i>UPC</i>	63,00
Turbiedad	NTU	12,00
Solidos totales (ST)	mg/L	1892,50
Solidos suspendidos totales (SST)	mg/L	6,00

<b>Químicos</b>		
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	507,52
TPH	mg/L	0,71
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	904,50
<b>Iones</b>		
Cloruros	mg Cl/L	77,03
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /L	831,10
<b>Metales</b>		
Aluminio	mg Al/L	<0,05
Cadmio	mg Cd/L	<0,01
Zinc	mg Zn/L	0,16
Cobre	mg Cu/L	<0,068
Cromo	mg Cr/L	<0,05
Hierro	mg Fe/L	0,06
Manganeso	mg Mn/L	0,17
Molibdeno	mg Mo/L	<0,12
Níquel	mg Ni/L	<0,05
Plomo	mg Pb/L	0,66
<b>Metaloides</b>		
Boro	mg B/L	0,325
<b>No metales</b>		
Selenio	mg Se/L	1,82

**Tabla 23.** Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua tratada con CAP mas PAC.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Físicos</b>		
pH	Unidades de pH	7,85
Conductividad	μS/cm	3.370
Color	UPC	64,00
Turbiedad	FTU	13,00
Solidos totales (ST)	mg/L	1600,00
Solidos suspendidos totales (SST)	mg/L	2,00
<b>Químicos</b>		
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	580,02
TPH	mg/L	0,87
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	1105,50
<b>Iones</b>		
Cloruros	mg Cl/L	550,18
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /L	119,24

<b>Metales</b>		
Aluminio	mg Al/L	<0,05
Cadmio	mg Cd/L	<0,01
Zinc	mg Zn/L	0,12
Cobre	mg Cu/L	<0,068
Cromo	mg Cr/L	<0,05
Hierro	mg Fe/L	0,22
Manganeso	mg Mn/L	0,10
Molibdeno	mg Mo/L	<0,12
Níquel	mg Ni/L	<0,05
Plomo	mg Pb/L	0,56
<b>Metaloides</b>		
Boro	mg B/L	0,325
<b>No metales</b>		
Selenio	mg Se/L	1,82

Los resultados de las tablas 22 y 23, muestran que los valores de conductividad y ST siguen siendo altos, debido a la presencia de sales, como se evidencia en el alto contenido de sulfatos y cloruros.

Asimismo, para apreciar la efectividad de los dos tratamientos se realizó la siguiente tabla, en la cual se muestran los porcentajes de remoción de los contaminantes que más influyen en la calidad del agua.

**Tabla 24.** % de remoción de los parámetros establecidos para el tratamiento del agua.

<b>Parámetro</b>	<b>% de remoción (%)</b>	
	<b>Tratamiento con CAP mas S.A. Tipo A</b>	<b>Tratamiento con CAP mas S.A. Tipo A</b>
Color	97,55	97,52
Turbiedad	97,40	97,18
SST	98,65	99,55
Alcalinidad	47,31	39,79
TPH	94,07	92,69
DQO	72,73	66,67
Aluminio	100	100
Hierro	99,88	99,58
Plomo	42,61	51,30

#### 4.1.4.1. Volumen de lodos producidos

Los resultados de los lodos producidos por estos dos tratamientos se encuentran en la siguiente tabla.

**Tabla 25.** *Volumen de lodos producidos*

Tratamiento	Volumen de lodos producido (mL)
CAP + S.A. Tipo A	50
CAP + PAC	92

La tabla 25, muestra que los lodos producidos por el tratamiento con CAP + S.A. Tipo A fueron menores que los producidos por el tratamiento con CAP + PAC. Para determinar cuánto volumen de lodos se producirá al tratar toda el agua almacenada en el tanque sumidero, se tuvo en cuenta que el volumen total del agua es de 5000 galones, es decir, 18.927,06 L.

**Tabla 26.** *Volumen de lodos producidos al tratar toda el agua almacenada en el tanque sumidero.*

Tratamiento	Volumen de lodos producido (mL)	Volumen de lodos producido (L)
CAP + S.A. Tipo A	1.892.706	1.892,7 L
CAP + PAC	3.482.579,04	3.482,58

Como se puede ver en la tabla 26, el volumen de lodos producidos al tratar toda el agua almacenada en el tanque sumidero, será elevado, por lo que, se recomienda un análisis posterior a estos lodos para un posible reúso.

#### 4.1.4.2. Análisis de costos

En la siguiente tabla se muestran los precios de los reactivos utilizados en los tratamientos.

**Tabla 27.** *Precio de los reactivos utilizados en los tratamientos.*

Reactivo	Precio por Kg (moneda colombiana)
S.A. molido Tipo A	1.950
PAC	4.600
Alcalite	3.200
CAP	16.000

Los cálculos para determinar la cantidad de reactivo necesaria para el tratamiento de toda el agua almacenada en el tanque sumidero se encuentra en el Anexo 5, teniendo en cuenta que el volumen total de agua es de 5000 galones lo que equivale a 18.927,06 L.

- Costos para el tratamiento con CAP + S.A. Tipo A.

**Tabla 28.** Costos del tratamiento total de las aguas almacenadas en el tanque sumidero.

Reactivo	Dosis (ppm)	Cantidad (Kg)	Precio (moneda colombiana)
S.A. Tipo A	2000	37,85	73.807,5
Alcalite	400	7,58	24.256
CAP	12000	227,13	3.634.080
<b>Total</b>			<b>3.732.143,5</b>

- Costo para el tratamiento con CAP + PAC.

**Tabla 29.** Costo del tratamiento total de las aguas almacenadas en el tanque sumidero.

Reactivo	Dosis (ppm)	Cantidad (Kg)	Precio (moneda colombiana)
PAC	2000	37,85	174.110
Alcalite	200	3,79	12.128
CAP	12000	227,13	3.634.080
<b>Total</b>			<b>3.820.318</b>

En las tablas 28 y 29 se muestran los precios de los tratamientos, teniendo en cuenta solamente los reactivos utilizados. De esta forma, al comparar los dos precios finales se ve que no hay una diferencia significativa alguna. Esto ocurre porque el reactivo de mayor precio es el CAP, el cual se utiliza en cantidades iguales en los dos tratamientos.

#### 4.1.5. DISPOSICIÓN DE LAS AGUAS TRATADAS

Sabiendo que el uso que se le quiere dar a las aguas tratadas es en riego, se determinaron los siguientes criterios, como lo indica la Resolución 1207 del 2014.

Para el cálculo de estos criterios, se determinaron los siguientes parámetros a cada tratamiento.

**Tabla 30.** Parámetros tratamiento con CAP + S.A. Tipo A.

<b>Cationes</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor</b>
Sodio	mg Na/L	351,35
Potasio	mg K/L	35,19
Calcio	mg Ca/L	261,90
Magnesio	mg Mg/L	7,62
<b>Aniones</b>		
Bicarbonatos	mg HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L	619,17
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L	831,10
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	77,03
<b>Otros</b>		
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	507,52
Dureza cálcica	mg CaCO <sub>3</sub> /L	654,75
pH	Unidades de pH	7,76
Temperatura	° C	25

**Tabla 31.** Parámetros para el tratamiento con CAP + PAC.

<b>Cationes</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor</b>
Sodio	mg Na/L	303,10
Potasio	mg K/L	65,42
Calcio	mg Ca/L	332,10
Magnesio	mg Mg/L	11,60
<b>Aniones</b>		
Bicarbonatos	mg HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L	707,62
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L	119
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	550,18
<b>Otros</b>		
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	580,02
Dureza cálcica	mg CaCO <sub>3</sub> /L	830,25
pH	Unidades de pH	7,85
Temperatura	° C	25

### Calidad del reúso según la Salinidad efectiva.

Para el cálculo de la SE en el tratamiento que usó S.A. Tipo A, se utilizó la siguiente fórmula:

$$SE = \Sigma \text{cationes} - Ca^{2+}$$

Debido a que se cumple la regla de  $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$  y  $Ca^{2+} > CO_3^{2-} + HCO_3^-$ .

Mientras que para el tratamiento que usó PAC, se utilizó la siguiente fórmula:

$$SE = \Sigma \text{cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$$

Debido a que se cumple la regla de  $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$ .

En la tabla 32, se muestran los valores de SE para los dos tratamientos. Como el pH de estas aguas está por debajo de 8, solo tienen bicarbonatos.

**Tabla 32.** Parámetros para el cálculo de SE.

Tratamiento	Na <sup>+</sup> (meq/L)	K <sup>+</sup> (meq/L)	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	SE (meq/L)
CAP + S.A. Tipo A	15,28	0,90	13,09	0,63	10,15	17,31	<b>16,81</b>
CAP + PAC	13,18	1,67	16,61	0,96	11,60	2,48	<b>18,34</b>

Al comparar los resultados con la escala establecida para la calificación de aguas para riego, según su SE, las aguas tratadas con CAP + S.A. tipo A, se encuentran como condicionadas, mientras que las tratadas con CAP + PAC, se clasifican como no recomendables.

### Calidad del reúso según la salinidad potencial.

La tabla 33, muestra los valores obtenidos para SP.

**Tabla 33.** Parámetros para el cálculo de SP.

Tratamiento	Cl <sup>-</sup> (meq/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	SP (meq/L)
CAP + S.A. Tipo A	2,17	17,31	<b>10,83</b>
CAP + PAC	15,52	2,48	<b>16,76</b>

Según la calificación de aguas para riego según su SP, las aguas generadas por los dos tratamientos se encuentran condicionadas para su posible utilización en riego. Dado que, a medida que se vaya evaporando el agua del suelo, se incrementará la concentración de cloruros y sulfatos en este, por lo tanto, su potencial osmótico aumentará.

### Calidad del reúso según el índice RAS.

Los resultados para RAS se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 34.** Parámetros para el cálculo de SP.

Tratamiento	Na <sup>+</sup> (meq/L)	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	RAS
CAP + S.A. Tipo A	15,28	13,09	0,63	<b>1,49</b>
CAP + PAC	13,18	16,61	0,96	<b>1,23</b>

Como se ve en los resultados, el valor del RAS está por debajo de 3, por lo tanto, las aguas de los dos tratamientos no presentan ningún riesgo para su uso en riego. Esto significa que no habrá competencia del sodio por los sitios de intercambio en el suelo con los cationes de calcio y magnesio, por lo tanto, no se verá afectada la permeabilidad de este.

### Calidad del reúso según CSR.

Los resultados para el CSR se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 35.** Parámetros para el cálculo de CSR.

Tratamiento	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	CSR (meq/L)
CAP + S.A. Tipo A	10,15	13,09	0,63	<b>-3,57</b>
CAP + PAC	11,60	16,61	0,96	<b>-5,97</b>

En la tabla 35, se observan que los valores de CSR están por debajo de 0, lo que establece que las aguas de los dos tratamientos cuenta con una buena calificación para su reúso en riego, ya que, al haber un exceso en la concentración de los cationes de calcio y magnesio con respecto a los bicarbonatos, el sodio no presenta peligrosidad con respecto a los bicarbonatos disponibles que puedan reaccionar con los cationes divalentes.

### Calidad del reúso según PSP.

Los resultados para el PSP se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 36.** Parámetros para el cálculo de PSP.

Tratamiento	Na <sup>+</sup> (meq/L)	SE (meq/L)	PSP %
CAP + S.A. Tipo A	15,28	16,81	<b>90,89</b>
CAP + PAC	13,18	<b>18,34</b>	<b>71,86</b>

Los resultados de la tabla 36, indican que los valores de PSP están por encima del 50%. Esto establece que estas aguas no son recomendables para su uso en riego, debido a que, la concentración de sodio va a ser mayor que la de los demás cationes, afectando la sodicidad del suelo.

### Calidad del reúso según PSI.

Los resultados para el PSI se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 37.** Parámetros para el cálculo de PSI.

Tratamiento	RAS	PSI %
CAP + S.A. Tipo A	1,49	<b>1,47</b>
CAP + PAC	1,23	<b>1,21</b>

Con los resultados obtenidos para el PSI, se establece que las aguas de los dos tratamientos presentan un riesgo bajo para su uso en riego. Por lo que, estas aguas, al tener un bajo porcentaje de sodio intercambiable, no van a presentar problemas de inestabilidad, permeabilidad y pobre aireamiento.

### Calidad del reúso según ISL.

Los valores de estos parámetros y los resultados para el ISL se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 38.** Parámetros para el cálculo de ISL.

Tratamiento	pH (uds. de pH)	T °C	ST (mg/L)	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Dureza cálcica (mg CaCO <sub>3</sub> /L)
CAP + S.A. Tipo A	7,76	25	1892,50	507,52	654,75
CAP + PAC	7,85	25	1600,00	580,02	830,25

**Tabla 39.** Constantes para el cálculo de ISL.

<b>Tratamiento</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>ISL</b>
CAP + S.A. Tipo A	0,23	2,09	2,42	2,71	<b>1,27</b>
CAP + PAC	0,22	2,09	2,52	2,76	<b>1,53</b>

Los resultados de la tabla 39, indican que los valores de ISL son mayores a 0. Según la calificación para agua de riego para este criterio, estas aguas presentan la indicación de formación con incrustaciones pero no serán corrosivas.

### **Calidad del reúso según las normas de Riverside.**

El resultado se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 40.** Parámetros para el determinar la clasificación del agua según las normas de Riverside.

<b>Tratamiento</b>	<b>Conductividad (mS/cm)</b>	<b>RAS</b>	<b>Clasificación</b>
CAP + S.A. Tipo A	3,30	1,49	C <sub>4</sub> S <sub>1</sub>
CAP + PAC	3,37	1,23	C <sub>4</sub> S <sub>1</sub>

Al ubicar la conductividad y el RAS en la gráfica de la Figura 4, se puede observar que estas aguas pertenecen a una clasificación C<sub>4</sub>S<sub>1</sub> para su reúso en riego. Esto indica son aptas para riego pero con precauciones, por lo que presentan una salinidad muy alta. Por lo tanto, estas aguas solo deben usarse en suelos tolerantes a la salinidad, muy permeables y con un buen drenaje.

### **Elementos fitotóxicos.**

Para evaluar el riesgo de inducir toxicidad de las aguas tratadas, se utilizaron los contenidos de sodio, cloruros y boro. Estos parámetros se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 41.** Parámetros para el determinar la toxicidad del agua.

<b>Tratamiento</b>	<b>Sodio (meq/L)</b>	<b>Cloruros (meq/L)</b>	<b>Boro (mg/L)</b>
CAP + S.A. Tipo A	15,28	2,18	0,33
CAP + PAC	13,18	15,52	0,36

Los resultados de la clasificación se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 42.** Resultados de la toxicidad del agua.

<b>Tratamiento</b>	<b>Problema</b>		
	<b>Sodio (meq/L)</b>	<b>Cloruros (meq/L)</b>	<b>Boro (mg/L)</b>
CAP + S.A. Tipo A	Grave	Inexistente	Inexistente
CAP + PAC	Grave	Grave	Inexistente

Con estos resultados se establece que se debe tener precaución con la toxicidad por sodio en ambos tratamientos y con los cloruros en el tratamiento con CAP + PAC.

## 5. CONCLUSIONES

Mediante una serie de ensayos, se determinaron dos tratamientos para las aguas almacenadas en la terminal de combustible, los cuales presentaron porcentajes de remoción de hidrocarburos, color y turbiedad mayores al 90%.

De esta forma, los tratamientos seleccionados utilizan CAP 5 minutos antes de la adición del coagulante y el alcalite. Para el primero, el coagulante escogido es el Sulfato de aluminio tipo A con una concentración de 2000 ppm más una concentración de 360 ppm de alcalite y para el segundo, el coagulante es el PAC con una concentración de 2000 ppm más una concentración de 200 ppm de alcalite.

Además, aunque valores como la conductividad, se pasan del valor máximo permisible exigido en la Resolución 1207 del 2014, se concluye que las aguas generadas por estos dos tratamientos se pueden reutilizar en riego con algunas precauciones, como lo indicaron los criterios de SE, SP, RAS, CSR, PSI, ISL y las normas de Riverside, los cuales muestran que las aguas se pueden utilizar en cultivos que tengan una tolerancia a la salinidad, un buen drenaje y una buena permeabilidad.

Por otro lado, la baja eficiencia de los ensayos con la reacción de Fenton, puede deberse a que las condiciones de operación empleadas no fueron las adecuadas, pero no se probaron más ensayos cambiando estas condiciones, porque implicaría un incremento en los costos del tratamiento y no se justificaría cuando ya se encontró un tratamiento más asequible con una buena eficiencia en la remoción de contaminantes.

## **6. RECOMENDACIONES**

Este trabajo es un estudio del tratamiento que se le debe realizar a las aguas almacenadas en la terminal de combustibles, por lo cual, se recomienda continuar con la caracterización fisicoquímica de los lodos producidos por los tratamientos y con la realización de pruebas en el suelo que se quiera utilizar para regar con las aguas tratadas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. MARTÍNEZ DE VILLA, Agustín y PRIETO, Vicente. La contaminación de las aguas por hidrocarburos: un enfoque para abordar su estudio. En: Revista Cubana Hig Epidemiol. **1999**. vol. 37, no. 1, p. 13-20.
2. CASTELLANOS, Sandra y TUSARMA, Marleny. Evaluación fisicoquímica por el método de adsorción-coagulación-floculación para la remoción de colorantes del efluente del área de procesos industriales de la empresa textil CO&TEX S.A.S. Trabajo de grado Químico Industrial. Pereira, Colombia : Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología, **2014**.
3. PAREDES, Ana. Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cáscara de castaña. Trabajo de grado Licenciatura en Química. Lima, Perú : Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería, **2011**.
4. BLANCO, José. Degradación de un eluente textil real mediante procesos fenton y foto-fenton. Trabajo de grado Máster Ingeniería Ambiental. Cataluña, España : Universitat Politècnica de Catalunya, **2009**.
5. FÉLEZ, Marta. Capítulo 1: el agua. Situación actual del estado de la depuración biológica. Explicación de los métodos y sus fundamentos. **2009**, pág. 13.
6. FERNÁNDEZ, José y GARCÉS, Patricia. El agua, un recurso indispensable. Guía de Trabajo en el aula. **2003**. Disponible en: <https://www.ayudaenaccion.org/contenidos/documentos/EI%20agua%20un%20recurso%20indispensable.pdf>
7. BARBA, Luz. Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Cali, Colombia : Universidad del Valle, **2002**.
8. CUBILLOS, Janneth. Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. Trabajo de grado Maestría en Ecotecnología. Pereira, Colombia : Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales, **2011**.

- 9.** JARAMILLO, G., PABÓN, A. y GIL, E. Fotodegradación de fenoles en aguas residuales industriales. Tratamiento de aguas residuales. Medellín, Colombia : Ingeniería Química, pág. 117.
- 10.** TREJO, Ricardo. Determinación de la combinación y dosis óptimas de policloruro de aluminio y polímero floculante para el tratamiento del influente de la planta potabilizadora LOS BERROS. México, D.F. : Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, **2012**.
- 11.** ROMERO, Jairo. ACUIQUÍMICA. Colombia : Departamento de publicaciones Escuela Colombiana de Ingenierías, 1996. Vol. Primera Edición.
- 12.** Manual del carbón activo. Sevilla, España : Escuela Politécnica Superior. Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- 13.** CARBÓNVerde [en línea]. Carbón activado.[Citado el: 12 de 12 de 2016]. Disponible en: <https://carbonverde.wordpress.com/2016/02/03/antecedentes/>.
- 14.** SÁEZ, J., y otros. Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales. Primera Edición. España : Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones, **2002**. p. 74,75.
- 15.** CASTAÑEDA, Amaparo. Procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo. Trabajo de grado Especialización en Recursos hidráulicos y medio ambiente. Colombia : Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", **2014**.
- 16.** ARENAS, Fabiola. Aplicación del reactivo de fenton en el tratamiento de aguas residuales del desmucilaginado mecánico de café en la hacienda Majavita municipio de Socorro Santander. Trabajo de grado Química. Bucaramanga, Colombia : Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias, **2016**.
- 17.** SÁNCHEZ, Francisco. Tratamientos combinados fisicoquímicos y de oxidación para la depuración de aguas residuales de la industria corchera. Trabajo de grado Doctorado en Ciencias. Badajoz, España : Universidad de Extremadura, **2007**.
- 18.** Reutilización de las aguas residuales [en línea]. Capitulo 2. Disponible en: [http://aguas.igme.es/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap\\_2\\_a.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap_2_a.pdf)

**19.** COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207. (25, Julio, 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Bogotá, D.C. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res\\_1207\\_2014.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf)

**20.** JAIMES, Ederson. Evaluación y clasificación del agua proveniente de los pozos de exploración de las locaciones de caño limón y caricare de occidental de Colombia (oxy) para su posible uso como agua de riego para cultivo. Trabajo de grado Química. Bucaramanga, Colombia : Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, **2010**.

**21.** CAÑAS, Christian. Estudio de aplicabilidad e implementación del policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta la flora del AMB. S.A. E.S.P. Trabajo de grado Ingeniería Química. Bucaramanga, Colombia : Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, **2005**.

## ANEXOS

### **ANEXO A. Resolución 1207 del 2104. “Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas”**

Artículo 6. DE LOS USOS ESTABLECIDOS PARA AGUA RESIDUAL TRATADA. Las aguas residuales se podrán utilizar en los siguientes usos

Uso agrícola. Para el riego de:

- \* Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.
- \* Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
- \* Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
- \* Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carbutante) incluidos lubricantes.
- \* Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.
- \* Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.
- \* Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.
- \* Jardines en áreas no domiciliarias.

Artículo 7. CRITERIOS DE CALIDAD. El uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente los siguientes criterios de calidad:

Variable	Unidad de medida	Valor límite máximo permisible
<b>FÍSICOS</b>		
pH	Unidades de pH	6-9
Conductividad	μS/cm	1.500,0
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0*E(2)
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
Salmonella sp	NMP/100 mL	1,0
<b>QUÍMICOS</b>		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
TPH	mg/L	1,0
<b>Iones</b>		
Cianuro Libre	mg CN <sup>-</sup> /L	0,2
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	300,0
Fluoruros	mg F <sup>-</sup> /L	1,0

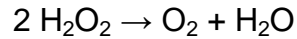
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> /L	500,0
<b>Metales</b>		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Níquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
<b>Metaloides</b>		
Arsénico	mg As/L	0,1
Boro	mg B/L	0,4
<b>No metales</b>		
Selenio	mg Se/L	0,02
<b>Otros parámetros</b>		
Cloro Total Residual	mg Cl <sub>2</sub> /L	Menos a 1,0
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .N)	mg /L	5,0

## **ANEXO B. Procedimiento para realizar los ensayos con pruebas de Jarras <sup>21</sup>**

1. Llenar cada jarra con 500 mL de muestra de las aguas almacenadas en la terminal de combustible.
2. Dosificar el coagulante con una pipeta en cantidades progresivas.
3. Dejar actuar el coagulante por 1 minuto con agitación rápida.
4. Pasado este tiempo, disminuir la velocidad de agitación y mantener así por 15 minutos.
5. Transcurrido este tiempo, suspender la agitación y dejar sedimentar la muestra por 30 minutos.
6. Filtrar el agua sobrenadante y determinarle los parámetros de pH, color y turbiedad.

### ANEXO C. Cálculos para determinar las cantidades de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O

DQO= 3317 mg O<sub>2</sub>/L



Por lo tanto, 1 g DQO (O<sub>2</sub>) = 0,03125 mol O<sub>2</sub> = 0,0625 mol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Entonces,

$$3317 \text{ mg O}_2/\text{L} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ mol O}_2}{32 \text{ g}} * \frac{2 \text{ mol H}_2\text{O}_2}{1 \text{ mol O}_2} = \mathbf{0,1037 \text{ mol H}_2\text{O}_2}$$

$$* 0,1037 \text{ mol H}_2\text{O}_2 * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{O}_2}{34 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = 13,05 \text{ mL de H}_2\text{O}_2$$

Para una relación de 1 Fe<sup>2+</sup>:2,5 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

$$0,1037 \text{ mol H}_2\text{O}_2 / 2,5 = \mathbf{0,0415 \text{ mol Fe}^{2+}}$$

$$* 0,0415 \text{ mol FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} * \frac{284 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 11,5273 \text{ g de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$$

Para una relación de 1 Fe<sup>2+</sup>:5 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

$$0,1037 \text{ mol H}_2\text{O}_2 / 5 = \mathbf{0,0207 \text{ mol Fe}^{2+}}$$

$$* 0,0207 \text{ mol FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} * \frac{284 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 5,7635 \text{ g de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$$

Para una relación de 1 Fe<sup>2+</sup>:10 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

$$0,1037 \text{ mol H}_2\text{O}_2 / 10 = \mathbf{0,0104 \text{ mol Fe}^{2+}}$$

$$* 0,0104 \text{ mol FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} * \frac{284 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 2,8818 \text{ g de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$$

#### **ANEXO D. Procedimiento para determinar el volumen de lodos producidos <sup>21</sup>**

1. Pasados los 30 minutos de la sedimentación en la pruebas de jarras, filtrar la mayor cantidad de agua sobrenadante.
2. Verter el contenido final de la jarra en una probeta de plástico de 250 mL.
3. Dejar sedimentar este contenido por 1 hora.
4. Después de este tiempo, leer el volumen de lodo producido

## **ANEXO E. Cálculos para el análisis de costos de los tratamientos**

Los siguientes cálculos se realizaron para determinar la cantidad total de reactivos que se debe utilizar en el tratamiento de toda el agua almacenada en el tanque sumidero.

Volumen de agua= 5000 galones = 18.927,06 L

Reactivos

\* S.A. Tipo A = Dosis de 2000 ppm

$2000 \text{ mg/L} * 18.927,06 \text{ L} = 37854120 \text{ mg S.A. Tipo A} = 37,85 \text{ Kg de S.A. Tipo A}$

\* PAC = Dosis de 2000 ppm

$2000 \text{ mg/L} * 18.927,06 \text{ L} = 37854120 \text{ mg PAC} = 37,85 \text{ Kg de PAC}$

\* Alcalite = Dosis de 400 ppm

$3600 \text{ mg/L} * 18.927,06 \text{ L} = 6813741,6 \text{ mg Alcalite} = 6,82 \text{ Kg de Alcalite}$

\* Alcalite = Dosis de 200 ppm

$200 \text{ mg/L} * 18.927,06 \text{ L} = 3785412 \text{ mg Alcalite} = 3,79 \text{ Kg de Alcalite}$

\* CAP = Cantidad: 6 g en 0,5 L por lo tanto, tiene una dosis de 12000 ppm

$12000 \text{ mg/L} * 18.927,06 \text{ L} = 227124720 \text{ mg CAP} = 227,13 \text{ Kg de CAP}$