

EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL AGENTE COAGULANTE -  
SULFATO DE ALUMINIO- EN EL PROCESO ACTUAL DE COAGULACIÓN-  
FLOCULACIÓN DE AGUA POTABLE EN LA EMPRESA EAF SAS ESP

JESSICA PAULIN PÉREZ BELTRÁN

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2017

EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL AGENTE COAGULANTE -  
SULFATO DE ALUMINIO- EN EL PROCESO ACTUAL DE COAGULACIÓN-  
FLOCULACIÓN DE AGUA POTABLE EN LA EMPRESA EAF SAS ESP

JESSICA PAULIN PÉREZ BELTRÁN

Proyecto Integral de grado para optar el título de  
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2017

NOTA DE ACEPTACIÓN:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma Orientador  
Ing. Elizabeth Torres Gamez

---

Firma Jurado 1  
Ing. Juan Camilo Cely

---

Firma Jurado 2  
Ing. Nubia Liliana Becerra

Bogotá D.C., Agosto de 2017

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Ing. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA PEÑA

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería Química

Ing. LEONARDO de JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

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

*Dedico este trabajo principalmente a Dios por guiarme en este proceso y lograr cumplir mis metas.*

*A mis padres a quienes dedico mis triunfos por su amor, sus esfuerzos y su apoyo incondicional a lo largo de esta etapa.*

*A mi hermana por su cariño, consejos y apoyo en esta fase importante en mi vida.*

*A mis sobrinos, quienes son el motor que me impulsa día a día a crecer como persona y profesional.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a Dios por permitirme culminar satisfactoriamente este proyecto. A mis padres por sus esfuerzos y motivación a lo largo de estos años.*

*A mi familia por su apoyo incondicional, especialmente a mi tío Oscar Beltrán quien ha sido ejemplo de perseverancia y constancia a seguir en mi vida. A mis primos Edith Peña y Elmer Peña que son mi soporte permanente para alcanzar mis metas.*

*A la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo Aguas de Facatativá EAF SAS ESP y al Gerente Orlando Castro por permitirme realizar el proyecto de grado, al Ingeniero Víctor Galindo y a todo el personal del acueducto y el laboratorio por su colaboración, aportes al proyecto y conocimientos a lo largo de todo el estudio.*

*A la Universidad de América, especialmente a la Ingeniera ELIZABETH TORRES quien, siendo una continua guía, con su conocimiento, aportes, experiencia y colaboración como tutora me permitió avanzar en el desarrollo de este proyecto de grado.*

## CONTENIDO

	pag.
INTRODUCCIÓN.	20
OBJETIVOS	21
1. GENERALIDADES	22
1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	22
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL Y RESEÑA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	22
1.2.1 Sistema de abastecimiento.	23
1.2.2 Demanda actual y proyectada.	24
1.2.3 Descripción del proceso actual en la planta de tratamiento.	25
2. MARCO TEÓRICO	32
2.1 AGUA POTABLE	32
2.1.1 Potabilización de agua.	33
2.2 FACTORES INFLUYENTES EN LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE	33
2.2.1 Turbiedad.	33
2.2.2 Color.	34
2.2.3 Olor y sabor.	34
2.2.4 pH.	34
2.2.5 Alcalinidad.	35
2.2.6 Sólidos.	35
2.2.7 Potencial Zeta.	36
2.2.8 Remoción de contaminantes.	36
2.3 PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA POTABLE	36
2.3.1 Proceso de coagulación.	37
2.3.2 Proceso de floculación.	44
2.3.3 Proceso de Sedimentación.	44
2.4 MARCO LEGAL	45
3. PLANTEAMIENTO ALTERNATIVAS DE AGENTES COAGULANTES	48
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	48
3.2 SELECCIÓN DE INSUMOS COAGULANTES	49
3.2.1 Matriz de Selección.	51
4. SELECCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA EN LAS ALTERNATIVAS	57
4.1 METODOLOGÍA PARA LA EXPERIMENTACIÓN	57
4.1.1 Preparación de coagulantes.	57

4.1.2	Prueba de jarras.	59
4.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	62
4.2.1	Información diagnóstica del proceso actual.	64
4.2.2	Alternativa coagulante sulfato férrico.	67
4.2.3	Alternativa coagulante Policloruro de Aluminio (PAC).	77
4.2.4	Alternativa coagulante Cloruro Férrico.	82
4.2.5	Discusión del desarrollo experimental.	90
5.	ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO EN LA PLANTA	95
5.1	CONDICIONES DE OPERACIÓN	95
5.1.1	Flujo de coagulante y Flujo acondicionador de pH	97
5.1.2	Velocidad de Agitación.	97
5.1.3	Sólidos disueltos totales.	98
5.1.4	Costos en el tratamiento de potabilización.	98
5.2	BALANCE DE MATERIA	98
6.	ANÁLISIS FINANCIERO	102
6.1	COMPARACIÓN DE COSTOS	102
6.2	ANÁLISIS DE LA ALTERNATIVA MÁS VIABLE	103
7.	CONCLUSIONES	104
8.	RECOMENDACIONES	106
	BIBLIOGRAFÍA	107
	ANEXOS	110

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A.</b> Descripción métodos analíticos	111
<b>Anexo B.</b> Materiales y métodos de trabajo	113
<b>Anexo C.</b> Resultados para cada uno de los parámetros en los ensayos de jarras para el coagulante sulfato de aluminio tipo b empleado actualmente	116
<b>Anexo D.</b> Resultados de porcentajes de remoción para cada parámetro medido en los ensayos de jarras para sulfato férrico como coagulante	118
<b>Anexo E.</b> Resultados de porcentajes de remoción para cada parámetro medido en los ensayos de jarras para policloruro de aluminio como coagulante	119
<b>Anexo F.</b> Resultados de porcentajes de remoción para cada parámetro medido en los ensayos de jarras para cloruro férrico como coagulante	120
<b>Anexo G.</b> Fichas técnicas de las alternativas	121

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Ubicación geográfica de la planta de tratamiento de EAF SAS ESP	22
<b>Figura 2.</b> Diagrama de los procesos empleados en el tratamiento de agua potable	26
<b>Figura 3.</b> Equipo de aireación en la planta "La Guapucha" en la empresa EAF SAS ESP para un caudal de entrada de 280 L/s.	27
<b>Figura 4.</b> Embalse El Gatillo de la planta EAF de Facatativá	27
<b>Figura 5.</b> Suministro Sulfato de Aluminio Tipo B y Canaleta Parshall	28
<b>Figura 6.</b> Modelo esquemático de la coagulación	28
<b>Figura 7.</b> Floculadores de la planta EAF con gradientes de 40, 30 y 20 [1/s]	29
<b>Figura 8.</b> Sedimentadores, a) Estructura convencional y b) Estructura de alta tasa	30
<b>Figura 9.</b> Filtros y sus válvulas automáticas para lavado	31
<b>Figura 10.</b> Esquema de las fases en el proceso de coagulación	43
<b>Figura 11.</b> Determinación del gradiente de velocidad en función de la velocidad de agitación a nivel laboratorio para jarras cuadradas de 2 L	96
<b>Figura 12.</b> Equipo de Prueba de Jarras automática	113
<b>Figura 13.</b> Turbidímetro Merck Turbiquant 1500T	114
<b>Figura 14.</b> a) PHMETRO SCHOOT Instruments Lab 850; b) PHMETRO WTW pH330	114
<b>Figura 15.</b> Espectrofotómetro Spectroquant Pharo 300M	115

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Comportamiento promedio del agua cruda para diagnóstico histórico	66
<b>Gráfica 2.</b> Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 4 a 14 mg/L con el coagulante Sulfato Férrico en cada una de las pruebas.	70
<b>Gráfica 3.</b> Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 2 a 12 mg/l con el coagulante Sulfato Férrico en cada una de las pruebas.	70
<b>Gráfica 4.</b> Resultados promedio de Hierro después de la filtración de las muestras empleando dosis de coagulante Sulfato Férrico de 4 mg/l hasta 14 mg/l	71
<b>Gráfica 5.</b> Resultados promedio de Hierro después de la filtración de las muestras empleando dosis de coagulante Sulfato Férrico de 2 mg/l hasta 12 mg/l	72
<b>Gráfica 6.</b> Comportamiento del Color con base a las dosis empleadas de 4 a 14 mg/l con el coagulante Sulfato Férrico en las distintas pruebas.	73
<b>Gráfica 7.</b> Comportamiento del Color en base a las dosis empleadas de 2 a 12 mg/l con el coagulante Sulfato Férrico en las pruebas de laboratorio	73
<b>Gráfica 8.</b> Resultados promedio para el color después de la filtración para todas las pruebas realizadas con el coagulante sulfato férrico	74
<b>Gráfica 9.</b> Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras en las dosis de 4 a 14 mg/l después de la clarificación.	75
<b>Gráfica 10.</b> Comportamiento de la turbiedad en la en las pruebas de jarras en las dosis de 2 a 12 mg/l después de la clarificación.	75
<b>Gráfica 11.</b> Resultados promedio de la turbiedad después de la filtración para todas las pruebas realizadas con el coagulante sulfato férrico	76
<b>Gráfica 12.</b> Comportamiento del color en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio utilizando Cal	79
<b>Gráfica 13.</b> Comportamiento del color en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio al añadir ácido sulfúrico	79
<b>Gráfica 14.</b> Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio con Cal	80
<b>Gráfica 15.</b> Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio con ácido sulfúrico	80
<b>Gráfica 16.</b> Comportamiento del pH en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio con Cal	81
<b>Gráfica 17.</b> Comportamiento del pH en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio con ácido sulfúrico	81
<b>Gráfica 18.</b> Resultados de Hierro en la filtración de las muestras empleando dosis de coagulante Cloruro Férrico de 4 mg/L (jarra 1) hasta 14 mg/L (jarra 6).	85
<b>Gráfica 19.</b> Resultados de Hierro en la filtración de las muestras empleando dosis de coagulante Cloruro Férrico de 8 mg/l (jarra 1) hasta 18 mg/l (jarra 6)	85

<b>Gráfica 20.</b> Comportamiento del color en las pruebas de jarras en las dosis de 4 mg/l a 14 mg/l para el Cloruro Férrico	86
<b>Gráfica 21.</b> Comportamiento del color en las pruebas de jarras en las dosis de 8 mg/l a 18 mg/l para el Cloruro Férrico	86
<b>Gráfica 22.</b> Resultados promedio para el color luego de la filtración en todas las pruebas realizadas con el coagulante cloruro férrico	87
<b>Gráfica 23.</b> Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras desde la muestra de agua cruda hasta la clarificación en las dosis de 4 a 14 mg/l para el Cloruro Férrico	88
<b>Gráfica 24.</b> Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras desde la muestra de agua cruda hasta la clarificación en las dosis de 8 a 18 mg/l para el Cloruro Férrico	88
<b>Gráfica 25.</b> Resultados promedio de la turbiedad después de la filtración para todas las pruebas realizadas con el coagulante cloruro férrico	89
<b>Gráfica 26.</b> Comportamiento del pH en las pruebas de jarras para el coagulante Cloruro Férrico en dosis de 4 mg/l a 14 mg/l	89
<b>Gráfica 27.</b> Comportamiento del pH en las pruebas de jarras para el coagulante Cloruro Férrico en dosis de 8 mg/l a 18 mg/l	90
<b>Gráfica 28.</b> Diagrama cajas y bigotes para la turbiedad filtrada de los coagulantes	92
<b>Gráfica 29.</b> Diagrama cajas y bigotes para el color filtrado de los coagulantes	92
<b>Gráfica 30.</b> Diagrama cajas y bigotes para el Hierro Filtrado de los coagulantes	93
<b>Gráfica 31.</b> Porcentaje de remoción para cada uno de los parámetros de los coagulantes Sulfato Férrico y Cloruro Férrico respecto a las dosis empleadas	94

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Sistema de fuentes de abastecimiento de agua a la planta de tratamiento	24
<b>Tabla 2.</b> Proyección poblacional municipio de Facatativá	25
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de los polielectrolitos	40
<b>Tabla 4.</b> Índice de floculación de Willcomb	44
<b>Tabla 5.</b> Normatividad Colombiana para potabilización de agua	45
<b>Tabla 6.</b> Características físicas del agua potable	46
<b>Tabla 7.</b> Características químicas del agua potable	46
<b>Tabla 8.</b> Características químicas con efectos adversos en la salud humana	46
<b>Tabla 9.</b> Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana	47
<b>Tabla 10.</b> Características microbiológicas del agua potable	47
<b>Tabla 11.</b> Identificación de los diferentes coagulantes para tratamiento de agua	48
<b>Tabla 12.</b> Características de los coagulantes más empleados en el tratamiento de potabilización de agua	49
<b>Tabla 13.</b> pH efectivo de los agentes coagulantes	51
<b>Tabla 14.</b> Tipo de coagulación y parámetros de acuerdo al tipo de agua	52
<b>Tabla 15.</b> Puntaje y calificación para la selección final de las alternativas	54
<b>Tabla 16.</b> Factor ponderado tenido en cuenta para la prueba de jarras	54
<b>Tabla 17.</b> Matriz de selección de los agentes químicos de acuerdo a la caracterización del agua	55
<b>Tabla 18.</b> Características del Sulfato de Aluminio tipo b líquido en relación a su implementación en tratamiento de aguas potables.	56
<b>Tabla 19.</b> Parámetros requeridos para los ensayos de jarras	61
<b>Tabla 20.</b> Rangos de los parámetros determinantes en la selección del coagulante	63
<b>Tabla 21.</b> Promedio mensual de datos históricos para el agua cruda en los últimos meses del año 2016 y en los primeros meses del 2017	65
<b>Tabla 22.</b> Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Sulfato Férrico a dosis de 4 mg/L a 14 mg/L.	67
<b>Tabla 23.</b> Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Sulfato Férrico a dosis de 2 mg/L a 12 mg/L.	68
<b>Tabla 24.</b> Resultados prueba de Aluminio residual con el coagulante sulfato férrico	76
<b>Tabla 25.</b> Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Policloruro de Aluminio a dosis de 12 mg/L a 22 mg/L añadiendo cal al agua a tratar.	77
<b>Tabla 26.</b> Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Policloruro de Aluminio, cambiando la condición de pH con ácido sulfúrico	78

<b>Tabla 27.</b> Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Cloruro Férrico a dosis de 4 mg/L a 14 mg/L.	83
<b>Tabla 28.</b> Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Cloruro Férrico a dosis de 2 mg/L a 12 mg/L.	84
<b>Tabla 29.</b> Resultados obtenidos transcurrido el proceso de clarificación y posterior filtración	95
<b>Tabla 30.</b> Resultados para los parámetros que sirven de base en el proceso	97
<b>Tabla 31.</b> Valores obtenidos del balance de materia para las alternativas	100
<b>Tabla 32.</b> Lista de productos químicos de las alternativas	101
<b>Tabla 33.</b> Parámetros determinantes para emplear las alternativas en la planta de tratamiento	101
<b>Tabla 34.</b> Precios de insumos de acuerdo a su dosis óptima requerida	102
<b>Tabla 35.</b> Resumen de costos para el estudio	103
<b>Tabla 36.</b> Materiales y reactivos para el desarrollo de las pruebas de jarras.	115
<b>Tabla 37.</b> Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Sulfato de Aluminio empleado actualmente en la planta de tratamiento.	116
<b>Tabla 38.</b> Porcentajes de Remoción para cada prueba de jarras con el coagulante Sulfato de Aluminio a cada una de las dosis empleadas	117
<b>Tabla 39.</b> Porcentajes de Remoción para cada prueba de jarras con el coagulante Sulfato Férrico a las dosis empleadas, luego de filtradas las muestras.	118
<b>Tabla 40.</b> Porcentajes de Remoción para cada prueba de jarras con el coagulante Policloruro de Aluminio a las dosis empleadas en la experimentación, luego de filtradas las muestras.	119
<b>Tabla 41.</b> Porcentajes de Remoción para cada prueba de jarras con el coagulante Cloruro Férrico a las dosis empleadas en la experimentación, luego de filtradas las muestras	120

## GLOSARIO

**AGUA CRUDA:** agua que no ha sido sometida a proceso de tratamiento químico o físico.

**AGUA POTABLE:** agua que puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a la salud por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en la Resolución 2115 de 2007.

**ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DEL AGUA:** pruebas de laboratorio efectuadas a una muestra para determinar sus características físicas, químicas o ambas.

**CLARIFICACIÓN:** proceso de separación de los sólidos del agua gracias a la acción de la gravedad.

**COAGULACIÓN:** aglutinación de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua por adición de coagulantes.

**COLOIDES:** sólidos finamente divididos no disueltos que permanecen dispersos en un líquido por largo tiempo debido a su menor diámetro y a la presencia de una carga eléctrica en su superficie.

**DOSIFICACIÓN:** proceso en el que se adiciona una sustancia química al agua

**DOSIS ÓPTIMA:** concentración de alguna sustancia o compuesto químico que produce la mayor eficacia y eficiencia de reacción en un proceso químico

**EFICIENCIA DE REMOCIÓN:** medida de la efectividad de un proceso en la remoción de una sustancia específica al interactuar químicamente.

**FILTRACIÓN:** proceso en el que se remueven las partículas suspendidas y coloidales del agua al hacerlas pasar a través de un medio poroso quedando retenidas en el mismo.

**FLOCS:** también conocidos como flóculos, son aglomeraciones de las partículas coloidales encontradas en el agua después de reaccionar con un agente coagulante en el proceso de floculación.

**FLOCULACIÓN:** aglomeración de partículas inducida por una agitación lenta de la suspensión coagulada previamente.

**FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA:** depósito o curso de agua superficial o subterráneo, natural o artificial, utilizado en un sistema de suministro de agua.

**MEZCLA RÁPIDA:** agitación violenta para producir desestabilización y dispersión instantánea de un producto químico en la masa de agua.

**MEZCLA LENTA:** agitación suave del agua con los coagulantes, con el fin de favorecer la formación de los flóculos de gran peso.

**PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP):** conjunto de tratamientos, equipos y materiales necesarios para efectuar procesos de potabilización que permiten cumplir con las normas de calidad del agua potable.

**PRUEBA DE JARRAS:** ensayo de laboratorio que simula las condiciones en que se realizan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en la planta de tratamiento.

**SEDIMENTACIÓN:** proceso en el cual los sólidos suspendidos en el agua se decantan por acción de la gravedad, previa adición de químicos coagulantes.

**SÓLIDOS SUSPENDIDOS:** pequeñas partículas de sólidos dispersas y no disueltas en el agua.

**SOLUCIÓN AMORTIGUADORA:** solución reguladora compuesta por una mezcla binaria de ácidos o bases con sus sales o pares conjugados, que inhibe los cambios excesivos en el pH.

**TRATAMIENTO:** todas aquellas operaciones y procesos realizados sobre el agua cruda, a fin de modificar sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas, para hacerla potable de acuerdo a las normas establecidas en la Resolución 2115 de 2007.

**TURBIEDAD:** propiedad óptica del agua basada en la medida de luz reflejada por las partículas en suspensión, medida en Unidades Nefelométricas de turbidez empleando un turbidímetro como instrumento de medición.

**UPC:** es la unidad estándar para la medición del color real hallado en mediciones de aguas expresada como el color que produce 1 mg/l de Platino en la forma Cloroplatinato (Pt-Co), cuyo color varía de un aspecto amarillo claro hasta marrón y su rango va de 0-500 Unidades de Color Platino-Cobalto.

## RESUMEN

La Empresa Aguas de Facatativá (EAF S.A.S. ESP), cuenta con una planta de tratamiento de aguas provenientes de fuentes superficiales y de pozos profundos, las cuales se tratan mediante los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección para consumo humano, utilizando ensayos de jarras que les permite determinar las mejores dosificaciones aptas en el tratamiento para potabilización de agua teniendo en cuenta los insumos requeridos para tal fin de acuerdo a la caracterización del agua cruda, apoyándose en el cumplimiento de la normativa nacional para calidad y consumo de agua potable.

Para el desarrollo de esta evaluación de agentes sustitutos, se recopila información acerca del proceso, realizando un diagnóstico general sobre las condiciones actuales de acuerdo a la caracterización del agua cruda superficial que ingresa a la planta de tratamiento suministrada por la empresa EAF S.A.S. ESP y a los resultados obtenidos con el empleo del coagulante Sulfato de Aluminio Tipo B a sustituir. De acuerdo a ello, se escogen aquellos coagulantes cuya implementación en el proceso permita a la empresa generar menores costos de producción y mayores eficiencias en el proceso al disminuir la concentración del insumo. Para esto, por revisión bibliográfica se determinan las 3 alternativas para la sustitución, realizando una matriz de selección en la que se establecen características de importancia y de mayor peso para la empresa en el proceso de clarificación. Teniendo en cuenta características como el tipo de agua cruda, el rango de pH en el que trabaja, los costos para su empleo, la formación de flóculos de gran tamaño y de fácil sedimentación, seleccionando así el cloruro férrico, el sulfato férrico y el policloruro de aluminio como las opciones que generan mayor ventaja económica y operativa dentro del proceso.

Con estas 3 alternativas, se realiza la evaluación mediante un desarrollo experimental, tomando muestras de agua a la entrada del proceso, para determinar sus características fisicoquímicas antes y después de realizados los ensayos de jarras para cada una, seleccionando finalmente las mejores dosis de cada insumo que permite obtener mayores cantidades de remoción de acuerdo a los parámetros de influencia (turbiedad, pH, color e hierro), y, permitiendo esto establecer el grado de eficiencia del sistema de potabilización de agua al emplear cada alternativa.

De acuerdo a los porcentajes de remoción obtenidos, se encuentra que el sulfato férrico y el cloruro férrico ofrecen mayores remociones en el agua cruda respecto al policloruro de aluminio, el cuál a las condiciones actuales de la planta, no presentó eficiencias en la remoción de las partículas coloidales. Con esto, se estima el mejor desempeño a nivel operativo en el que actualmente trabaja la planta de tratamiento teniendo en cuenta tiempos de sedimentación y velocidades variables para cada coagulante; para luego realizar un análisis financiero entre la

alternativa que mayor porcentajes de eficiencia con menores costos generó y el coagulante actual, teniendo en cuenta el balance de materia donde se especifica la cantidad mensual requerida para cada uno y el precio por kilogramo [kg] requerido para su implementación, estableciendo que la alternativa de sulfato férrico seleccionada presenta un menor costo frente a la actual, por lo que su ejecución en la planta de tratamiento podría ser viable.

**Palabras claves:** Coagulación, Floculación, Análisis físico-químico, Caracterización del agua, Desarrollo experimental.

## **INTRODUCCIÓN.**

La empresa de acueducto, alcantarillado, aseo y complementarios del municipio de Facatativá EAF S.A.S. ESP se enfoca en el tratamiento de aguas provenientes del Río Botello. Emplea los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración para determinar la buena calidad del agua a entregar a la población y la eficiencia en el proceso, donde los coagulantes son el eje central del mismo.

El agua cruda que ingresa a la planta de tratamiento, incluye partículas disueltas, material orgánico y minerales que impiden su uso directo para el consumo humano; por ello, debido a éstas exigencias en términos de calidad y costos, aunque la empresa EAF SAS ESP cumple actualmente con las normas establecidas, se quiere analizar alternativas de sustitución para los insumos utilizados en el proceso de coagulación.

En este trabajo de investigación, el análisis para la sustitución del sulfato de aluminio tipo B líquido surge con el fin de aumentar la efectividad del proceso disminuyendo costos de operación en el tratamiento, logrando además disminuir la cantidad de aluminio residual, debido a la alta variabilidad del mismo en el agua tratada, en el que algunos casos, sus valores superan los máximos permisibles, bajo el estricto cumplimiento de las normas colombianas actuales.

El desarrollo de este proyecto contempla la búsqueda de aquellos insumos que se puedan emplear en el tratamiento de agua potable de acuerdo a sus condiciones de operación, a la caracterización de los aspectos fisicoquímicos del tipo de agua que ingresa a la planta de tratamiento y a los costos vinculados con su empleo en la misma, permitiendo establecer las mejores dosis y las alternativas de mejor adaptación en la misma con el desarrollo de una experimentación basada en encontrar las mayores remociones de los aspectos fisicoquímicos más importantes a controlar durante el proceso como los son turbiedad, color, hierro y aluminio, y mejorar la calidad del agua con un aumento en la ventaja operativa y económica en las que se ve implicada la empresa EAF.

Con las alternativas seleccionadas de la experimentación y los parámetros operativos establecidos, se establece la dosis del insumo seleccionado para luego realizar la comparación que determina si su sustitución respecto al Sulfato de Aluminio es viable para la empresa.

Con esta investigación, se logró establecer las mejores dosis para los insumos seleccionados luego de realizado el desarrollo experimental, con las cuáles se realizó una comparación respecto al coagulante actual para determinar si es factible su cambio y su aplicación en el proceso de potabilización al ofrecer mayores eficiencias con menores costos de operación.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la sustitución de un agente coagulante en el proceso de coagulación-floculación en la potabilización de agua en la empresa EAF SAS ESP

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1.** Establecer los agentes químicos para el proceso de coagulación de acuerdo a la caracterización del afluente de la planta de tratamiento
- 2.** Seleccionar los agentes coagulantes de mayor eficiencia a través de un desarrollo experimental
- 3.** Estimar el desempeño de los dos mejores coagulantes de acuerdo a los parámetros de operación de la planta de tratamiento El Gatillo del Municipio de Facatativá
- 4.** Realizar la viabilidad financiera para la implementación del agente sustituto

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La planta de tratamiento de agua potable de la Empresa Agua de Facatativá Acueducto, Alcantarillado, Aseo y Servicios Complementarios EAF SAS ESP, se encuentra ubicada en el Departamento de Cundinamarca en el Municipio de Facatativá, República de Colombia en la dirección Carrera 1° Sur con Calle 16.

**Figura 1.** Ubicación geográfica de la planta de tratamiento de EAF SAS ESP



**Fuente.** Google Maps

### 1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL Y RESEÑA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

El primer acueducto del municipio se construyó en 1946 con el fin de direccionar los sistemas de acueducto para el municipio Facatativeño, siendo su fuente principal de abastecimiento la Quebrada Mancilla, desde la cual la captación de agua se realizaba empleando el uso de bocatomas de fondo conduciéndola a un desarenador y finalmente conducida a la planta de tratamiento La Guapucha ubicada en la parte alta del Barrio Dos caminos por medio de una tubería de Hierro de diámetro de 6”.

La actual planta de tratamiento de agua potable “El Gatillo”, se construyó en 1972 por el Instituto Nacional De Fomento Municipal (INSFOPAL), en la que el transporte de agua se realiza con un sistema de bombeo hasta un tanque de estabilización. Se realizó además, perforaciones de pozos subterráneos en los barrios Manablanca, Cartagenita y San Rafael I, que permitieran atender al aumento de la demanda municipal.

En 1987, a raíz de los déficits en la prestación del servicio de agua potable del municipio, se realizó una optimización a la planta de tratamiento iniciando con la

construcción de dos nuevos embalses (Gatillo I y Gatillo III). En 1992 se crea la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Facatativá (E.A.A.F), como un establecimiento público descentralizado del orden municipal. Iniciando labores para el mejoramiento del servicio al construir el embalse “Gatillo 0”, “San Rafael III”, “Guapucha I, II, III”.

En el año 2009, ante el acelerado crecimiento del municipio, se pone en marcha el proyecto Embalse Mancilla con el que se pretende contar con mayor capacidad de abastecimiento de agua para la población; además, se trabaja en renovación de los sistemas de macro medición y micro medición en el municipio, y, se realiza la Construcción de laboratorios de aguas y laboratorio de medidores.

Ya para el 2012, al cambiar su razón social a EMPRESA AGUAS DE FACATATIVA, Acueducto, Alcantarillado, Aseo y servicios complementarios EAF S.A.S. ESP, se inicia la ejecución de un plan de alcantarillado, para mantener el sistema de renovación y prolongación de las redes de distribución y adecuación de los sistemas de rebombeo; la optimización de la Planta de tratamiento central y de la Guapucha, realizando construcción y reparación de las redes de alcantarillado del municipio, con el fin de prevenir la contaminación de las fuentes hídricas como el río Botello; y, trabajando en la actualización y automatización del sistema de filtración y estaciones de bombeo.<sup>1</sup>

Actualmente, cuentan con la tecnología adecuada y funcionarios idóneos, que brindan servicios con calidad aplicando buenas prácticas profesionales teniendo en cuenta la normativa del RAS-2000<sup>2</sup>.

**1.2.1 Sistema de abastecimiento.** La planta de tratamiento de agua potable E.A.F S.A.S. E.S.P se denomina “Gatillo 0” con una capacidad instalada de 280 [L/s], la cual se abastece de dos tipos diferentes de agua especificadas en la Tabla 1, las aguas superficiales provenientes de ríos, cuencas y quebradas que son ácidas y requieren agregar cal, dentro de éstas están los embalses denominados Gatillo 0, I, II y III, que proveen una capacidad de almacenamiento de 510.000 m<sup>3</sup>; y, las aguas subterráneas de pozos profundos denominados San Rafael I y III, Guapucha II y III, Deudoro Aponte, Manablanca y Cartagenita, pozos con pH por encima de 7,5 y con menor cantidad de sólidos en suspensión y coloides, realizando su captación por un sistema de bombeo.

---

<sup>1</sup> Centro Administrativo Documental C.A.D. E.A.F. Sr. Carlos Julio Molina Ortega Investigador y Redactor: J. Orlando Mancera Martínez. <http://acueductofacatativa.com/archivos/menu%20acueducto/historia/historia.pdf> [24 de enero de 2017]

<sup>2</sup> El RAS-2000 es un reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico que involucra diseños, obras y procedimientos dentro de éste sector

**Tabla 1.** Sistema de fuentes de abastecimiento de agua a la planta de tratamiento

Sistema de embalses	Embalse	Capacidad de Almacenamiento [m <sup>3</sup> ]	
	Gatillo 0	400.000	
	Gatillo 1	30.000	
	Gatillo 2	40.000	
	Gatillo 3	40.000	
	Mancilla	320.000	
	Santa Marta	310.000	
	<b>Total</b>	<b>1.140.000</b>	
Sistema de aguas de pozos profundos	Pozo	Profundidad [m]	Caudal Estimado [L/s]
	San Rafael I	277	35
	San Rafael III	307	48
	La Guapucha II	222	55
	La Guapucha III	228	45
	Deudoro Aponte	396	55
	Manablanca	433	35
	Cartagenita	300	35
	<b>Total</b>		<b>308</b>

**Fuente:** CASTAÑEDA CORTES, María Camila, 2015

El empleo del tipo de agua en la planta de tratamiento, está determinado por periodos climáticos en la que se encuentre el municipio, donde en épocas de invierno se emplean las aguas superficiales, y en épocas de verano se emplean las aguas subterráneas en escases de las aguas superficiales.

La Empresa Aguas de Facatativá abastece a todo el casco urbano del Municipio de Facatativá exceptuando a 1.293 usuarios residentes del barrio Cartagenita<sup>3</sup>, los cuales son atendidos por la asociación de usuarios del sector–TRIPLE A DE CARTAGENITA, a la que la empresa EAF S.A.S. ESP vende el agua potabilizada en bloque, para que éstos se encarguen de su distribución y comercialización.

**1.2.2 Demanda actual y proyectada.** Según la proyección poblacional con base en datos del DANE para todo el casco urbano de Facatativá, con 122.522 habitantes para el año 2016 como se muestra en la Tabla 2 con una demanda de 280 [L/s]<sup>4</sup> y con una proyección de aproximadamente 9,1% de crecimiento respecto a la población actual, la empresa Aguas de Facatativá EAF S.A.S. ESP cubre la demanda actual a la población haciendo uso del agua cruda proveniente tanto de la fuente superficial del río Botello como de los pozos profundos, para cubrir demandas en época de sequía.

<sup>3</sup> CASTAÑEDA CORTES, María Camila. Propuesta para la implementación de técnicas alternativas con ayudantes de coagulación naturales, En la planta de tratamiento de agua potable de la empresa aguas de Facatativá. p.

<sup>4</sup> Ibid., p.22

**Tabla 2.** Proyección poblacional municipio de Facatativá

AÑO	POBLACIÓN	DEMANDA [L/s]
2010	108.590	264.66
2015	120.346	276.32
2016	122.522	280.00
2020	130.969	300.57
2025	143.725	331.33
2030	155.447	358.03

**Fuente.** DANE, Año 2016

**1.2.3 Descripción del proceso actual en la planta de tratamiento.** El sistema de acueducto del Municipio de Facatativá, tiene su fuente de abastecimiento de aguas superficiales de la Represa El Gatillo comprendidas por el Río Botello y la Quebrada Mancilla, que llegan a la Represa por medio de 4 embalses conocidos (Gatillo 0, 1, 2 3), y de aguas subterráneas de los pozos profundos de Manablanca, Guapucha, San Rafael y Cartagenita; el uso de estos dos tipos de aguas está dado por la época del año en la que se trabaje, usándose aguas superficiales en época de invierno y aguas subterráneas para reforzar en época de verano.

Estas aguas crudas requieren generar un tratamiento completo que incluye una serie de etapas de aireación, mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y desinfección del afluente, para finalizar con la obtención y distribución del agua potable a los diferentes sectores de la población cumpliendo con cada una de las especificaciones y normativa colombiana estipuladas.

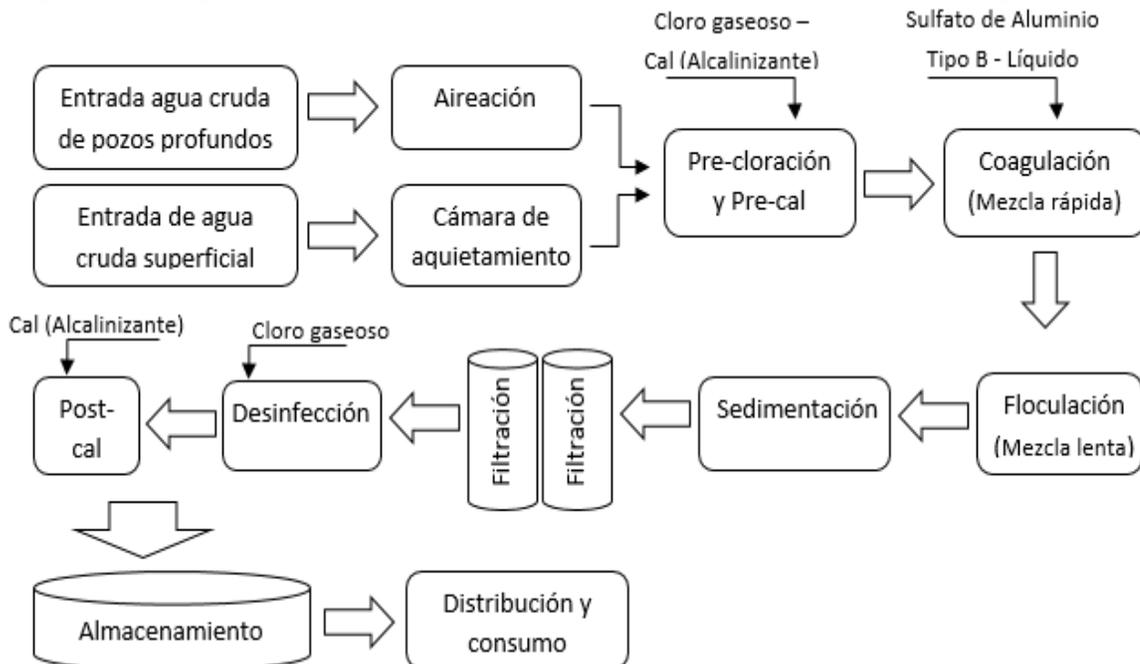
Además, como empresa, cuenta con el servicio de laboratorio de aguas desde su construcción en el año 2005, con fuentes de energía e iluminación en condiciones ambientales óptimas que permiten la facilidad y el correcto desempeño en los ensayos realizados, avalando con el control de calidad del agua a distribuir, porque les permite mantener una continua vigilancia en cada etapa para determinar las condiciones del agua y sus respectivas dosificaciones de agentes químicos<sup>5</sup>.

Actualmente, la planta de tratamiento tiene una capacidad nominal de 280 Litros/Segundo [L/s], generando un caudal de diseño nominal de 16.8 [m<sup>3</sup>/min], y el proceso de potabilización de agua en la planta Aguas de Facatativá se desarrolla bajo un sistema de tratamiento conformado por las etapas que se muestran en la Figura 2., que inicia con la llegada del agua cruda tomando dos estructuras diferentes; Las aguas llegan al aireador de cascada sí provienen de pozos profundos o a la cámara de aquietamiento sí son de fuente superficial<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> CASTAÑEDA CORTES, María Camila. Op. Cit., 22

<sup>6</sup> MORA R, Ing. Jaime. Optimización de la planta de tratamiento de Facatativá. Informe de diseño. Julio de 1983

**Figura 2.** Diagrama de los procesos empleados en el tratamiento de agua potable



**1.2.3.1 Proceso de aireación.** Este proceso debe ser aplicado únicamente a las aguas de los pozos para la conversión de su alto contenido de hierro a una forma sedimentable. Para ello, se tiene un aireador tipo cascada con una serie de escalones que permitirá la llegada, quietamiento y posterior caída a gran velocidad del agua subterránea<sup>7</sup>. A medida que el agua va pasando por las bandejas ventiladas, se crea un contacto entre el agua y el aire.

Cuando llega el agua, se permite entrar en contacto con el aire (Ver Figura 3) para incrementar la concentración de oxígeno disuelto y producir oxidación de minerales disueltos (Hierro y Manganeseo) para que se precipiten por decantación o filtración, eliminación de sustancias volátiles (Sulfuro de Hidrógeno y Metano) que afecta el sabor y el olor, y reducción del contenido de dióxido de carbono del agua.<sup>8</sup>

<sup>7</sup> MORA R, Ing. Jaime. Optimización de la planta de tratamiento de Facatativá. Informe de diseño. Julio de 1983

<sup>8</sup> Tratamiento de emergencia de agua potable en el lugar de consumo. Organización Mundial de la Salud. Guía Técnica No. 5, 2009. p. 1[en línea]<http://www.disaster-info.net/Agua/pdf/5-AguaConsumo.pdf>

**Figura 3.** Equipo de aireación en la planta “La Guapucha” en la empresa EAF SAS ESP para un caudal de entrada de 280 L/s.



**1.2.3.2 Cámara de aquietamiento.** Se aplica para las aguas superficiales que son bombeadas de los Embalses “El Gatillo” (ver Figura 4), las cuales llegan por la parte inferior de una cámara ubicada después del último escalón del aireador, para mezclar las aguas aireadas de los pozos (Cuando son requeridos) con las aguas del embalse. Ésta cámara de aquietamiento permite dar un sentido y una dirección al agua de donde sale un canal que llega a una canaleta Parshall<sup>9</sup> para medición y mezcla, encontrándose éste contiguo al exterior de los floculadores<sup>10</sup>.

**Figura 4.** Embalse El Gatillo de la planta EAF de Facatativá



**1.2.3.3 Pre-cloración.** Se agrega cloro gaseoso a la canaleta Parshall con el fin de eliminar de forma parcial gérmenes y bacterias y eliminar significativamente el sabor, materias orgánicas oxidables, microorganismos indeseables y algas que llegan con el agua cruda; esto, con el fin de realizar un acondicionamiento que permita aumentar la eficiencia y eficacia en las etapas posteriores.

**1.2.3.4 Pre-cal y post-cal.** Se añade Cal Hidratada para aumentar y controlar el pH con el coagulante agregado para obtener la mayor eficiencia en el proceso,

<sup>9</sup> La canaleta Parshall se refiere a un sistema empleado para medir caudales de entrada de agua en la planta de tratamiento.

<sup>10</sup> Ibid., p. 1

disminuir la dureza del agua para mayor facilidad de tratamiento, neutralizando el dióxido de carbono y bicarbonatos formando carbonatos de calcio de fácil precipitación, y permitir que el coagulante de sulfato de aluminio trabaje en su rango óptimo de pH.

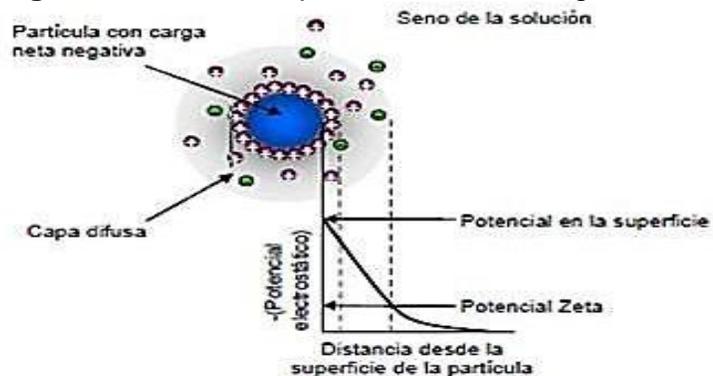
**1.2.3.5 Proceso de coagulación.** Este proceso de mezcla rápida se realiza mediante una Canaleta Parshall de 0.30 m de garganta, produciéndose una velocidad de 2.09 [m/s] para el caudal de diseño de la planta, y un gradiente de velocidad de 2175 [s<sup>-1</sup>]. La mezcla permitirá la desestabilización electrostática de los sólidos coloides en suspensión al agregar la dosificación adecuada de una sustancia química (Coagulante), permitiendo la posterior aglomeración y formación del floc, al generar partículas de mayor tamaño y mayor densidad para realizar después su precipitación.

**Figura 5.** Suministro Sulfato de Aluminio Tipo B y Canaleta Parshall



En la PTAP “El Gatillo” de la empresa, se emplea actualmente como coagulante el Sulfato de Aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) de tipo B líquido; al pasar por la canaleta Parshall (Ver Figura 5), crea una fuerte turbulencia o resalto hidráulico para que la mezcla entre el agente químico empleado y el agua sea mayor.

**Figura 6.** Modelo esquemático de la coagulación



**Fuente.** MARTÍNEZ NAVARRO, Fabiola. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. p, 20.

La mezcla permite la desestabilización cuando la molécula de sulfato de aluminio se abre en su parte aniónica y en su parte catiónica al reaccionar con la alcalinidad del agua y con ello producir los hidróxidos de aluminio con carga positiva que al ser insolubles permiten la formación de los precipitados (Ver Figura 6), con el fin de retener los compuestos disueltos y en suspensión que llegan con el agua y que generan su turbiedad, color y sabor.

**1.2.3.6 Proceso de floculación.** Proceso que permite la aglomeración de las partículas previamente desestabilizadas, convirtiéndolas primero en microfloculos y más tarde en floculos de mayor tamaño respecto al inicial, empleando el modelo tipo Alabama, con el que se cuenta en la PTAP<sup>11</sup> “El Gatillo” (Ver Figura 6) que posee tres zonas de diferente gradiente de velocidad [ $20, 30$  y  $40 \text{ s}^{-1}$ ], con un orificio en la parte inferior obligando al agua a fluir hacia arriba al encontrarse enfrente con una pantalla a su salida.

**Figura 7.** Floculadores de la planta EAF con gradientes de  $40, 30$  y  $20 \text{ [1/s]}$



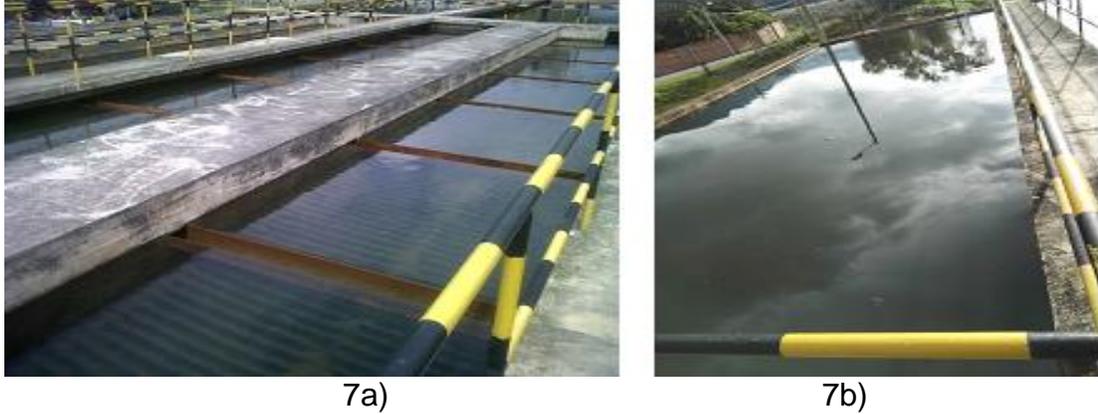
**1.2.3.7 Proceso de sedimentación.** Es un proceso que consiste en la remoción de las partículas aglomeradas (floculos), las cuales se van a depositar en el fondo de los equipos sedimentadores por acción de la gravedad, para evitar costos de funcionamiento y de mantenimiento de bombas, produciéndose con ello la clarificación del agua. Para que ello ocurra, se requiere que la velocidad del flujo

---

<sup>11</sup> PTAP según sus siglas, se refiere a una planta de tratamiento de agua potable apta para consumo con estándares de calidad

de agua sea inferior a la velocidad con la que se depositan los flóculos, para que se puedan situar y no sean arrastradas por la corriente<sup>12</sup>.

**Figura 8.** Sedimentadores, a) Estructura convencional y b) Estructura de alta tasa



En la PTAP “El Gatillo” se cuenta con dos (2) estructuras de sedimentación los cuales operan en paralelo, para garantizar una remoción eficiente de la turbiedad; se encuentran los sedimentadores convencionales I y II (Ver Figura 7b) donde el agua se floclula y precipitan los flocs por el peso de los mismos; y los sedimentadores de alta tasa o alta rata (Ver Figura 7a), donde el agua ingresa por debajo del equipo y atrapan los flóculos más livianos que no se lograron sedimentar.

**1.2.3.8 Proceso de filtración.** Proceso que consiste en hacer pasar la masa de agua proveniente de las unidades de sedimentación a través de una canaleta de conducción y retener aquellas partículas coloidales y en suspensión que no lograron sedimentarse, haciéndolas pasar a través de un lecho poroso con diferentes granulometrías, con el fin de remover bacterias y la turbiedad remanente<sup>13</sup>.

Se proyectan en la PTAP “El Gatillo” cuatro (4) filtros de alta tasa de filtración y con sistema de auto lavado (Ver Figura 8), que operan en paralelo en la modalidad de tasa de filtración variable declinante; es decir, la entrada del agua a las estructuras es realizada de forma sumergida y su pérdida de carga en ellos va aumentando a medida que los lechos se van rellendo. Cada filtro posee en su lecho filtrante una capa de gravilla que funciona como lecho de soporte (0,40 m),

<sup>12</sup> OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA. Programa de Capacitación y certificación del sector de agua potable y saneamiento básico. p. 89. Curso Básico, SENA, 2ª Edición Ministerio de Desarrollo Económico, 1999. Impresión Sena Publicaciones. [en línea] [http://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad\\_del\\_agua/operacion\\_potabilizacion/index.html#](http://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad_del_agua/operacion_potabilizacion/index.html#) [Citado el 28 de Marzo de 2017]

<sup>13</sup>ibid., p. 92.

una capa de antracita (0,45 m) y otra de arena de río (0,20 m) con falso fondo tipo californiano.

**Figura 9.** Filtros y sus válvulas automáticas para lavado



**1.2.3.9 Proceso de desinfección.** Proceso que sirve de complemento en el tratamiento al dosificar en la PTAP “El Gatillo” con cloro gaseoso ( $Cl_2$ ) entre 2 y 3 mg/L (Post-Cloración), con el fin de desinfectar el agua filtrada previamente, destruyendo o inactivando microorganismos patógenos que fueron resistentes al proceso, empleando un sistema de dosificación automatizado en el canal del agua filtrada. Se agrega además, cal (Post-Cal), para regular finalmente el pH que se va a entregar a la población Facatativeña.

**1.2.3.10 Almacenamiento.** Para el almacenamiento del agua después de su tratamiento, se cuentan con los tanques La Guapucha cuya capacidad es de 2.300 m<sup>3</sup>, y los tanques de Pueblo Viejo con capacidad de 3.850 m<sup>3</sup>, generando un almacenamiento total de agua potable de 6,150 m<sup>3</sup> para la PTAP “El Gatillo”. Por bombeo, se envía el agua potabilizada a los tanques de almacenamiento para su posterior distribución.

**1.2.3.11 Distribución.** El sistema cuenta con dos sectores principales, el central del municipio y el del barrio Cartagenita. La PTAP “El Gatillo” distribuye el agua potabilizada al municipio por acción de la gravedad debido a que luego de un bombeo realizado a los tanques de almacenamiento que se encuentran en la parte alta del municipio, permitiendo su distribución.

Las redes contemplan tuberías con diámetros de 16” a 6”, redes secundarias con diámetros de 4” y 3” y redes menores con diámetro de 2”. El material de las tuberías está compuesto de la siguiente manera: Tuberías en hierro fundido 2.5%, asbesto cemento 33% y PVC 64.5%, en los diferentes diámetros<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> MORA. Ing, Op. Cit.,

## 2. MARCO TEÓRICO

El agua como recurso natural cuenta con una estructura establecida de manera sencilla con un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno con enlaces iónicos debido a la atracción eléctrica entre los dos elementos con cargas opuestas, creando una fuerza que permite romper el enlace iónico y con ello lograr disolver muchos compuestos iónicos<sup>15</sup>. Estos enlaces en las moléculas del agua, le confieren estabilidad y la posibilidad que especies moleculares se disuelvan fácilmente, ocasionando que en la naturaleza se encuentre mezclada con compuestos químicos no deseados para el consumo porque generan efectos adversos a la salud de las personas.

El agua es de vital importancia con el propósito de realizar procesos de tratamiento de cualquier fuente para su potabilización. Al tratarse de un compuesto abundante que logra disolver diversos componentes debido a los residuos arrojados, en la planta de tratamiento “El Gatillo” de la empresa EAF se requiere disminuir el contenido de aluminio residual presente en el agua después de su proceso de clarificación, para estar bajo los estándares de las normas, logrando agregar nuevos insumos coagulantes que permitan ésta mejora al aumentar la eficiencia en el proceso y, además, reducir costos de operación.

En este apartado del documento se incluyen los conceptos base que se relacionarán en el capítulo del planteamiento de las alternativas de los agentes coagulantes a sustituir en el proceso de potabilización.

### 2.1 AGUA POTABLE

Es considerada aquella agua que es apta para el consumo humano, sin que cause daños o enfermedades al ser ingerida; por lo que se utiliza un sistema de agua potable cuyo fin es la entrega de agua en cantidad y calidad adecuada que permita satisfacer las necesidades de una población por ser un líquido de vital importancia para sobrevivir<sup>16</sup>. Para el abastecimiento de éste tipo de agua, depende de la disponibilidad del agua en la tierra, teniendo en mayores proporciones: Aguas superficiales que se obtienen de ríos, arroyos, lagos, lagunas y pueden ser tratadas con facilidad y a costos moderados, pero al mismo tiempo su contaminación es de fácil acceso por las cargas de agua residual; y, aguas subterráneas que se encuentran confinadas en el subsuelo obtenidas por medio de pozos profundos, galerías filtrantes y manantiales generando mayores costos

---

<sup>15</sup> JIMÉNEZ TERÁN, José Manuel. Diseño de abastecimiento de agua potable. [en línea] <https://www.uv.mx/ingenieriacivil/files/2013/09/Manual-de-Diseno-para-Proyectos-de-Hidraulica.pdf> [Citado el 15 de Febrero de 2017]

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

porque se requiere extraerlas pero menor contaminación porque se encuentran protegidas del ambiente<sup>17</sup>.

**2.1.1 Potabilización de agua.** Es un tratamiento efectuado para mejorar todos los aspectos físicos, mecánicos y químicos que harán que el agua adquiera las características necesarias para que sea apta para su consumo; por ello, para el diseño de una planta potabilizadora, es necesario conocer los parámetros físico-químicos y biológicos del agua así como los procesos necesarios para modificarla.

## **2.2 FACTORES INFLUYENTES EN LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE**

Aquellos parámetros influyentes en la calidad del agua a tratar son aquellos que ofrecen mayores eficiencias en el proceso de acuerdo al coagulante empleado, aumentando su remoción al realizar el proceso de clarificación, dentro de ellos está:

**2.2.1 Turbiedad.** La turbidez es una propiedad óptica originada por partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida, etcétera), que pueden contener además agentes patógenos adheridos a sus partículas y que causan que la luz se disperse o se absorba, reduciendo la transparencia del agua en menor o mayor grado.

El método más usado para la determinación de la turbidez es el método nefelométrico, que mide la turbiedad por medio de un equipo llamado turbidímetro expresando los resultados en unidades de turbidez nefelométrica (UTN), con el fin de comparar la intensidad de la luz dispersada por la muestra con la intensidad de la luz dispersada por una suspensión estándar de referencia bajo las mismas condiciones de medida<sup>18</sup>. Con ello, a mayor intensidad de luz dispersada, mayor su turbiedad, creando una relación directa. En la coagulación, para cada turbiedad existe una cantidad de coagulante, con el que se obtiene la turbiedad residual más baja, que corresponde a la dosis óptima del mismo.

- **Remoción de turbiedad:** Su determinación es de gran importancia en aguas para consumo humano, directamente relacionado con el proceso de coagulación y posterior sedimentación en el incremento del tamaño de partículas suspendidas y su fácil precipitación, logrando con su remoción aumentar la eficiencia en el proceso respecto al coagulante empleado a valores aceptables a la salida, cuyo

---

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

<sup>18</sup> MURILLO CASTAÑO, Diana Marcela. Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el Aluminio residual del agua tratada. Tecnólogo Químico, Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, 2011, p. 23-24, Disponible en el catálogo en línea de la Universidad Tecnológica de Pereira <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2081/628161M977.pdf?sequence=1>

porcentaje debe variar en función de la turbiedad inicial, con el fin de comparar y obtener resultados que permitan optimizar los procesos de clarificación<sup>19</sup>.

**2.2.2 Color.** El color del agua se debe a la presencia de minerales como hierro, manganeso y otros compuestos metálicos, materia orgánica en descomposición, sustancias de origen vegetal (ácidos húmicos, turba, plancton) por su extracción acuosa y residuos coloridos de las industrias. Su color natural en el agua sin tratar, es debido a partículas coloidales que se encuentran cargadas de forma negativa, requiriéndose el uso de coagulantes de sales con iones trivalentes como  $Al^{+3}$  y/o  $Fe^{+3}$  para su remoción.

Existen dos tipos de color reconocibles en el agua: El color verdadero, que es el color de la muestra cuando se ha removido su turbiedad; y, el color aparente, que incluye tanto sustancias en solución y coloidales como material suspendido en el agua, y puede ser determinado sobre la muestra original del agua sin previa centrifugación o filtración<sup>20</sup>. Su unidad de medida es el color producido por un mg/L de platino en su forma de ion cloro-platinato, y puede ser medido conjuntamente con el pH, porque su intensidad de color depende de este de forma proporcional.

▪ **Remoción de color:** Factor ligado a la calidad del agua y su aspecto físico de estética y sabor, debido a la percepción del consumidor. El color es producido por coloides de tipo hidrofóbico (ácidos que no logran interactuar con el agua) que causan la turbiedad en el agua cruda.

**2.2.3 Olor y sabor.** Las características de olor y sabor en el agua están indiscutiblemente ligadas entre sí, prácticamente indistinguibles y son debidas a la presencia de sustancias químicas volátiles ( $H_2S$ , Cloruro de sodio, Sulfato de sodio y magnesio, hierro y manganeso, fenoles, aceites, etc.), presencia de hongos y algas, y a la materia orgánica en descomposición.

Su determinación sirve para evaluar la calidad del agua tratada y su aceptabilidad por parte del consumidor, conocer la fuente de una posible contaminación y/o para el control de procesos en una planta de tratamiento.

**2.2.4 pH.** El pH influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones. Además, influye en los procesos de coagulación y desinfección en el tratamiento del agua, y, su valor para consumo humano, deberá estar comprendido entre 6,5 y 9,0. Se determina por potenciometría, expresado en

---

<sup>19</sup> RÍOS PIGNATTA, Danilo Andrés. Utilización del parámetro “eficiencia” en remoción de turbiedad en sedimentadores. [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/peru/urgapa006.pdf>, p. 3

<sup>20</sup> MURILLO CASTAÑO. Op. Cit., p. 24

unidades de pH, y va en aumento a medida que aumenta la temperatura de medida *in situ*.

Se producen iones hidrógeno ( $H^+$ ) e iones hidroxilo ( $OH^-$ ) por cuenta de la disociación del agua, siendo el pH la medición de estos, y cuyo resultado muestra el grado de acidez de un agua, para aguas neutras  $pH=7$ , para aguas ácidas  $pH<7$  y para aguas básicas/alcalinas con  $pH > 7$ .

**2.2.5 Alcalinidad.** La alcalinidad de un agua determina su capacidad para neutralizar ácidos y para reaccionar con iones hidrógeno, causada por la presencia de iones carbonato, hidróxidos y bicarbonato en grandes proporciones.

Se determina en unidades de mg/L de Carbonato de Calcio ( $CaCO_3$ ), realizando titulación con una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al  $0.02N^{21}$ . Donde, los iones  $H^+$  que provienen de esa solución neutralizan los iones  $OH^-$  que se encuentran libres, utilizando indicadores para su determinación.

Si el pH del agua está entre 4.3 y 8.3 la alcalinidad se debe a bicarbonatos y carbonatos. Y, si el pH del agua es menor de 4.3 no hay alcalinidad<sup>22</sup>. También, se considera alcalinidad baja a valores menores a 50 mg/L de  $CaCO_3$  y alta alcalinidad a los mayores a 250 mg/L de  $CaCO_3$ .

**2.2.6 Sólidos.** Los sólidos son aquellos residuos obtenidos como materia remanente luego de evaporar y secar una muestra de agua a una temperatura dada. Según el tipo de asociación con el agua, pueden ser:

- **Sólidos totales:** Son todo material disuelto y no disuelto que permanece como residuo de una evaporación.
- **Sólidos disueltos:** Son fracciones del total de sólidos presentes, compuestos por materia coloidal, sales inorgánicas y materia orgánica disuelta en pequeñas cantidades. Su determinación se realiza por la diferencia de los sólidos totales y los suspendidos, y pueden removerse por métodos físicos y químicos por precipitación para evitar problemas de olor, color, sabor.
- **Sólidos coloidales:** Es todo aquel material sólido finamente suspendido como bacterias, partículas causantes de color, etc., que se encuentran en suspensión

---

<sup>21</sup> N según su sigla, hace referencia a la concentración del ácido sulfúrico en unidades de Normalidad.

<sup>22</sup> OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA. Programa de Capacitación y certificación del sector de agua potable y saneamiento básico. p. 89. Curso Básico, SENA, 2ª Edición Ministerio de Desarrollo Económico, 1999. Impresión Sena Publicaciones. [en línea] [http://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad\\_del\\_agua/operacion\\_potabilizacion/index.html#](http://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad_del_agua/operacion_potabilizacion/index.html#) [Citado el 28 de Marzo de 2017]

y no sedimentan por acción de gravedad, sino que su remoción requiere de procesos químicos como coagulación, filtración o acción biológica.

- **Sólidos en suspensión:** Es todo material no disuelto o residuos que no logran filtrarse, siendo transportados por acción de arrastre y soporte del movimiento del agua. Su modo de determinación es por filtración.

**2.2.7 Potencial Zeta.** Es un parámetro electrostático que permite controlar la interacción existente entre las partículas suspendidas en el agua cruda, siendo una medida de la estabilidad en una dispersión coloidal suspendidas en el agua con respecto a la agregación de partículas, porque sirve de índice en la interacción repulsiva entre dichas partículas<sup>23</sup>. A medida que éste valor disminuye, las partículas se aproximan cada vez más aumentando la posibilidad de colisionar entre ellas dependiendo del equilibrio entre las fuerzas de atracción experimentadas en todos los cuerpos, y de las fuerzas de repulsión determinadas por la magnitud del potencial en la capa de deslizamiento.

**2.2.8 Remoción de contaminantes.** En todo tratamiento de agua potable, la remoción de los contaminantes presentes es de mayor importancia, porque permite determinar el nivel de calidad del agua a entregar a los consumidores, eliminándolos en gran medida para estar dentro de los parámetros permitidos.

### 2.3 PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA POTABLE

Dentro de las operaciones unitarias que intervienen en el proceso de potabilización de agua, se encuentra la clarificación, cuyo objeto es retirar sólidos suspendidos, finamente divididos y material coloidal convirtiéndolos en partículas más grandes que puedan removerse con mayor facilidad; este proceso se puede emplear en tratamiento de aguas municipales generando agua para consumo humano y en tratamiento de aguas industriales para elaboración y obtención de otros productos y/o servicios<sup>24</sup>; involucrando las operaciones de coagulación, floculación y sedimentación.

---

<sup>23</sup> BETANCUR CORREDOR, Bibiana; JIMÉNEZ GARCÍA, Davis Mauricio y GONZAGA LINARES, Balmes G. Potencial zeta (z) como criterio de optimización de dosificación de coagulante en planta de tratamiento de agua potable. *En:* Portal de revistas UN bdigital - Facultad de Ingenierías – UNALMED. Julio 23 de 2012. DYNA, Volumen 79, Número 175, p. 166-172, 2012. ISSN electrónico 2346-2183. ISSN impreso 0012-7353. [en línea]

< <http://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/18293/43531> > [Citado el 18 de Febrero de 2017]

<sup>24</sup> COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *En:* Portal de revistas UN bdigital - Facultad de Minas – UNALMED. Octubre 5 de 2010. DYNA, Volumen 78, Número 165, p. 18-27, 2011. ISSN electrónico 2346-2183. ISSN impreso 0012-7353 [en línea]

<<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>> [Citado el 27 de Febrero de 2017].

**2.3.1 Proceso de coagulación.** Etapa que pretende desestabilizar las partículas coloidales suspendidas para que se puedan aglomerar; eliminando así la turbiedad y la concentración de las materias orgánicas y de los microorganismos<sup>25</sup>. Por medio de la adición de agentes químicos –coagulantes- y al emplear la energía de mezclado, ocurre una desestabilización química de las partículas coloidales permitiendo la formación de flóculos al ocurrir una aglomeración entre ellas y su posterior precipitación. Los coagulantes empleados son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad de la misma para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando.

Este proceso se usa para<sup>26</sup>:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no se puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, en algunos casos de precipitados químicos suspendidos en otros.

**2.3.1.1 Agentes coagulantes.** Los coagulantes son materiales químicos de hierro o aluminio que se adicionan al agua para lograr la descarga de todas las partículas coloidales y suspendidas que se encuentran cargadas negativamente, dando origen a la formación de partículas más grandes (flóculos), que sedimentan con mayor rapidez<sup>27</sup>.

Estas partículas coloidales se dividen en hidrofóbicas e hidrofílicas, dada su afinidad con el agua. Las primeras no logran su dispersión espontánea en el agua por lo que requiere de reacciones físicas para su coagulación; y las segundas, reaccionan químicamente de forma espontánea con el agua y con los coagulantes formando suspensiones coloidales reversibles.

También, existen ayudantes de coagulación, que son sustancias que producen poco o nada de floc cuando se usan solas, pero al unirse a los coagulantes, mejoran sus resultados.

---

<sup>25</sup> SEDAPAL. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN [En línea] <[http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)> [Citado el 20 de Marzo de 2017]

<sup>26</sup> RESTREPO OSORNO, Herán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Proyecto de Grado (ingeniero de minas), Medellín. Universidad Nacional de Colombia, 2009, p. 7-9, 12 [en línea] <[http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239\\_2009.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239_2009.pdf)>. Citado el 27 de Febrero de 2017]

<sup>27</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua, Tomo 1, Editorial Mc Graw Hill- Interamericana, 3ª Edición, Bogotá, Colombia, 2000, p. 47

## Coagulantes metálicos (convencionales).

Son compuestos inorgánicos metálicos de aluminio o hierro, cuya polimerización se inicia cuando se pone en contacto con el agua dándose la adsorción por los coloides presentes en el agua y cuyo uso común está basado por su efectividad, disponibilidad y relativo bajo costo; se clasifican en coagulantes basados en hierro y en coagulantes basados en aluminio que incluyen: sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico, sulfato de cloruro férrico, sulfato poliférrico, sales de hierro con polímeros orgánicos; y, sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, aluminato de sodio, clorhidrato de aluminio, policloruro de aluminio, sulfato de cloruro de polialuminio, silicato de cloruro de polialuminio, formas de cloruro de polialuminio con polímeros inorgánicos respectivamente, las cuales al adicionar al agua, reaccionan con la alcalinidad de la misma y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y permiten la formación de los precipitados<sup>28</sup>.

Cada uno tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación dependiendo de las características químicas del agua cruda. Son además, sales ácidas que disminuyen el pH del agua y las cuales se les requiere agregar un álcali como cal o soda cáustica, dependiendo del agua a tratar<sup>29</sup>.

**a) Sales de Aluminio.** Las sales de aluminio son las más empleadas porque permiten formar un floc pesado<sup>30</sup>.

**Sulfato de Aluminio.** El Sulfato de Aluminio,  $Al_2(SO_4)_3 \times 18H_2O$ , aunque es una sustancia irritante, lesiona las mucosas y puede causar hemorragias severas, es el que se utiliza con mayor frecuencia en plantas de tratamiento de agua potable debido a su bajo costo y su manejo sencillo, encontrándose en presentación líquida y sólida, y en diferentes concentraciones de alúmina ( $Al_2O_3$ ), parte reactiva del coagulante. Su propiedad como catión metálico está asociada con el agua en solución, actuando como ácidos y con las bases de la misma, ocurriendo un consumo y un descenso del pH al actuar también con las bases que constituyen la alcalinidad. La dosis de alumbre varía normalmente entre 5 a 50 mg/L para aguas naturales a pH efectivo de 5.5 a 8.

Cuando se añaden soluciones de sulfato de aluminio al agua, las moléculas se disocian en  $Al^{+3}$  y  $SO_4^{-2}$ . El  $Al^{+3}$  puede combinarse con coloides cargados

---

<sup>28</sup> MURILLO CASTAÑO, Diana Marcela. Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2081/628161M977.pdf?sequence=1> [En línea], p- 35-40

<sup>29</sup> COGOLLO FLÓREZ. Op.Cit.

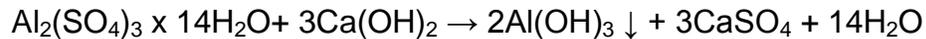
<sup>30</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua, Tomo 1, Editorial Mc Graw Hill-Interamericana, 3ª Edición, Bogotá, Colombia, 2000, p.99-110.

negativamente para neutralizar parte de la carga de la partícula coloidal, y también con los OH<sup>-</sup> del agua para formar hidróxido de aluminio de carácter coloidal, que absorbe los iones positivos en solución neutralizando la carga de los coloides negativos permitiendo la coagulación y formación de las aglomeraciones<sup>31</sup>.

Además de disociarse, el coagulante reacciona con la alcalinidad natural del agua para formar floc de hidróxido de aluminio:



Si el agua contiene poca o nula cantidad de alcalinidad natural para reaccionar, se debe añadir la alcalinidad necesaria, mediante cal o soda, siendo la cal más económica<sup>32</sup>:



II. **Policloruro de Aluminio.** El Policloruro de Aluminio (PAC) es una sal polimérica derivada del aluminio que permite una mejor formación del floc a un rango de pH más amplio, con menor producto de lodos y poca o ninguna necesidad de usar en conjunto polielectrolitos, aunque tiene un costo mayor al sulfato de aluminio o el cloruro férrico.

**b) Sales de Hierro.** Estas sales forman flóculos más pesados que las sales de aluminio con mayor velocidad de asentamiento trabajando a rangos de pH más extensos. Son usados usualmente cuando se requiere aumentar el peso del floc en los sedimentadores para incrementar su eficiencia. Al reaccionar con las moléculas del agua y con la alcalinidad, se hidroliza hasta formar hidróxidos de hierro.

I. **Cloruro Férrico.** El Cloruro Férrico se aplica en solución del 2% al 20% v/v  $\text{FeCl}_3$  de acuerdo a las características de la planta de tratamiento y puede trabajar en rangos de pH amplios desde 4 hasta 11, aunque su uso común es para aguas ácidas y blandas, fuertemente coloreadas y con contenido de ácido sulfhídrico. Pero, son difíciles de manejar porque generan lodos con hierro que son corrosivos y pueden teñir objetos y corrientes de agua.

II. **Sulfato Férrico.** El Sulfato Férrico se encuentra comúnmente en forma hidratada como  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$ . Su rango de pH es amplio entre 3.5 hasta 11, con la adición también de un álcali (Soda o Cal) en combinación con el coagulante. Aunque, su uso común es para trabajar en aguas ácidas.

---

<sup>31</sup> Ibid., p. 36

<sup>32</sup> MURILLO CASTAÑO, Diana Marcela. Op. Cit., p. 38

III. **Sulfato Ferroso.** El Sulfato Ferroso es el coagulante más económico de las sales de hierro, encontrado corrientemente en forma hidratada como  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , y debe usarse en combinación con cal. Se usa para aguas turbias, fuertemente alcalinas, con pH superiores a 8.

### Coagulantes Polielectrolitos (alternativos).

Son coagulantes inorgánicos pre-polimerizados y ayudantes de coagulación (Tabla 3), porque sus cadenas poliméricas están ya formadas cuando se los agrega al agua y cuyo comportamiento diferente es debido a sus características de especiación química<sup>11</sup>. Tienen diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas y sus flóculos tienden a ser grupos de pequeñas esferas y/o estructuras tipo cadena con tamaño menor a 25 mm, diferencia estructural que les permite producir una menor turbiedad en suspensión que el sulfato de aluminio<sup>33</sup>.

**Tabla 3.** Clasificación de los polielectrolitos

Según su origen	Según su carga	
Polímeros naturales	Iónicos	Catiónicos (+)
		Aniónicos (-)
Polímeros sintéticos	No iónicos	

**Fuente.** ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua, Tomo 1. Editorial Mc Graw Hill - Interamericana, 3ª Edición.

Los polímeros naturales son aquellos producidos por reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas (Ej. Carbohidratos, Proteínas, Polisacáridos como almidón), con propiedades coagulantes o floculantes, cuya ventaja es su baja toxicidad al poder emplearse también como alimentos o aditivos. Dentro del grupo, los almidones son los que presentan una amplia gama de posibilidades de uso (Almidón de maíz, de yuca, de papa y de trigo).

Los polímeros sintéticos son largas cadenas de compuestos orgánicos que no tienen carga eléctrica y que se producen por las transformaciones químicas de los derivados del petróleo, cuyo monómero básico es la acrilamida en la mayoría de éstos. Dentro de los polímeros no iónicos está la poliacrilamida y la sílica activada obtenida por la reacción de una solución diluida de sodio con compuestos agentes activadores que promueven la polimerización, pero cuya toxicidad es elevada por los monómeros que se producen, reduciendo su uso en agua potable<sup>34</sup>.

Además, se consideran polímeros más eficientes que el sulfato de aluminio por sus ventajas de menor producción de lodos y menor dependencia de la temperatura y el pH<sup>11</sup>. Aunque, su eficiencia se ve afectada por parámetros como la composición del agua cruda y las condiciones de operación específicas.

<sup>33</sup> ARBOLEDA VALENCIA. Op.Cit. p.48

<sup>34</sup> ARBOLEDA VALENCIA. Op.Cit. p.49

Dentro de sus ventajas y características respecto a los coagulantes convencionales están<sup>35</sup>:

- Otorgan mejores resultados al utilizarse como ayudantes de floculación, interviniendo para reforzar las uniones,
- Logran producir un floc que sedimenta con mayor velocidad
- Su dosificación en pequeñas cantidades logra reducir gastos de coagulante
- Con polielectrolitos catiónicos es posible coagular algas rápidamente
- Su efectividad difiere del tipo de agua al cuál se va a emplear
- Se deben agregar en forma de solución diluida para generar una mezcla completa

**2.3.1.2 Dosificación del agente coagulante.** La dosificación del coagulante depende de las características fisicoquímicas del agua cruda, requiriendo la adición o no de un acondicionador de pH, el cual debe seleccionarse atendiendo requerimientos de fácil manejo, solubilidad completa y economía, determinadas mediante la realización de pruebas de jarras; dependiendo, principalmente, de las condiciones de turbiedad del agua cruda. La dosis óptima se obtiene cuando para cada muestra de agua cruda con un valor de turbiedad inicial determinado se logran los valores más bajos de turbiedad y aluminio residual en el agua tratada. Además, La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación<sup>36</sup>:

- Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, elevando la turbiedad residual por la escasa formación de los microflóculos.
- Alta cantidad de coagulante conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños a velocidades de sedimentación muy bajas, manteniendo una turbiedad residual elevada.

Además, la reacción que se va a permitir entre el coagulante adicionado con el agua a tratar es adecuada cuando:

- La dosis del coagulante que se adicione sea en forma constante y uniforme en la unidad de mezcla rápida, permitiendo la dispersión y mezcla total del coagulante con el agua.
- El sistema de dosificación debe proporcionar un caudal constante y fácilmente regulable.

---

<sup>35</sup> Ibid., p. 20

<sup>36</sup> SEDAPAL. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN, p. 17[En línea] <[http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)> [Citado el 20 de Marzo de 2017]

Éste proceso, es el tratamiento más eficaz en la eliminación de una gran cantidad de sustancias que generan efectos adversos a la salud humana, mejorando la calidad de agua.

**2.3.1.3 pH óptimo del proceso de coagulación.** El pH es una de los factores de importancia en la tratabilidad del agua potable dentro del proceso de coagulación, afectando la solubilidad de los precipitados que se van formando a causa de la adición del agente coagulante y afectando también el tiempo que se requiere para que se formen los flóculos.

El rango de pH está en función del tipo de coagulante a emplear y la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua a tratar, existiendo un rango óptimo específico en el que la coagulación tiene lugar con mayor rapidez.

Después del proceso de clarificación, el rango de pH establecido según la norma, en el que un coagulante puede estar, se encuentra entre 6.5 a 9.0. De acuerdo a ello, el rango de pH óptimo para la remoción de partículas coloidales está entre 6.5 - 8.0 cuando se emplean sales de aluminio como coagulantes, y entre 5.5 - 8.5 unidades cuando se emplean las sales de hierro, pudiendo tomarse ambos tipos de coagulantes como alternativas para el proceso; estos coagulantes metálicos son muy sensibles al cambio de pH y a la alcalinidad (que actúa como una solución amortiguadora evitando el descenso brusco del pH), ocasionando una clarificación pobre en el agua y solubilización del hierro o del aluminio en la misma cuando no se usan las condiciones adecuadas, generando problemas en el consumidor y con las normatividades vigentes.

#### **2.3.1.4 Fases de la coagulación**

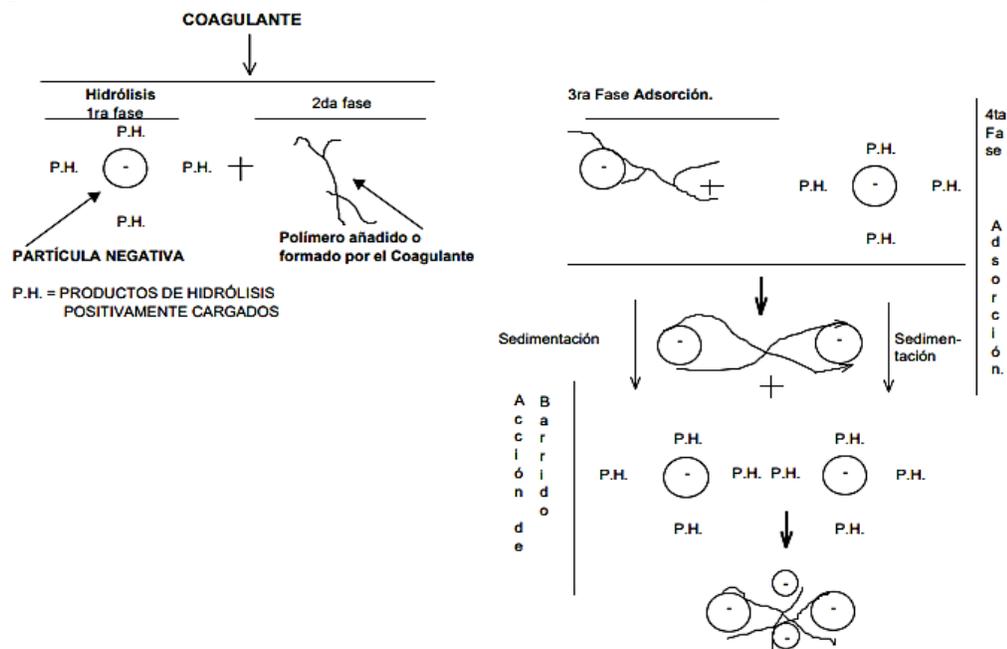
En el proceso de coagulación se desarrollan las siguientes etapas en tiempos cortos (casi instantáneo)<sup>37</sup>:

- Primera fase: Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- Segunda fase: Precipitación y formación de compuesto que se polimerizan.
- Tercera fase: Adsorción de las cadenas poliméricas en la superficie de las partículas coloidales
- Cuarta fase: Adsorción mutua entre los colides
- Quinta fase: Acción de barrido

---

<sup>37</sup> SEDAPAL. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN. Pag. 25

**Figura 10.** Esquema de las fases en el proceso de coagulación



**Fuente.** SEDAPAL. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

**2.3.1.5 Ensayo para las pruebas de coagulación.** Son pruebas a pequeña escala empleadas para determinar el comportamiento que tienen los coagulantes y floculantes en el agua a tratar; la prueba más representativa es el Ensayo de Jarras como elemento de control del proceso de clarificación, cuyo método permite la obtención de agua de buena calidad, separable con facilidad por decantación, formando flóculos al agregar diferentes dosis de coagulante y removiendo así la turbiedad y el color del agua, teniendo en cuenta la normatividad vigente para potabilización en cuanto a los factores importantes dentro del proceso.

Su objetivo final es determinar la dosis de coagulante que produzca la más rápida desestabilización de las partículas coloidales del agua y que forme un floc más pesado y compacto que precipite y quede retenido en los sedimentadores y no se rompa al pasar por el filtro.

Con esta prueba, se logran determinar las variables tanto físicas como químicas que afectan la obtención de agua potable en el proceso de clarificación, factores tales como:

- Selección del coagulante más efectivo.
- Selección del pH óptimo.
- Determinación de la influencia del pH y de la concentración de agentes coagulantes en la etapa de coagulación.
- Fijación de la dosis óptima de coagulante que produzca la más rápida desestabilización de las partículas coloidales.

- Determinación de gradientes de velocidad (Intensidad de agitación) y tiempos de mezcla rápida.

**2.3.2 Proceso de floculación.** Es el proceso físico de mezcla rápida y lenta que consiste en la aglomeración de las partículas coloidales presentes desestabilizadas, siendo necesaria la formación de flóculos, que son las partículas de hidróxidos que se forman al interactuar el coagulante con el agua, para su posterior precipitación. Todos los floculantes y aditivos deben ensayarse primero en el laboratorio, variando el pH, la concentración, la agitación y decidir tanto por el costo como por el efecto floculante.

Es una etapa que se ve favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también aumenta su peso.

Los floculantes son polímeros o polielectrolitos con pesos moleculares muy elevados, moléculas orgánicas solubles en agua formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en cadenas largas.

Para la determinación del tipo de floc obtenido, por observación visual cualitativa se puede emplear el índice de Willcomb (Tabla 4), en el que se observa la forma en que el floc se desarrolla en cada una de las seis (6) jarras, para escoger la jarra que produzca el floc de mayor tamaño y de mayor velocidad de asentamiento, dejando ver el agua más cristalina luego de su sedimentación.

**Tabla 4.** Índice de floculación de Willcomb

N°	Índice de Willcomb
0	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación
2	Visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible
4	Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud
8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina

**Fuente.** ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua, Tomo 1. Editorial Mc Graw Hill - Interamericana, 3ª Edición.

**2.3.3 Proceso de Sedimentación.** Es una operación unitaria que permite la remoción de las partículas en suspensión en el agua por medio de la fuerza de la gravedad para mejorar el proceso de filtración, haciendo que estas partículas se depositen en determinado tiempo de retención. La remoción se permite, al tener partículas con densidades superiores a la del agua, generando mayor posibilidad de sedimentación y precipitación y, obteniendo un fluido clarificado<sup>38</sup>.

<sup>38</sup> MURILLO CASTAÑO, Diana Marcela. Op. Cit., p. 45

## 2.4 MARCO LEGAL

El tratamiento de aguas crudas para su potabilización y calidad final de abastecimiento debe contar con aspectos de normatividad y requisitos legales actuales en el país (Tabla 5), regulados por el Ministerio de Medio Ambiente; con el fin de garantizar la viabilidad y el cumplimiento de los mismos.

**Tabla 5.** Normatividad Colombiana para potabilización de agua

NORMA	OBSERVACIONES
Decreto 1575 del 09 de Mayo de 2007.	Decreto del Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por el cual se establecen el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
Resolución 1096 de Noviembre de 2000	El Ministerio de Desarrollo Económico, adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS-2000 Es la documentación técnico-normativa que se debe cumplir en los diseños, las obras y los procedimientos del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico y sus actividades complementarias que adelanten las Entidades prestadoras de los servicios públicos municipales de acueducto, alcantarillado y aseo, así como los aspectos de calidad y tratabilidad de agua.
	SECCIÓN I: <u>TÍTULO A:</u> Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable Y Saneamiento Básico - Revisión
	SECCIÓN II: Conteniendo los Manuales de Prácticas de Ingeniería para: <u>TÍTULO B:</u> Sistemas de Acueducto <u>TÍTULO C:</u> Sistemas de Potabilización.
Resolución 2115 del 22 de Junio de 2007	<u>CALIDAD DE AGUA POTABLE.</u> Resolución del Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, que señala las características físicas, químicas y microbiológicas, indicando los valores máximos permitidos de cada elemento y/o compuesto; instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua apta para el consumo humano.

De acuerdo a la resolución 2115 del 22 de Junio de 2007<sup>39</sup>, se establece que el agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación:

<sup>39</sup> MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115 de 2007. República de Colombia. [En línea]<<http://www.minproteccion-social.gov.co/VBeContent/NewsDetail.asp?ID=16364&IDCompany=3>> [Citado el 10 de Marzo de 2016].

**Tabla 6.** Características físicas del agua potable

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color Aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable ó no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT)	2

(Tomado de, Resolución 2115 del 2007. República de Colombia)

Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana se señalan en el artículo 6:

**Tabla 7.** Características químicas del agua potable

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable [mg/L]
Carbono Orgánico Total	COT	5,0
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,1
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	10
Fluoruros	F <sup>-</sup>	1,0

(Tomado de, Resolución 2115 del 2007. República de Colombia)

Las características químicas del agua para consumo humano de los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, deben enmarcarse dentro de los valores máximos aceptables que se señalan a continuación en el artículo 5:

**Tabla 8.** Características químicas con efectos adversos en la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable [mg/L]
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN <sup>=</sup>	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,01
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos Totales	THM2	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0,01

(Tomado de, Resolución 2115 del 2007. República de Colombia)

En el artículo 7, se señalan las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos y compuestos químicos que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana se señalan a continuación:

**Tabla 9.** Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable [mg/L]
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	CaCO <sub>3</sub>	200
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	250
Aluminio	Al <sup>+3</sup>	0,2
Dureza Total	CaCO <sub>3</sub>	300
Hierro Total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	M	0,1
Molibdeno	Mo	0,07
Sulfatos	SO <sub>2</sub> <sup>-4</sup>	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO <sub>3</sub> <sup>-4</sup>	0,5

(Tomado de, Resolución 2115 del 2007. República de Colombia)

En el artículo 11 de la resolución, se establecen las características microbiológicas del agua para consumo humano que deben enmarcarse dentro de los siguientes valores máximos aceptables desde el punto de vista microbiológico, establecidos teniendo en cuenta los límites de confianza del 95% y para técnicas con habilidad de detección desde 1 Unidad Formadora de Colonia (UFC) ó 1 microorganismo en 100 cm<sup>3</sup> de muestra:

**Tabla 10.** Características microbiológicas del agua potable

Técnicas utilizadas	Coliformes Totales	Escherichia Coli
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm <sup>3</sup>	0 UFC/100 cm <sup>3</sup>
Enzima Sustrato	< de 1 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>	< de 1 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>
Sustrato Definido	0 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>	0 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>
Presencia – Ausencia	Ausencia en 100 cm <sup>3</sup>	Ausencia en 100 cm <sup>3</sup>

(Tomado de, Resolución 2115 del 2007. República de Colombia)

### 3. PLANTEAMIENTO ALTERNATIVAS DE AGENTES COAGULANTES

Para identificar y seleccionar los insumos a utilizar para la mejora del proceso de coagulación y floculación de la Planta de Tratamiento de la Empresa Aguas de Facatativá EAF SAS ESP, se lleva a cabo una investigación teórica sobre aquellos agentes coagulantes que pueden ser empleados en potabilización de agua, con la finalidad de encontrar los más adecuados para la empresa en términos de calidad y economía al plantear tres (3) alternativas para la experimentación para sustituir el Sulfato de Aluminio tipo b actual.

#### 3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los agentes coagulantes para tratamiento de agua potable existen en dos grandes grupos: los coagulantes polielectrolitos naturales catiónicos que son derivados de semillas, plantas, raíces, flores y frutos que permiten reducir turbidez, microorganismos y ablandar el agua, y los coagulantes metálicos; los cuales, actúan como polímeros ya sea con o sin el contacto con el agua<sup>40</sup>.

**Tabla 11.** Identificación de los diferentes coagulantes para tratamiento de agua

COAGULANTES					
COAGULANTES METÁLICOS				COAGULANTES ALTERNATIVOS	
SALES DE ALUMINIO		SALES DE HIERRO		POLIELECTROLITOS CATIÓNICOS	
Sulfato de Aluminio: Sal simple	$Al_2(SO_4)_3$	Sulfato Férrico: Sal simple	$Fe_2(SO_4)_3$	Alginato de Sodio	Se obtiene de las algas marinas
Cloruro de Aluminio: Sal simple	$AlCl_3$	Sulfato Ferroso: Sal simple	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Nopal	Se obtiene de las hojas de la planta
Aluminato de Sodio: Sal simple	$Na_2Al_2O_4$	Cloruro Férrico: Sal simple	$FeCl_3$	Almidón	Maíz, Yuca, Papa, Trigo
Clorhidrato de Aluminio: Sal polimerizada	$Al_2Cl(OH)_5$	Sulfato Poliférrico: Sal polimerizada	$[Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-n/2}]$	Gelatina común	Se obtiene de residuos de animales y huesos
Policloruro de Aluminio: Sal polimerizada	$Al_n(OH)_m Cl_{3n-m}$	Sales de Hierro con polímeros orgánicos		Celulosa	Se obtiene de la corteza de los árboles
Sulfato de Cloruro de Polialuminio: Sal polimerizada	$Al_n(OH)_m(SO_4)_p Cl_{3n-m-2p}$			Algarrobo	Se obtiene de la corteza de los árboles

<sup>40</sup> RESTREPO OSORNO, Herán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Proyecto de Grado (ingeniero de minas), Medellín. Universidad Nacional de Colombia, 2009, p. 7-9, 12 [en línea] <[http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239\\_2009.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239_2009.pdf)>. Citado el 27 de Febrero de 2017]

### 3.2 SELECCIÓN DE INSUMOS COAGULANTES

Para la selección de los coagulantes más adecuados para el tratamiento con el fin de realizar su evaluación experimental teniendo en cuenta el insumo actual Sulfato de Aluminio tipo B líquido, se desarrolla un análisis de los diferentes insumos identificados en la Tabla 11, obtenido de revisiones bibliográficas, describiendo los tipos de agentes coagulantes más empleados en tratamiento de agua potable para desestabilización y producción de floc junto a ventajas y desventajas (Tabla 12).

**Tabla 12.** Características de los coagulantes más empleados en el tratamiento de potabilización de agua

COAGULANTE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SULFATO FÉRRICO	<p>Efectivos en la remoción de sustancias orgánicas y bacterias.</p> <p>Usado para la remoción de Hierro y Manganeseo.</p> <p>Funciona de forma estable en un amplio intervalo de pH.</p> <p>Producen flóculos grandes y densos que decantan rápidamente.</p> <p>Es eficiente sin un ayudante de floculación.</p> <p>Coagulante de bajo costo.</p> <p>Alta velocidad de reacción.</p> <p>No hay problemas con el Aluminio residual.</p> <p>Fácil y seguro de manejar y almacenar.</p> <p>Se puede encontrar tanto líquido como sólido.</p>	<p>Puede producir problemas de coloración.</p> <p>Pueden causar precipitación en el agua tratada.</p> <p>La dosis de Hierro residual es alta.</p> <p>Si está en presentación sólida necesita una unidad de mezcla para su dilución.</p> <p>Es poco corrosivo para manejar y almacenar.</p>
SULFATO FERROSO	<p>Se utiliza en residuos altamente alcalinos.</p> <p>Es de fácil absorción.</p> <p>En presentación sólido y líquido.</p> <p>Para clarificación de aguas muy turbias.</p> <p>Es una fuente de hierro económica.</p>	<p>Se requiere añadir Cal o Cloro para asegurar la coagulación.</p> <p>Debe existir la oxidación del ion ferroso a férrico.</p>
CLORURO FÉRRICO	<p>Elimina fosfatos, sulfuros y metales pesados.</p> <p>Por ser un producto líquido es de muy fácil aplicación.</p> <p>De bajo costo respecto al Policloruro de aluminio.</p> <p>Genera alta velocidad de reacción.</p> <p>El rango bajo de pH 3.5 – 7.0 ayuda en la remoción de sustancias orgánicas y microorganismos.</p> <p>El rango alto de pH 8.0-9.5 es usado para la remoción de Hierro y Manganeseo.</p> <p>Eficiente sin ayudante de floculación</p>	<p>Puede presentar problemas de coloración en las aguas.</p> <p>Problemas en el proceso pueden causar precipitación en el agua tratada.</p> <p>Muy corrosivo para manejar y almacenar.</p>
SULFATO POLIFÉRRICO	<p>Forma flóculos grandes y de rápida sedimentación.</p> <p>No causa contaminación por hierro.</p> <p>Buen efecto en la decoloración capturando microorganismos y reduciendo DBO, DQO y metales pesados.</p> <p>Produce baja corrosión.</p> <p>Eficiente para aguas crudas con alta turbidez.</p> <p>Se requieren bajas dosis a bajos costos de tratamiento.</p>	<p>Puede presentar problemas de coloración en las aguas.</p> <p>Problemas en el proceso pueden causar precipitación en el agua tratada.</p> <p>Muy corrosivo para manejar y almacenar.</p> <p>Requiere acondicionadores de pH.</p>

**Tabla 12. (Continuación)**

<b>COAGULANTE</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>SALES DE HIERRO CON POLÍMEROS ORGÁNICOS</b>	<p>Requieren pequeñas dosis Actúan como ayudantes de coagulación. Mejorando la formación de flóculos. Se obtienen mejores características en la sedimentación.</p>	<p>Puede presentar problemas de coloración en las aguas. Problemas en el proceso pueden causar precipitación en el agua tratada.</p>
<b>SULFATO DE ALUMINIO</b>	<p>De fácil obtención por su bajo costo y facilidad de producción. Efectivo para producir coagulación de vertidos con compuestos carbonatos. Es una sal metálica, que reacciona formando flóculos de hidróxidos de aluminio al contacto con la alcalinidad de las aguas a tratar, facilitando su limpieza. Reducción de coloides orgánicos y fósforo. En presentación sólido y líquido, y en diferentes grados de pureza.</p>	<p>Rango de pH muy limitado Requiere control de pH. La remoción de material orgánica es limitada. Genera problemas con agua de alta turbiedad y alto contenido de Aluminio residual. Requiere ayudante de floculación.</p>
<b>ALUMINATO DE SODIO</b>	<p>Coagulante y acondicionador de pH en el tratamiento de agua. Se reduce el uso de correctores de pH como la cal, soda cáustica o carbonato de sodio. Elimina color a pH bajo. Permite un tratamiento con pH un poco más altos que el sulfato de aluminio.</p>	<p>Poco empleado en tratamiento.</p>
<b>POLICLORURO DE ALUMINIO (Polihidroclicloruro de aluminio)</b>	<p>Se disminuye el uso de modificadores el pH. Mayor rapidez en la formación de flóculos. Genera menor residual de aluminio. Mejora la remoción de color y turbidez. Mejora la eficiencia de la filtración. Trabaja en un amplio rango de pH. No modifica el valor de pH del afluente. Menor costo de operación. Menor consumo de polímero y menor dosis de Aluminio.</p>	<p>Precio más alto por kg. Un pH demasiado alto para la coagulación puede bajar la remoción de la materia orgánica y las partículas coloidales.</p>
<b>CLORHIDRÓXIDO DE ALUMINIO</b>	<p>Remueve sólidos suspendidos Forma flóculos de mayor tamaño de aglomeración. Sirve como reemplazo del Sulfato de aluminio y de otras sales inorgánicas convencionales.</p>	<p>Requiere control de pH y agitación de la mezcla. Menos empleado en potabilización.</p>
<b>POLIELECTROLITOS NATURALES</b>	<p>Baja toxicidad. Polímero de alto peso molecular conducen a la formación de flóculos más grandes. Reduce la cantidad de lodos. Disminuye costos en el tratamiento. Usos como ayudantes coagulación. Incrementa la velocidad de sedimentación de los flóculos. Son biodegradables.</p>	<p>Se utilizan a pH bajos Alta viscosidad que aumenta la agitación. Pueden reaccionar con otras sustancias químicas peligrosas para la salud. Los polímeros agregan carga orgánica al agua que puede no ser retirada.</p>

**Fuente.** XXII CONGRESO DE CENTROAMERICA Y PANAMA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL “SUPERACIÓN SANITARIA Y AMBIENTAL: EL RETO” AIDIS: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Según el registro de datos entregados por la empresa EAF SAS ESP para los últimos 6 meses del año 2016 (Julio a Diciembre), el pH promedio mensual de las aguas crudas que llegan a la planta de tratamiento es de 6,72; éste parámetro es de gran influencia, debido a, que permite determinar la alcalinidad del agua que se recibe en la planta. Teniendo en cuenta este factor, en la Tabla 13 se muestran los rangos de pH en los que cada coagulante es efectivo junto a la coincidencia del posible empleo en el tipo de agua cruda respecto a la caracterización inicial realizada, permitiendo determinar el insumo más adecuado que permita una buena clarificación y disminución de agentes químicos que afectan la salud humana.

**Tabla 13.** pH efectivo de los agentes coagulantes

COAGULANTE	INTERVALO DE pH EFECTIVO	COINCIDENCIA CON EL AGUA CRUDA
Sulfato Férrico	4 a 11	Si
Sulfato Ferroso	>8.5	No
Cloruro Férrico	3.5 - 7.0 y 8.0 - 9.5	Si
Sulfato Poliférrico	6 a 9	Si
Sales de hierro con polímeros orgánicos	5 a 7	No
Sulfato de Aluminio	6 a 8	Si
Aluminato de Sodio	3 a 6	No
Policloruro de Aluminio	3 a 12	Si
Polielectrolitos Naturales	3 a 5	No

**Fuente.** XXII CONGRESO DE CENTROAMERICA Y PANAMA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL “SUPERACIÓN SANITARIA Y AMBIENTAL: EL RETO” AIDIS: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

**3.2.1 Matriz de Selección.** Con base a la información presentada en las Tablas 12, 13, 14 y 15, se realiza una matriz de selección que permita escoger las 3 alternativas de coagulantes sustituyentes al Sulfato de Aluminio tipo B<sup>41</sup> empleado actualmente, para realizar su posterior desarrollo experimental. Para la determinación del coagulante adecuado en la matriz de selección, se tienen en cuenta algunos factores como la turbiedad del agua causada por partículas de materias inorgánicas, el color causado por la formación de partículas de materias orgánicas e hidróxidos de metal, el pH como función del tipo de coagulante a usar y la naturaleza del agua a tratar y la densidad dificultando así la sedimentación del floc<sup>42</sup>.

En la matriz, se toma en cuenta aquellas características más importantes en la determinación del coagulante que mejor se adapte a la caracterización de este tipo de agua cruda. Al manejar sales de aluminio, se debe trabajar con pH que permita

<sup>41</sup> El Sulfato de aluminio tipo B líquido es el coagulante empleado actualmente en la planta de tratamiento de EAF por su mayor implementación en la industria y su bajo costo.

<sup>42</sup> MOLINA ORTEGA, Julio y MANCERA MARTÍNEZ, Orlando. Centro Administrativo Documental C.A.D. E.A.F. [En línea] <<http://acueductofacatativa.com/archivos/menu%20acueducto/historia/historia.pdf>>

la hidrólisis de la sal y la generación de la coagulación (6.5 a 8.0), con el fin de favorecer la formación de los hidróxidos de aluminio y evitar formaciones de compuestos aluminatos ya sean de sales ácidas o básicas que pueden llegar a solubilizarse en el agua, modificando la etapa de filtración.

Con las sales de hierro, que permiten una generación de flóculos más densos y con mayor velocidad de precipitación respecto a las sales de aluminio, los rangos de pH ya sea bajo o alto, permitirá la remoción de compuestos orgánicos y metales que afectan la salud humana, siendo más efectivas en la remoción de las partículas coloidales, que son las que generan color y turbiedad en el agua. De acuerdo a éste tipo de sales, la eficiencia es mayor en las sales férricas respecto a las ferrosas y se produce una fracción de coloración en el agua tratada<sup>43</sup>. Y, para los coagulantes naturales, éstos son mayormente empleados como ayudantes en la coagulación porque permiten reducir la turbiedad y formar flocs más densos y aglomerados en mayor cantidad, decantándose con mayor rapidez al interactuar con las sales de aluminio y de hierro.

Es necesario tener en cuenta que la dosis aplicada es de gran influencia, porque si ésta se excede o se reduce en comparación a la dosis óptima requerida, va a favorecer la formación de otros compuestos indeseables en alto contenido, como por ejemplo, contenido de hierro, de aluminio, de manganeso, que son perjudiciales y generan efectos adversos a la salud de la población. El intervalo de pH tiene una dependencia directa con la dosis del coagulante a aplicar, teniéndose en cuenta el pH efectivo (Tabla 13) para reducir la cantidad del insumo y mejorar los resultados en el proceso por la generación completa de la hidrólisis del coagulante<sup>44</sup>.

**Tabla 14.** Tipo de coagulación y parámetros de acuerdo al tipo de agua

TIPO DE AGUA	TIPO DE COAGULACIÓN	REQUERIMIENTO	SALES DE ALUMINIO	SALES DE HIERRO
Alta Turbiedad (>100UNT) Alta Alcalinidad (>250mg CaCO <sub>3</sub> /L) (Más fácil de coagular)	Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos. (pH>7)	Dosis de coagulante incrementa con la concentración de las partículas	Efectivo para pH de 5 a 7. No requiere agregar alcalinidad ni ayudante de coagulación.	Efectivo para pH de 6 a 7. No requiere agregar alcalinidad ni ayudante de coagulación.
Alta turbiedad (>100UNT) Baja Alcalinidad (<50mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Adsorción de polímeros metálicos. (pH: 4 a 7)	Dosis de coagulantes incrementa con concentración de partículas. Adición de alcalinidad.	Efectivo para pH de 5 a 7. Puede requerir adición de alcalinidad si el pH disminuye durante el tratamiento.	

<sup>43</sup> BUSTOS MONTAÑO, Leidy Viviana y SILVA VARGAS, Yuly Daniela. Propuesta de mejoramiento de la línea de insumos del proceso de tratamiento de agua potable en la planta regional de la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Zipaquirá, Bogotá D.C., 2016. [Consulado el 20 de Marzo de 2017]

<sup>44</sup> BUSTOS MONTAÑO Y SILVA VARGAS. Op.,cit. 52 - 53

**Tabla 14.** (Continuación)

TIPO DE AGUA	TIPO DE COAGULACIÓN	REQUERIMIENTO	SALES DE ALUMINIO	SALES DE HIERRO
Baja turbiedad (<10UNT) Alta alcalinidad (>250mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Formación de precipitado. Floc de barrido	Dosis de coagulantes aumenta con la baja concentración de partículas. Adición de partículas.	Efectivo en dosis altas. Puede requerir ayuda de coagulación.	Efectivo en dosis bajas. Debe agregarse ayuda de coagulación para hacer el floc más pesado.
1Baja turbiedad (<10UNT) Baja alcalinidad (<50mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Formación de precipitado. Floc de barrido	Dosis de coagulantes aumenta con la baja concentración de partículas. Adición de alcalinidad o partículas.	Efectivo gracias a floc de barrido. Debe agregarse alcalinidad o arcilla.	

**Fuente.** Teoría y práctica de la purificación del agua. Jorge Arboleda Valencia.

De acuerdo a la caracterización, se buscan aquellos coagulantes que sean adecuados manejar con el pH promedio de entrada del agua cruda de 6,72. Para éste valor, utilizando la Tabla 13 se evidencia los rangos en los que se pueden emplear, siendo adecuados el Sulfato férrico, Cloruro férrico, Policloruro de Aluminio y Polielectrolitos naturales. También, se tienen en cuenta los parámetros de turbiedad y alcalinidad especificados en la Tabla 14 de acuerdo al tipo de agua que se emplee. Basándose en los datos entregados por la empresa en el periodo mensual comprendido durante el año 2016, se establece un promedio de las mediciones de los aspectos de color, turbiedad y alcalinidad de las aguas crudas superficiales de 31.18 UPC, 4.03 UNT y 13.993 mg/L respectivamente. Con éstos datos y tomando las características de cada tipo de agua de la Tabla 14, se considera aguas superficiales de baja turbiedad y de baja alcalinidad, en las que tanto las sales de aluminio como las sales de hierro reaccionan similarmente, siendo aptos los dos tipos de sales.

Se busca también, seleccionar coagulantes que se encuentren industrialmente en presentación líquida para evitar que la empresa incurra en un aumento en los costos de operación al tener que agregar una nueva etapa antes del proceso de coagulación en el que se permita disolver el coagulante químico que se encuentra en su estado líquido.

En la construcción de la matriz de la Tabla 17, para la selección final se tiene en cuenta la puntuación de cada coagulante de acuerdo a cada una de las características especificadas cuya relación en la tabla 18 se da de acuerdo a la comparación con el funcionamiento del Sulfato de Aluminio en el agua durante el proceso de clarificación, determinada de la siguiente manera:

**Tabla 15.** Puntaje y calificación para la selección final de las alternativas

<b>PUNTAJE</b>	<b>COMPORTAMIENTO</b>
1	No cumple
3	Cumplimiento Parcial
5	Cumple totalmente

Siendo 1 la menor puntuación al no cumplir la característica especificada y 5 la mayor puntuación al cumplir en totalidad con cada una de las características, presentadas en la Tabla 16. La selección final, será aquella cuya suma total sea igual o superior al coagulante Sulfato de Aluminio actual.

**Tabla 16.** Factor ponderado tenido en cuenta para la prueba de jarras

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>FACTOR DE PONDERACIÓN (%)</b>
Amplio uso en clarificación de aguas de baja turbiedad	5
Funcionamiento estable en un amplio rango de pH	7
Baja/nula generación de corrosión en tuberías	6
Producción de flóculos grandes y densos de fácil decantación	8
Efectivo en la desestabilización de partículas suspendidas	12
Bajos costos de materia prima respecto al Sulfato de Aluminio	12
Disponibilidad de obtención en el mercado regional/nacional	5
Generación baja de coloración después del proceso de clarificación	6
Presentación en forma líquida para su fácil aplicación	3
Eliminación de agentes adversos a la salud humana	9
Generación baja/nula de aluminio e hierro residual	9
No requiere ayudante de coagulación y/o floculación	5
No requiere uso de correctores de pH	5
Mayor velocidad de sedimentación por la formación de flocs de mayor peso	8
<b>TOTAL</b>	<b>100 %</b>

Además, en la Tabla 16 se establece un factor de ponderación teniendo en cuenta aquellas características de acuerdo al peso que generan en el proceso, en la que características como los bajos costos y la eficiencia como coagulante obtienen mayor peso para la selección con el fin de generar mayores beneficios económicos y operativos para la empresa.

De acuerdo a la multiplicación entre la puntuación especificada en la Tabla 15 para cada uno de los coagulantes de acuerdo a cada característica estipulada en comparación con el sulfato de aluminio tipo b actual y al factor ponderado de la Tabla 16 para las mismas, se establece para cada uno de los coagulantes un puntaje, obteniendo:

**Tabla 17.** Matriz de selección de los agentes químicos de acuerdo a la caracterización del agua

<b>COAGULANTE</b>	Sulfato Aluminio	Cloruro Aluminio	Aluminato Sodio	Clorhidrato Aluminio	Policloruro Aluminio	Sulfato Férrico	Sulfato Ferroso	Cloruro Férrico	Sulfato Poliférrico	Sales de Hierro con polímeros	Alginato Sodio	Nopal	Almidón	Gelatina	Celulosa	Algarrobo
<b>CARACTERÍSTICA</b>	Sulfato Aluminio	Cloruro Aluminio	Aluminato Sodio	Clorhidrato Aluminio	Policloruro Aluminio	Sulfato Férrico	Sulfato Ferroso	Cloruro Férrico	Sulfato Poliférrico	Sales de Hierro con polímeros	Alginato Sodio	Nopal	Almidón	Gelatina	Celulosa	Algarrobo
Amplio uso en clarificación de aguas de baja turbiedad	0,25	0,05	0,05	0,05	0,25	0,25	0,15	0,25	0,05	0,05	0,15	0,15	0,25	0,15	0,15	0,15
Funcionamiento estable en un amplio rango de pH	0,07	0,07	0,07	0,07	0,35	0,35	0,21	0,35	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,21	0,07
Baja/nula generación de corrosión en tuberías	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,18	0,18	0,06	0,06	0,06	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Producción de flóculos grandes y densos de fácil decantación	0,4	0,24	0,24	0,24	0,4	0,4	0,24	0,4	0,24	0,24	0,24	0,24	0,4	0,24	0,4	0,24
Efectivo en la desestabilización de partículas suspendidas	0,6	0,36	0,36	0,36	0,6	0,6	0,6	0,6	0,36	0,36	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Bajos costos de materia prima respecto al Sulfato de Aluminio	0,6	0,36	0,36	0,36	0,36	0,6	0,36	0,6	0,36	0,36	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Disponibilidad de obtención en el mercado regional/nacional	0,25	0,15	0,15	0,15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,15	0,05	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Generación baja de coloración después del proceso de clarificación	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,18	0,18	0,18	0,06	0,06	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Presentación en forma líquida para su fácil aplicación	0,15	0,15	0,15	0,09	0,15	0,15	0,09	0,15	0,09	0,09	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Eliminación de agentes adversos a la salud humana	0,45	0,27	0,27	0,27	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Generación baja/nula de aluminio e hierro residual	0,27	0,27	0,27	0,27	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,27	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
No requiere ayudante de coagulación y/o floculación	0,25	0,15	0,15	0,15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,15	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
No requiere uso de correctores de pH	0,25	0,15	0,15	0,15	0,25	0,25	0,15	0,25	0,15	0,15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Mayor velocidad de sedimentación por la formación de flocs de mayor peso	0,4	0,24	0,24	0,24	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
<b>TOTAL PUNTUACIÓN</b>	<b>4,54</b>	<b>3,06</b>	<b>3,06</b>	<b>3,0</b>	<b>4,76</b>	<b>4,76</b>	<b>3,96</b>	<b>4,70</b>	<b>3,14</b>	<b>2,42</b>	<b>3,32</b>	<b>3,32</b>	<b>3,58</b>	<b>3,32</b>	<b>3,62</b>	<b>3,32</b>

Aunque se tomaron en cuenta los polielectrolitos naturales, no se seleccionó ninguno de ellos para la experimentación, debido a que son empleados en gran medida como ayudantes de coagulación, por lo que sería necesario utilizar además de éste un coagulante para permitir la desestabilización satisfactoria, la floculación y posterior asentamiento de las partículas coloidales, aumentando los costos en las materias primas para la realización efectiva de las etapas involucradas en la clarificación de las aguas crudas superficiales.

Los resultados arrojados de las mayores puntuaciones de acuerdo a los 3 agentes coagulantes que se adaptan mejor para la caracterización del afluente respecto al Sulfato de Aluminio son el Policloruro de Aluminio, el Sulfato Férrico y el Cloruro Férrico, los cuáles pueden trabajar en los rangos de pH óptimos sin problemas y en aguas de bajas turbiedades y de bajas alcalinidades como en éste tipo de aguas, pueden permitir una mayor velocidad de formación de los flóculos, la disminución en la coloración y en el uso de estabilizadores y correctores de pH, el aumento de la eficiencia de los mismos, y favorecer la eliminación de aquellos químicos que afectan la salud, manteniéndose la calidad del agua tratada a entregar y estando siempre por debajo de los límites permisibles en la normatividad colombiana.

Ya teniendo establecidas las alternativas para realizar la selección por medio de un desarrollo experimental con pruebas de jarras, se obtienen los coagulantes para suministro por parte de la empresa Productos Químicos Panamericanos (P.Q.P), con el fin de observar la factibilidad de reemplazar los insumos actualmente utilizados por la empresa EAF SAS ESP; si no es posible, la empresa EAF SAS ESP continuaría con el manejo de los insumos actuales.

**Tabla 18.** Características del Sulfato de Aluminio tipo b líquido en relación a su implementación en tratamiento de aguas potables.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>SULFATO DE ALUMINIO</b>
Costos	\$950
Remoción	>65%
Trabajo en baja turbiedad	Efectivo solo para flóculos de barrido, pero la dosis alta destruye la alcalinidad.
Rango de pH	6 a 8
Causante de Corrosión	40%
Generación de aluminio residual	SI
Presentación en forma líquida	SI
Corrector de pH	SI, para aumentar la solubilidad y el pH en el agua cruda
Ayudante de coagulación/floculación	NO
Velocidad de sedimentación	>70%

## 4. SELECCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA EN LAS ALTERNATIVAS

Para realizar la selección de las dosis de insumos óptimas en el proceso de clarificación, se realizan pruebas experimentales a nivel laboratorio utilizando equipo de jarras que permite modelar a pequeña escala el proceso de clarificación en la planta de tratamiento de agua potable EAF SAS ESP. Para ello, se tiene en cuenta las características principales para implementar las alternativas, como las dosificaciones y las disoluciones en las mismas en las que permite generar una buena coagulación.

### 4.1 METODOLOGÍA PARA LA EXPERIMENTACIÓN

La metodología para realizar dicha experimentación a nivel laboratorio enfatizada en aguas superficiales, tuvo en cuenta las cantidades de químicos a agregar, los parámetros de medición requeridos en el ensayo de jarras y la información histórica sobre el Sulfato de Aluminio tipo b líquido que emplean actualmente para realizar la comparación de acuerdo a las dosis utilizadas y la remoción de los parámetros influyentes en el proceso.

**4.1.1 Preparación de coagulantes.** Para la selección de la alternativa de coagulante más factible, se realizan las pruebas de jarras en la que la solución del coagulante está determinada al agregar agua destilada a 10 g de coagulante hasta completar un volumen de 100 ml, obteniendo una solución del 10% m/v que se puede conservar como solución patrón hasta por tres meses.

El ensayo de jarras se hace diluyendo 10 ml de la solución patrón hasta completar 100 ml con agua destilada, quedando una solución al 1% v/v que no se puede conservar por más de 24 horas, porque puede hidrolizarse y con ello perder buena parte de la capacidad para desestabilizar partículas. En la planta de tratamiento, actualmente se utiliza solución al 1% v/v, empleada también para los ensayos de cada alternativa con el fin de obtener resultados comparativos con el coagulante actual.

Teniendo en cuenta que, para los cálculos posteriores, se tiene en cuenta que se va a emplear el coagulante en forma diluida durante las pruebas de jarras, la dosis tomada para inyectar a cada una de las jeringas, se determina en relación al coagulante comercial:

$$Dosis \left[ \frac{mg}{L} \right] * Volumen \ de \ Agua \ [L] * 0,1 \left[ \frac{mL}{mg} \right] = Dosis \ [mL] \ a \ inyectar$$

Obteniendo con ello la dosis exacta empleada en los ensayos de jarras teniendo en cuenta la concentración inicial comercial para cada alternativa.

Cuando se hace necesario la preparación de un ácido o una base para modificar su alcalinidad y su pH, se emplea cal, que permite aumentar la alcalinidad, estabilizar el pH para evitar caídas bruscas de éste y la posibilidad de reaccionar con los iones del sulfato de aluminio hidratado que actúan como ácidos para formar hidróxidos que logran precipitarse; en este caso, en el que hay una baja alcalinidad, se realiza una suspensión de cal agregando agua destilada a 10 g de ese compuesto alcalino (CaO), hasta completar un volumen de 1000 ml, y evitando su contacto con el aire para que no forme carbonatos que pueden precipitarse.

▪ **Sulfato Férrico líquido (10%v/v)**

1. Pesar 10 g de Sulfato Férrico (líquido).
2. Tomar la densidad del Sulfato Férrico para determinar el volumen en ml de Sulfato correspondiente a 10g.  $\rho = 1,51 \text{ g/ml}$  (Ver Anexo G)

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow V = \frac{10 \text{ g}}{1,51 \text{ g/ml}} \rightarrow V = 6,62 \text{ ml}$$

Donde,

$\rho =$  densidad del compuesto

$V =$  volumen del compuesto a emplear en el ensayo de jarras

$m =$  masa inicial del compuesto

3. Disolver los 6,62 ml calculado de Sulfato Férrico en agua destilada hasta completar un volumen de 100 ml
4. Agitar y dejar reposar 5 minutos antes de utilizar.

▪ **Policloruro de Aluminio líquido (10%v/v)**

1. Pesar 10g del Policloruro de Aluminio (PAC)
2. Tomar la densidad del Policloruro de Aluminio para determinar el volumen en ml de Policloruro correspondiente a 10g.  $\rho^{45} = 1,20 \text{ g/ml}$  (Ver Anexo G)

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow V = \frac{10 \text{ g}}{1,20 \text{ g/ml}} \rightarrow V = 8,33 \text{ ml}$$

Donde,

$\rho =$  densidad del compuesto

$V =$  volumen del compuesto a emplear en el ensayo de jarras

$m =$  masa inicial del compuesto

---

<sup>45</sup>  $\rho$ , es la densidad del compuesto que relaciona su masa con el volumen

3. Disolver los 8,33 ml calculado de Policloruro de Aluminio en agua destilada hasta completar un volumen de 100ml
4. Agitar y dejar reposar 5 minutos antes de utilizar.

▪ **Cloruro Férrico (10%v/v)**

1. Pesar 10g de Cloruro Férrico (líquido).
2. Tomar la densidad del Cloruro Férrico para determinar el volumen en ml de Cloruro Férrico correspondiente a 10g.  $\rho = 1,45 \text{ g/ml}$  (Ver Anexo G)

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow V = \frac{10 \text{ g}}{1.45 \text{ g/ml}} \rightarrow V = 6,90 \text{ ml}$$

Donde,

$\rho$  = densidad del compuesto

$V$  = volumen del compuesto a emplear en el ensayo de jarras

$m$  = masa inicial del compuesto

3. Disolver los 6,90 ml calculado de Cloruro Férrico en agua destilada hasta completar un volumen de 100ml
4. Agitar y dejar reposar 5 minutos antes de utilizar.

**Soluciones madre al 10%**

Para cada uno de los coagulantes, se utiliza un balón aforado diferente de 100 ml al cual se va a agregar el volumen de agente coagulante calculado cuando se tiene en cuenta la densidad para cada uno de los compuestos que son: 1,51 g/ml para el Sulfato Férrico, 1,20 g/ml para el Policloruro de Aluminio y 1,45 g/ml para el Cloruro Férrico. Se toman 6,60 ml, 8,30 ml y 6,90 ml para cada uno respectivamente, y se procede a disolver con agua filtrada hasta el aforo agitando vigorosamente.

**Soluciones al 1.0%**

Para cada una de las soluciones madre realizadas al 10%, se toma una alícuota de 10 ml y se realiza aforo hasta completar 100 ml con agua destilada, se agita vigorosamente y se deja reposar durante 5 minutos antes de utilizarla. Esta solución debe prepararse diariamente porque puede permitir la formación de otros compuestos.

**4.1.2 Prueba de jarras.** Para la selección final de la mejor alternativa del agente coagulante, se realizan pruebas de jarras que es la técnica más empleada en la determinación de las dosis óptimas de los químicos que se requieren utilizar, teniendo en cuenta los parámetros físico-químicos más influyentes en la caracterización del afluente que son: pH, Turbiedad, Color, Hierro y/o Aluminio

residual, para comparar las mediciones respecto a la normatividad presentada en la Resolución 2115 de 2007.

En esta prueba se pretende simular el proceso de clarificación para verificar el desempeño de un producto químico coagulante en la planta de tratamiento, para determinar las características físicas y químicas del agua cruda ingresada. El ensayo de jarras comprende tres procesos diferenciales<sup>46</sup>:

**a) Mezcla rápida.** Mezcla rápidamente el coagulante químico añadido a cada una de las jarras a diferentes dosificaciones para la desestabilización de las partículas coloides, empleando agitadores automáticos a velocidad de 100 rpm durante un tiempo de un (1) minuto, condiciones determinadas en la construcción de la planta de tratamiento.

**b) Mezcla lenta.** Al desestabilizarse las partículas suspendidas en el agua, se inicia con esta mezcla lenta para promover la colisión entre estas partículas y formar flóculos más densos y de mayor tamaño que logren precipitarse. En ésta parte, la velocidad de agitación es de vital importancia porque si se encuentra a una elevada velocidad, los flóculos formados se pueden empezar a romper y si se encuentra a una baja velocidad, la formación de los flóculos se reduce disminuyendo la eficiencia en las colisiones entre las partículas. Al tener tres (3) floculadores en la planta de tratamiento, las velocidades estimadas son de 40, 30 y 20 rpm durante un lapso de tiempo 15 minutos para el primer floculador con un gradiente de velocidad de  $40\text{ s}^{-1}$ , 7.5 minutos para el segundo floculador con un gradiente de  $30\text{ s}^{-1}$  y 7.5 minutos para el tercer floculador de  $20\text{ s}^{-1}$ .

**c) Sedimentación.** Al finalizar el tiempo de agitación, se dejan las jarras durante 20 minutos para obtener la precipitación de los flóculos de mayor peso formados en la mezcla lenta.

Se dispone de tres coagulantes químicos diferentes para establecer entre ellos cuál genera la mayor eficiencia en el tipo de agua cruda que llega a la planta de tratamiento. El propósito de ésta prueba realizada a nivel laboratorio, es comparar efectividades respecto a las dosis de coagulante y el comportamiento que tienen en el agua para mejorar la calidad en los procesos de coagulación, floculación y posterior sedimentación, simulados en la prueba a pequeña escala, tomando como base ciertos parámetros especificados en la Tabla 18 que se manejan en la planta de potabilización para su operación. Además, tiene en cuenta la determinación de ciertas variables y aspectos fisicoquímicos del proceso como son: la selección del coagulante, pH óptimo, gradientes y tiempos de mezcla rápida y lenta y la eficiencia de remoción.

---

<sup>46</sup> Empresa Aguas de Facatativá. EAF S.A.S. ESP.

**Tabla 19.** Parámetros requeridos para los ensayos de jarras

PARÁMETRO	VALOR ESTABLECIDO
Velocidad de agitación en la mezcla rápida (Coagulación)	100 rpm
Tiempo de mezcla rápida	1 minuto
Velocidad de agitación de la mezcla lenta (Floculación-Floculador 1)	40 rpm
Tiempo de mezcla lenta (Floculación-Floculador 1)	5 minutos
Velocidad de agitación de la mezcla lenta (Floculación-Floculador 2)	30 rpm
Tiempo de mezcla lenta (Floculación-Floculador 2)	7,5 minutos
Velocidad de agitación de la mezcla lenta (Floculación-Floculador 3)	20 rpm
Tiempo de mezcla lenta (Floculación-Floculador 3)	7,5 minutos
Tiempo de sedimentación	20 minutos
Concentración solución de coagulante	1% m/v

**Fuente.** Empresa EAF SAS ESP

Para las concentraciones empleadas en cada una de las jarras, se toma primero en límites inferiores a las dosis agregadas actualmente del Sulfato de Aluminio tipo B líquido, porque se busca reducir la cantidad de coagulante para permitir menores costos a la empresa, manteniéndose dentro de los estándares y límites permitidos en Colombia. Respecto a esto, se utilizan dosis menores a 24 mg/l del sulfato de aluminio para los ensayos a realizar con la solución al 1.0% para cada coagulante. Esta disolución se toma, debido a que en la empresa trabajan en este porcentaje, y por motivo de comparación, se toma la misma representación para los ensayos de jarras a realizar.

Para la realización de esta prueba, se utilizó el equipo de Ensayo de Jarras del laboratorio de aguas de la empresa EAF SAS ESP, como se muestra en la Figura 3, que consta de 6 recipientes con sus paletas de agitación automática, con velocidades y tiempos de agitación variables, acondicionando de acuerdo al intervalo de trabajo requerido.

**4.1.2.1 Procedimiento de la prueba de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante.** El procedimiento que sigue el ensayo de jarras para encontrar las dosis óptimas de los coagulantes es el siguiente:

1. Determinar los parámetros de pH, turbiedad, alcalinidad y color del agua cruda.
2. Preparar seis vasos de precipitados con capacidad de 3 litros [lts] de volumen introduciendo en cada uno 2000 ml de la muestra de agua a tratar tomada en la planta.
3. Establecer el tiempo total de agitación (21 minutos) en el contador del ensayo de jarras y poner en marcha los agitadores a una velocidad inicial de 100 rpm.
4. Inyectar a cada vaso la disolución madre preparada anteriormente para el coagulante a emplear en dosis progresivas, usando jeringas para inyectar el

contenido de 2 a 10 ml inicial para la primera jarra. (Se emplean jeringas para evitar las imprecisiones en las dosificaciones ocasionadas por las pipetas graduadas).

5. Iniciar inmediatamente con el conteo de la agitación a 100 rpm por un minuto, tiempo establecido para que ocurra la desestabilización de las partículas (Mezcla rápida).
6. Disminuir la velocidad de rotación de los agitadores a 40 rpm durante 5 minutos (Inicio mezcla lenta), y observar la formación de los flóculos para determinar el índice de willcomb.
7. Cuando el contador esté en 15 (minutos), disminuir de nuevo la velocidad de rotación a 30 rpm durante 7,5 minutos más.
8. Finalmente, cuando el contador esté en 7,5 (minutos), disminuir a 20 rpm la velocidad de agitación.
9. Al terminar el tiempo de agitación de 21 minutos en total, dejar precipitar los flóculos formados durante 20 minutos más, tiempo establecido en la planta de tratamiento para los equipos sedimentadores.
10. Al transcurrir ese tiempo, se toman muestras de 15 ml para cada una de las jarras y se miden los parámetros nuevamente.
11. Construir una gráfica donde se represente el porcentaje de reducción de cada parámetro frente a la concentración de coagulante empleada. Se determina la dosificación óptima para cada coagulante.

#### **4.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN**

Con el fin de obtener dos alternativas que ofrezcan mayores eficiencias en remoción de parámetros como turbiedad, color, pH, hierro y/o aluminio residual, la técnica empleada para este desarrollo experimental se basa en un estudio experimental a emplear en la planta de tratamiento de agua potable de la Empresa Aguas de Facatativá EAF SAS ESP con el uso de ensayos de jarras que involucran la determinación de parámetros incidentes, diferenciales y que afectan la calidad del agua a entregar a la población del municipio de Facatativá.

Para la empresa, aquellos factores de mayor importancia y a los cuáles se debe hacer constante evaluación para determinar si se encuentran dentro de los límites permitidos son: pH, Turbiedad, Color, Alcalinidad, Aluminio y/o Hierro Residual, factores determinantes para conocer y establecer el tipo de coagulante a emplear y la dosis requerida para la mayor remoción de los parámetros en el proceso de clarificación.

La evaluación de las alternativas de coagulantes es realizada a partir de la determinación de las dosis óptimas que permitan una desestabilización de las partículas coloidales con una producción de un floc más denso en menores tiempos y con mayores velocidades de precipitación, evitando también la generación de productos adversos a la salud.

La metodología empleada para ésta determinación consiste en tomar cada uno de los coagulantes para la realización del ensayo de jarras utilizando únicamente aguas superficiales para este estudio, y observar la variación de los parámetros más influyentes ya mencionados durante el periodo de desarrollo de las alternativas.

**Tabla 20.** Rangos de los parámetros determinantes en la selección del coagulante

PARÁMETRO ANALIZADO	VALOR MÁXIMO PERMISIBLE
pH	6.5 <= pH <=9.0
Turbiedad	2 UNT
Color	15 UPC
Alcalinidad	200 mg/l
Aluminio	0,2 mg/l
Hierro	0,3 mg/l

**Fuente.** Resolución 2115/07. República de Colombia

Para el agua cruda, los valores de los parámetros oscilaban en rangos de 6,62 a 7,23 para el pH, rangos de 2,19 a 3,54 UNT de turbiedad, rangos de 23,1 a 30,2 UPC de Color y rangos de 13,78 a 22,75 mgCaCO<sub>3</sub>/L de alcalinidad. Tomando como base estos valores iniciales, con las pruebas realizadas se espera determinar el debido cumplimiento de la normatividad Colombiana de la Resolución 2115 de 2007 sobre los parámetros más influyentes de la Tabla 19 en la planta de tratamiento de la empresa en cuanto a potabilización se trata.

En el desarrollo de las pruebas de jarras, se realizó la determinación de los parámetros tanto del agua cruda como del agua clarificada para obtener un porcentaje de remoción y con ello lograr la determinación de cuál de los coagulantes escogidos se ajusta mejor y en qué dosis permite la mayor remoción tomando en cuenta la normativa de la Tabla 19.

Para el cálculo del porcentaje de remoción de color, turbiedad, hierro residual y pH se emplean las fórmulas:

$$\% \text{ Remoción de Color} = \left( \frac{\text{Color}_{\text{inicial}} - \text{Color}_{\text{final}}}{\text{Color}_{\text{inicial}}} \right) * 100\%$$

$$\% \text{ Remoción de Hierro total} = \left( \frac{\text{Hierro total}_{\text{inicial}} - \text{Hierro total}_{\text{final}}}{\text{Hierro total}_{\text{inicial}}} \right) * 100\%$$

$$\% \text{ Remoción de Turbiedad} = \left( \frac{\text{Turbiedad}_{\text{inicial}} - \text{Turbiedad}_{\text{final}}}{\text{Turbiedad}_{\text{inicial}}} \right) * 100\%$$

$$\% \text{ Cambio de pH} = \text{Valor absoluto} \left( \frac{\text{pH}_{\text{inicial}} - \text{pH}_{\text{final}}}{\text{pH}_{\text{inicial}}} \right) * 100\%$$

Para las dosis empleadas en cada alternativa, se tiene en cuenta la información brindada por el proveedor, además de la relación entre la turbiedad y la concentración de coagulante en la que se establece que para turbiedades bajas como en este tipo de agua cruda, las dosis de coagulantes requeridas son bajas<sup>47</sup>.

También, de acuerdo a la alcalinidad, tomando como base una ecuación, se logra obtener un estimado de dosificación de partida a aplicar, para ello se debe tomar la alcalinidad inicial de la muestra de agua cruda y emplear la siguiente ecuación, en la que, de acuerdo a la baja alcalinidad inicial presente en el agua, la cantidad de agente coagulante a utilizar es baja<sup>48</sup>.

$$[\text{Coagulante}] = \left( \text{Alcalinidad}_{\text{inicial}} - \frac{\text{Alcalinidad}_{\text{inicial}}}{3} \right) * 2 = \left[ \frac{\text{mg coagulante}}{L} \right]$$

Finalmente, se tiene en cuenta que, al querer reducir costos en insumos, se requiere determinar dosis menores a las empleadas actualmente a fin de generar ventajas técnicas y económicas a la empresa.

Igualmente, las pruebas realizadas mantuvieron las concentraciones de Cloro y Cal empleadas actualmente porque, el Cloro va a permitir eliminar diversos microorganismos presentes en el agua que podrían sobrevivir a la desestabilización con el coagulante empleado y, la Cal aumenta la alcalinidad dentro de los límites permitidos para reducir la corrosión al emplear coagulantes de sales de hierro que pueden generarlo y para evitar la caída brusca del pH al ocurrir los procesos de coagulación-floculación.

**4.2.1 Información diagnóstica del proceso actual.** Actualmente, en la planta de tratamiento de la empresa EAF SAS ESP, se hace uso del coagulante a base de sales metálicas de aluminio, Sulfato de Aluminio Tipo B en presentación líquida, cuyos parámetros medidos se encuentran dentro de los rangos máximos permitidos en la normatividad colombiana; aunque, existe un problema reflejado en la variabilidad del resultado respecto al aluminio residual del agua tratada, debido a que en algunas ocasiones su valor sobrepasa los permisibles,

<sup>47</sup> COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. En: Portal de revistas UN bdigital - Facultad de Minas – UNALMED. Octubre 5 de 2010. DYNA, Volumen 78, Número 165, p. 18-27, 2011. [en línea] <<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>> [Citado el 29 de Mayo de 2017].

<sup>48</sup> Ibid.

requiriendo la disminución del agente coagulante y con ello la efectividad en los procesos de coagulación, floculación y sedimentación para la obtención de un agua clarificada de calidad.

Tomando como base el promedio mensual de los datos históricos del presente año durante los meses de Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre del año 2016 y los meses Enero, Febrero y Marzo del 2017 en la Tabla 21 sobre los parámetros fisicoquímicos del agua a tratar que se recibe en la planta, suministrados por la empresa de tratamiento de agua potable, se realiza una comparación de éstos respecto a los valores máximos permitidos, teniendo en cuenta la Resolución 2115 del 2007, con el fin de determinar la calidad del agua y el cumplimiento de la norma para la población involucrada que recibe el servicio.

**Tabla 21.** Promedio mensual de datos históricos para el agua cruda en los últimos meses del año 2016 y en los primeros meses del 2017

Parámetro	Unidad	Julio/2016	Agosto /2016	Septiembre /2016	Octubre /2016	Noviembre /2016	Febrero /2017	Marzo/2017	Abril/2017
pH	Unidad de pH	6,61	6,36	6,90	6,98	6,74	6,58	6,69	7,17
Turbiedad	UNT	3,80	2,73	3,48	3,92	6,22	6,29	7,34	5,39
Color	UPC	33,8	32,93	32,27	28,73	28,2	37,43	44,1	35,05
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	14,58	17,54	21,30	19,48	11,56	13,92	11,13	13,58
Hierro Total	mg Fe/L	1,39	0,29	1,18	0,35	0,30	0,79	0,88	0,9
Aluminio Residual	mg Al/L	0,19	0,23	0,2	0,13	0,12	0,25	0,14	0,17

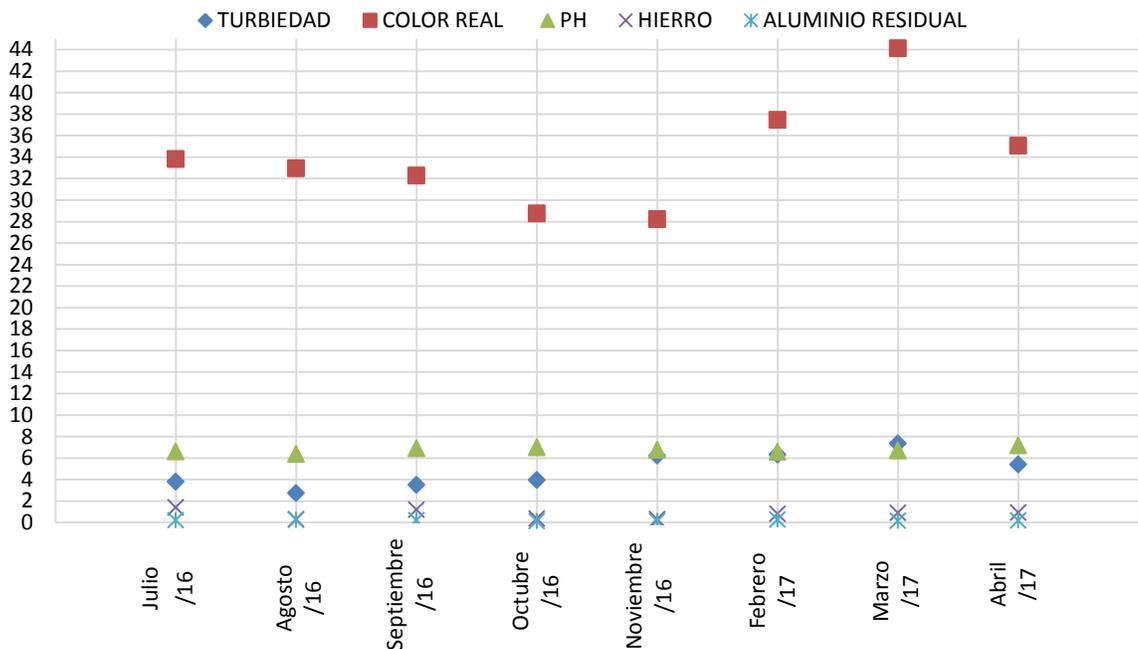
**Fuente.** Empresa EAF SAS ESP

De acuerdo a los datos promedio registrados en la Tabla 21, se muestran los resultados en la Gráfica 1 observando el comportamiento para los diferentes parámetros de importancia en la planta de tratamiento para la potabilización de agua. Por medio de ésta Gráfica, se observa que el valor máximo de turbiedad a la entrada a la planta de tratamiento es de 7,34 UNT obtenida en el mes de Marzo del año 2017 y el valor mínimo de 2,73 UNT para el mes de Agosto del 2016. Para el caso del color, se obtuvieron valores máximos de 44,1 UPC para el mes de Marzo de 2017 y valor mínimo de 28,2 UPC para el mes de Noviembre. Estos valores pueden explicarse debido a los cambios climáticos que ocurrieron en el transcurso del año y durante el periodo de estudio en el agua cruda que ingresaba a la planta de tratamiento; además, en la tabla 21 se observan variaciones elevadas en el parámetro de turbiedad, donde, en el mes de Octubre del 2016 está en 3,92 UNT y pasando al mes de Noviembre se eleva su valor hasta 6,22

UNT, elevación respecto a la combinación de agua cruda y agua subterránea empleada en este lapso de tiempo para suplir los requerimientos.

Respecto al pH, durante la época de estudio, sus variaciones no fueron notorias respecto a los demás parámetros, tomándose como constante dentro del rango máximo y mínimo permitido. De acuerdo al Hierro Total, los valores promedio tomados son superiores a 0,3, evidenciando la necesidad de corregir este parámetro y realizar la clarificación para disminuir su valor y con ello las afectaciones a la población. Por último, los valores presentados en la tabla respecto al aluminio después del tratamiento de potabilización están por encima de los permitidos en la Resolución 2115 que es de 0,2 mg Al/L, debido a esto, se presentan problemáticas en la calidad de agua a entregar cuando los valores no se mantienen dentro de la normatividad, requiriendo modificaciones en el proceso o en los insumos y dosis aplicadas.

**Gráfica 1.** Comportamiento promedio del agua cruda para diagnóstico histórico



Para la obtención del agua tratada y apta para el consumo humano, se emplea en el proceso de coagulación concentraciones de Sulfato de Aluminio comprendidas entre 16 y 24 mg/L aplicado en solución al 1% m/v, cantidades que obtienen los operarios al realizar las pruebas de jarras al ingreso de su turno, determinando aquellos parámetros principales e inherentes en el proceso a fin de generar buenos resultados y otorgar agua de alta calidad. De acuerdo a esto, en la Tabla 31 se presentan los resultados de algunas pruebas realizadas al coagulante actual con el fin de determinar su efectividad para el proceso de potabilización y su dosis

óptima requerida para el mismo, además del porcentaje removido para cada parámetro presentado en la Tabla 32 (Ver Anexo C).

**4.2.2 Alternativa coagulante sulfato férrico.** La realización de ésta prueba abarcó los resultados de las mediciones obtenidos en las Tablas 22 y 23, permitiendo observar el comportamiento de las dosis del coagulante Sulfato Férrico respecto a los parámetros de importancia ya mencionados. Además, en la Tabla 35 (Anexo D) se muestran los porcentajes de remoción para cada dosis empleada, con el fin de determinar la mejor dosis de acuerdo a la concentración que arroje mayores porcentajes de remoción de turbiedad, color e hierro.

**Tabla 22.** Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Sulfato Férrico a dosis de 4 mg/L a 14 mg/L.

Coagulante	Sulfato Férrico					
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 1</b>						
pH inicial	6,68	Color (UPC)				23,1
Turbiedad (UNT)	2,01	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				21,708
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	4	6	8	10	12	14
Turbiedad Residual (UNT)	1,94	0,63	0,52	0,76	0,8	2,13
Color Residual (UPC)	32,8	12,4	11,1	17,1	18,2	34,7
pH residual	6,8	6,74	6,66	6,18	5,97	7,11
Hierro Residual	1,7	0,62	0,66	1,22	1,28	2,4
Turbiedad Filtrada (UNT)	1,03	0,24	0,12	0,19	0,39	1,78
Color Filtrado (UPC)	27,5	7,4	6,1	6,8	7,2	28
Hierro Filtrado	0,8	0,22	0,19	0,33	0,32	1,03
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 2</b>						
pH inicial	6,617	Color (UPC)				23,4
Turbiedad (UNT)	2,51	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				14,78
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	4	6	8	10	12	14
Turbiedad Residual (UNT)	0,85	0,92	1,05	1,22	1,56	2,02
Color Residual (UPC)	16,4	15,6	18,9	24,6	27,7	38,5
pH residual	6,78	6,58	6,4	5,76	5,71	5,51
Hierro Residual	0,84	0,92	1,22	1,43	0,92	2,5
Turbiedad Filtrada (UNT)	0,24	0,3	0,23	0,46	0,26	0,21
Color Filtrado (UPC)	11,5	9	7,3	7	8,4	7,4
Hierro Filtrado	0,42	0,27	0,38	0,34	0,46	0,46
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 3</b>						
pH inicial	6,79	Color (UPC)				24,5
Turbiedad (UNT)	2,73	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				19,56
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	4	6	8	10	12	14
Turbiedad Residual (UNT)	0,61	0,45	0,36	0,49	0,62	2,65
Color Residual (UPC)	15	12,3	12,9	13,3	16,9	40,5
pH residual	6,82	6,67	6,74	6,06	5,75	7,04
Hierro Residual	0,71	0,63	0,75	0,94	1,24	2,32
Turbiedad Filtrada (UNT)	0,27	0,22	0,17	0,32	0,41	1,26
Color Filtrado (UPC)	9,8	8,2	8,3	7,8	8,5	32
Hierro Filtrado	0,29	0,26	0,22	0,34	0,36	1,41

**Tabla 22.** (Continuación)

AGUA CRUDA -PRUEBA No. 4						
pH inicial	6,85	Color (UPC)				26,2
Turbiedad (UNT)	2,67	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				21,88
PARÁMETROS	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (mg/L)	4	6	8	10	12	14
Turbiedad Residual (UNT)	2,85	0,98	0,49	0,53	0,83	0,97
Color Residual (UPC)	42,8	16,7	11,2	11,4	17,9	18,4
pH residual	6,54	6,83	6,77	6,64	6,81	6,95
Hierro Residual	2,23	0,96	0,68	0,69	1,12	1,21
Turbiedad Filtrada (UNT)	0,31	0,35	0,23	0,24	0,13	0,23
Color Filtrado (UPC)	9,4	9	7,9	5,5	5,3	5,8
Hierro Filtrado	0,26	0,22	0,26	0,26	0,32	0,42

**Tabla 23.** Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Sulfato Férrico a dosis de 2 mg/L a 12 mg/L.

Coagulante	Sulfato Férrico					
AGUA CRUDA -PRUEBA No. 5						
pH inicial	6,65	Color (UPC)				23,4
Turbiedad (UNT)	2,26	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				16,8
PARÁMETROS	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (mg/L)	2	4	6	8	10	12
Turbiedad Residual (UNT)	1,99	1,27	0,74	0,68	0,84	0,72
Color Residual (UPC)	34,6	23,4	16,2	13,9	17,3	17,1
pH residual	6,49	6,29	7,05	6,97	6,73	6,79
Hierro Residual	2,5	1,75	1,21	1,04	1,24	1,33
Turbiedad Filtrada (UNT)	0,92	1,03	0,51	0,3	0,47	0,45
Color Filtrado (UPC)	22,4	21,9	14,8	10,3	15	15,8
Hierro Filtrado	1,11	0,96	0,71	0,35	0,7	0,97
AGUA CRUDA -PRUEBA No. 6						
pH inicial	7,23	Color (UPC)				28
Turbiedad (UNT)	2,89	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				22,75
PARÁMETROS	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Turbiedad Residual (UNT)	2,09	1,02	0,61	0,81	1,23	1,21
Color Residual (UPC)	18	16	13,2	16,1	18,2	23,4
pH residual	6,03	6,12	6,6	6,7	6,04	5,18
Hierro Residual	0,77	0,71	0,6	0,95	1,2	1,5
Turbiedad Filtrada (UNT)	0,35	0,23	0,16	0,22	0,46	0,97
Color Filtrado (UPC)	7,5	13,1	7,1	12,5	9,2	7,4
Hierro Filtrado	0,43	0,4	0,15	0,3	0,37	1,02
AGUA CRUDA -PRUEBA No. 7						
pH inicial	6,85	Color (UPC)				30,2
Turbiedad (UNT)	2,83	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				25,92
PARÁMETROS	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Turbiedad Residual (UNT)	3,07	0,9	0,72	1,25	1,14	2,1
Color Residual (UPC)	33,7	15	13,2	16	15,2	26,1
pH residual	6,88	6,63	6,6	6,58	6,23	6,11
Hierro Residual	0,7	0,76	0,61	0,89	1,3	1,23
Turbiedad Filtrada (UNT)	0,95	0,3	0,2	0,18	0,48	0,87
Color Filtrado (UPC)	9,5	13,2	8,3	7,5	9,5	14,1
Hierro Filtrado	0,4	0,37	0,17	0,3	0,42	1,12

**Tabla 23.** (Continuación)

Coagulante		Sulfato Férrico				
AGUA CRUDA -PRUEBA No. 8						
pH inicial	6,74	Color (UPC)				25,9
Turbiedad (UNT)	3,54	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				20,76
PARÁMETROS	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (mg/L)	2	4	6	8	10	12
Turbiedad Residual (UNT)	2,63	1,14	0,4	0,44	0,49	0,61
Color Residual (UPC)	40,4	21,2	9,6	10,5	12,4	15,2
pH residual	7,03	6,98	6,71	6,68	6,47	6,09
Hierro Residual	1,96	1,15	0,69	0,87	0,95	1,2
Turbiedad Filtrada (UNT)	1,19	0,89	0,29	0,26	0,23	0,32
Color Filtrado (UPC)	30,7	11,9	7,5	5,4	6,7	7,4
Hierro Filtrado	1,48	0,29	0,35	0,3	0,34	0,4

Para éste coagulante, se realizaron 8 pruebas en las que las características iniciales del agua eran similares con el fin de determinar baja o nula variación respecto a las mediciones obtenidas.

Para cada uno de los ensayos de jarras se toman dosis entre 2 mg/l y 12 mg/l y de 4 mg/l hasta 14 mg/l para las diferentes pruebas; éstas cantidades están determinadas en base a las concentraciones utilizadas actualmente en la planta de tratamiento de la Empresa EAF, valores que oscilan entre 16 y 24 mg/L. Al requerir disminuir costos en la planta, se realiza el desarrollo experimental con cantidades menores a las empleadas actualmente de coagulantes químicos pero que también permitan generar una buena clarificación en el proceso respetando los límites permisibles en la normatividad.

**4.2.2.1 Comportamiento del pH.** En las tablas anteriores, se presentan las mediciones realizadas entre el agua cruda y el agua sedimentada en el proceso a nivel laboratorio en el desarrollo experimental realizado para las diferentes dosis del coagulante empleado.

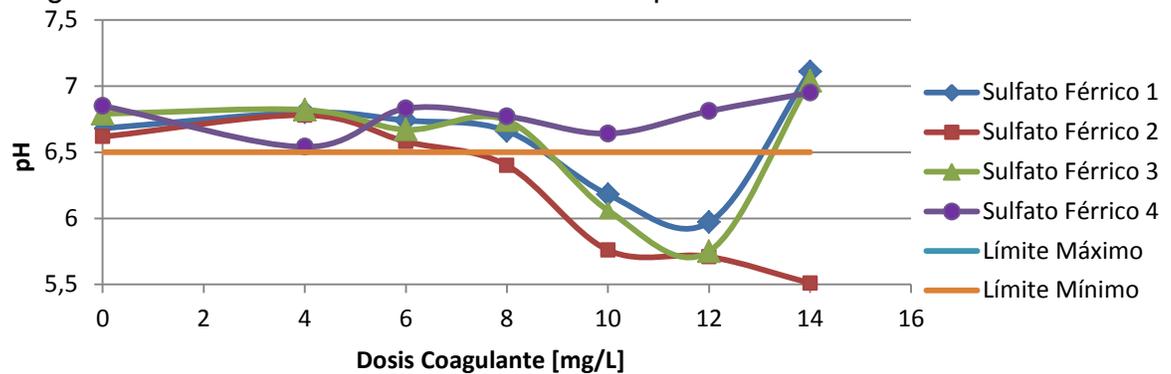
Con estos datos, en las Gráficas 2 y 3, se establece la relación entre los intervalos de dosis aplicados a cada una de las jarras, su pH tanto inicial como final, y los límites permitidos en la resolución 2115<sup>49</sup>. Según esto, para cada una de las pruebas, la máxima dosis que podría emplearse está entre los 6 y 8 mg/L (Jarras 2 y 3), valor después del cuál el pH final sufre una mayor disminución respecto al valor mínimo permitido que es de 6,5.

De acuerdo a esto las pruebas para el coagulante sulfato férrico seleccionado, se observa que la relación entre las dosis y el pH se mantiene, porque a dosis de 6 mg/L y 8 mg/L, se encuentran por encima del límite mínimo de 6,5 unidades de pH

<sup>49</sup> La resolución 2115 establece las características físicas, químicas y microbiológicas indicando los límites máximos permitidos para elemento y/o compuesto para la calidad de agua apta para consumo humano.

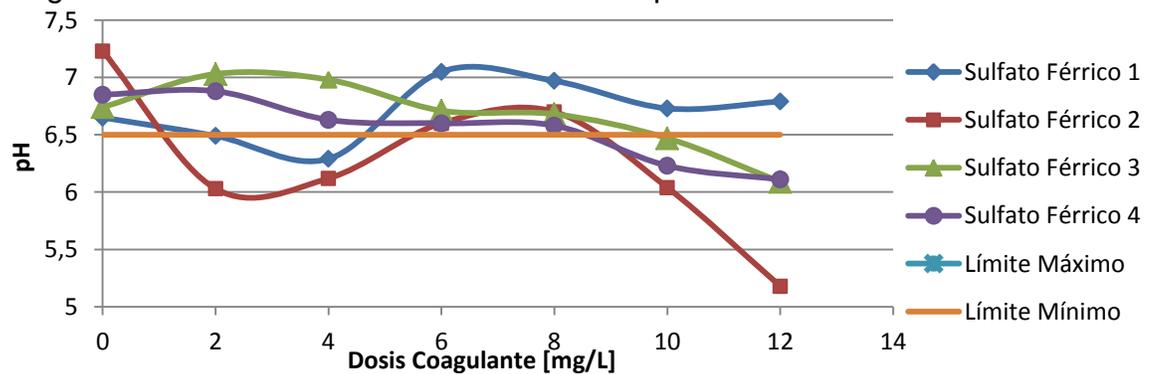
y por debajo del máximo de 9 unidades de pH; con ello, puede tomarse en cuenta que para el coagulante de Sulfato Férrico, trabajar a concentraciones más bajas que las empleadas actualmente, permite mantenerse sin problemas dentro de los rangos establecidos en la Resolución 2115 de 2007.

**Gráfica 2.** Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 4 a 14 mg/L con el coagulante Sulfato Férrico en cada una de las pruebas.



En esta gráfica, los datos que se encuentran por fuera de la norma a dosis mayores e iguales a 10 mg/L, ocurre debido a que, al agregar coagulante, el pH empieza a disminuir, y un exceso en éste, produce una mayor reducción en su valor dejándolo por debajo del límite inferior establecido.

**Gráfica 3.** Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 2 a 12 mg/l con el coagulante Sulfato Férrico en cada una de las pruebas.



Se observa que el exceso de coagulante o la falta de éste en el proceso, favorecen la disminución del pH durante el proceso teniendo valores de pH iniciales de aproximadamente 6,8 unidades de pH, valor cercano al límite inferior, generando una disminución al reaccionar con las partículas del agua y afectando el comportamiento del pH inicial.

También se observa que a valores superiores a 10 mg/l, la disminución del pH va aumentando con la elevación en la concentración del coagulante sulfato férrico,

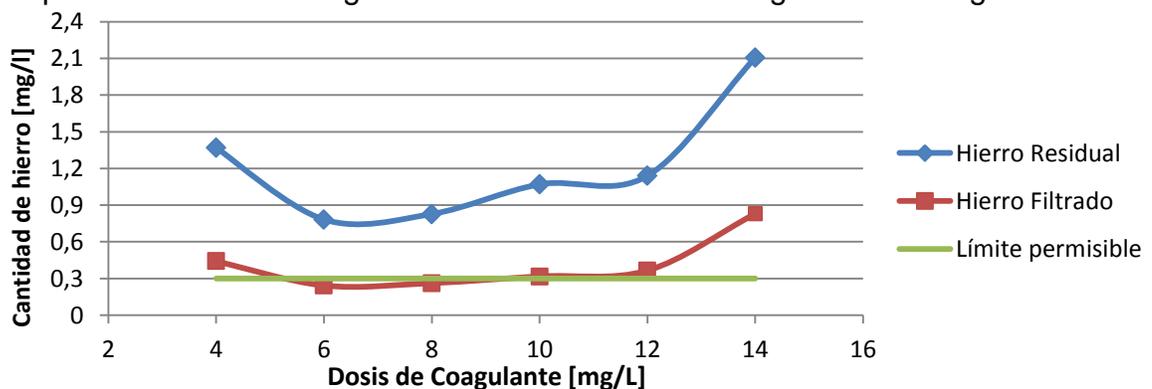
desfavoreciendo el empleo de estas dosis cuyos valores mínimos no se encuentran dentro de lo estipulado en las normas.

**4.2.2.2 Comportamiento del Hierro.** Al ser un compuesto con contenido de hierro en su molécula, se hizo necesario determinar su cantidad en el agua analizada. En las tablas mencionadas se muestran estos resultados de acuerdo a las pruebas de hierro realizadas. El hierro, según la normatividad no debe superar los 0,3 mg/L porque puede provocar manchas en la ropa, cierto sabor apreciable en el agua y en elevadas concentraciones genera corrosión en las tuberías por donde fluye la misma, en cuyo caso, para el hierro residual se estaría superando los límites máximos permitidos y no sería posible su uso.

Pero, además de las etapas de coagulación, floculación y sedimentación empleadas en una prueba de jarras, se verifica con el proceso contiguo de filtración, en el que las concentraciones de hierro altas y superiores a 0,3 mg/L pueden tratarse con un sistema de aireado-filtrado, a fin de reducir la cantidad de hierro que se generó al reaccionar el coagulante con el agua y sus partículas suspendidas. En este sistema el aire se lleva hacia dentro del mismo y se mezcla con la corriente de agua clarificada, luego el agua saturada de aire pasa por un precipitador en el que se separa el aire del agua. Después de esto, se conduce el agua por unos filtros de varios medios filtrantes, permitiendo la retención de partículas de hierro oxidadas.

Con base a ello, en el laboratorio se emplean papeles de filtro con embudos para hacer la filtración a cada una de las muestras a pequeña escala, con el fin de observar si las partículas de hierro quedan retenidas en el mismo. Luego de la filtración, se realiza la toma de muestras y su posterior análisis obteniendo los resultados para el Hierro filtrado.

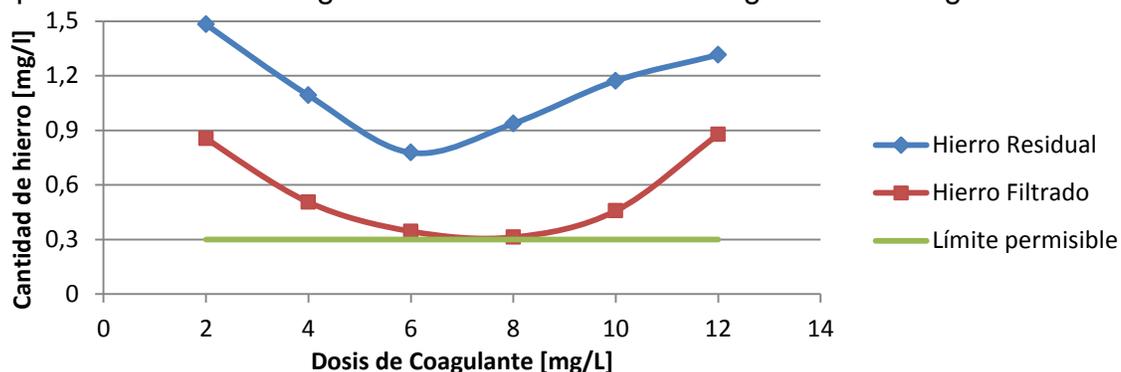
**Gráfica 4.** Resultados promedio de Hierro después de la filtración de las muestras empleando dosis de coagulante Sulfato Férrico de 4 mg/l hasta 14 mg/l



En esta gráfica y en la gráfica 5, se observa datos superiores a los estipulados en la norma; estos valores superiores a 8 mg/L son debidos a que un exceso en la

carga de coagulante con contenido de hierro, genera una cantidad de hierro residual superior a la norma, incluso después de realizada la filtración en la que se logra retener la mayor cantidad posible de hierro en los medios filtrantes empleados en la empresa EAF. También, a valores inferiores a 6 mg/L se presenta igualmente un aumento en la concentración de hierro filtrado a causa de la cantidad de coagulante agregado, porque al ser pequeñas dosis, no todas las partículas suspendidas logran interactuar con el coagulante, dejando fragmentos de hierro en el agua que no se alcanzan a remover con los medios filtrantes.

**Gráfica 5.** Resultados promedio de Hierro después de la filtración de las muestras empleando dosis de coagulante Sulfato Férrico de 2 mg/l hasta 12 mg/l



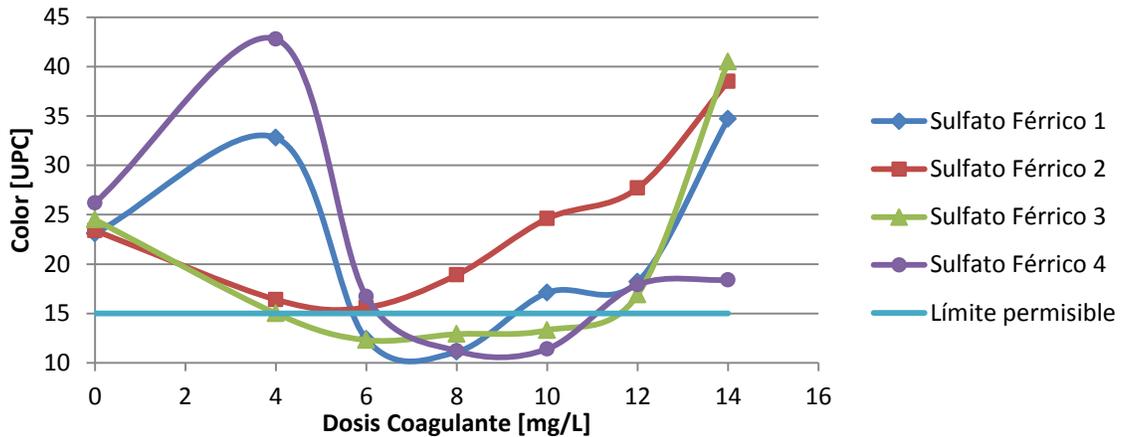
En las gráficas 4 y 5 se presentan los resultados tanto para el hierro residual como para el hierro filtrado realizados en el laboratorio, obteniéndose en ambas una reducción notable en el contenido de hierro y por debajo de límite permisible de 0,3 mg/L a una concentración de Sulfato Férrico entre 6 mg/L a 8 mg/L. En las variaciones entre las dosis para cada jarra, se observa que tanto una baja como una alta concentración por fuera de la mejor dosis, eleva los parámetros a datos superiores a los establecidos en la Resolución 2115 de 2007.

**4.2.2.3 Comportamiento del Color aparente.** Los resultados obtenidos de las mediciones del color en el espectrofotómetro luego del ensayo de jarras se determinan en unidades de Platino-Cobalto (UPC), transcurridos 41 minutos (ver Tabla 18) en el proceso.

Respecto a los datos mostrados en las tablas anteriores, en la gráfica 6, se presenta la relación entre las dosis de coagulante y las mediciones del color para cada una de las jarras, con el fin de determinar cuál de ellas genera una mejor remoción tomando en cuenta los valores permisibles, y, teniendo en cuenta también los porcentajes de remoción establecidos en la Tabla 39 para éste coagulante (Ver Anexo D). Para cada una de las pruebas se realizó ésta determinación, observando que la mayor cantidad removida de color en el rango de concentración establecido, se encuentra entre las dosis de 6 mg/L y 8 mg/L, en la que, tanto el color residual como el color filtrado se encuentra por debajo de 15

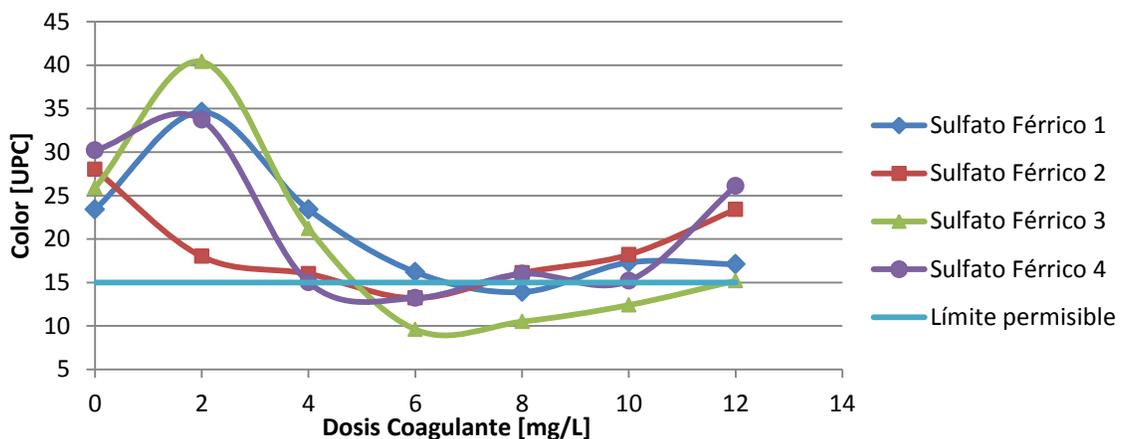
UPC, que según la resolución 2115 de 2007, es el valor máximo que puede llegar a tener un agua potable a entregar para el consumo humano.

**Gráfica 6.** Comportamiento del Color con base a las dosis empleadas de 4 a 14 mg/l con el coagulante Sulfato Férrico en las distintas pruebas.



Luego de la filtración, la cantidad de color disminuyó quedando por debajo de los límites máximos y permitiendo la aplicación del coagulante sulfato férrico en cantidades desde 6 mg/L hasta 10 mg/L. En dosis menores a 6 mg/L y mayores a 10 mg/L, la remoción de color supera los límites debido a la falta o exceso de coagulante añadido al agua cruda con las características actuales de la misma que le dificulta retener toda la materia orgánica y compuestos metálicos como el hierro que están disueltos en el agua.

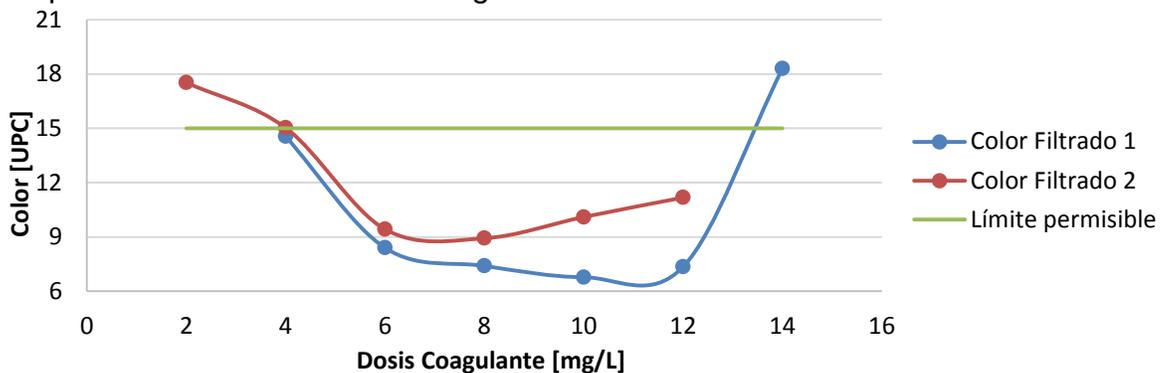
**Gráfica 7.** Comportamiento del Color en base a las dosis empleadas de 2 a 12 mg/l con el coagulante Sulfato Férrico en las pruebas de laboratorio



Con la filtración realizada posteriormente al proceso de clarificación, el empleo del coagulante en estudio sulfato férrico puede realizarse entre dosis de 6 mg/L hasta 8 mg/L en el que los resultados obtenidos se encuentran dentro de los límites

permitidos de 15 UPC. Respecto a los datos para altas y bajas concentraciones, se presentan a causa de la falta en la remoción de minerales como el hierro, elemento cuya remoción en las gráficas 4 y 5 también fue deficiente en dosis menores a 6 mg/L y mayores a 10 mg/L. Cuyo resultado, permite determinar que se requieren menores dosis a las utilizadas actualmente para remover el color del agua a tratar obteniendo reducciones menores a los límites permisibles de color de 15 UPC.

**Gráfica 8.** Resultados promedio para el color después de la filtración para todas las pruebas realizadas con el coagulante sulfato férrico



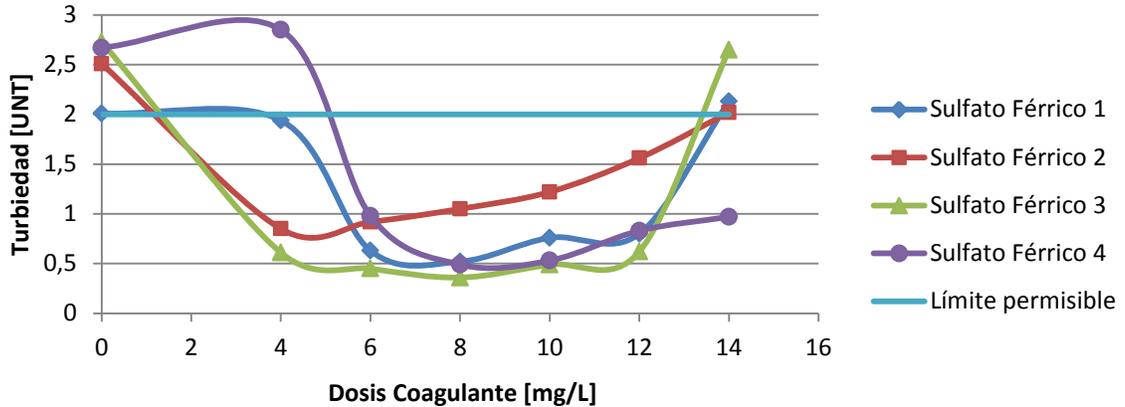
En la gráfica 8, se observan los resultados promedios al realizar la filtración para los dos intervalos de dosificación entre 2 a 12 mg/L y entre 4 a 14 mg/L, en los que se obtuvo una reducción en el color del agua clarificada al quedar los minerales como el hierro retenidos en los medios filtrantes durante el proceso, respetando los límites máximos permitidos, en este caso, de 15 UPC para el parámetro de color.

**4.2.2.4 Comportamiento de la Turbiedad.** Se realiza el mismo tratamiento para la turbiedad obteniendo resultados tanto para turbiedad residual como para la turbiedad filtrada, para la disminución del hierro luego de emplear la filtración.

En las gráficas del comportamiento de la turbiedad (Gráfica 12 a 15), se logra establecer una relación entre las dosis de coagulantes de 6 mg/L y 8 mg/L al ser las concentraciones en las que se obtienen las mayores remociones de éste parámetro influyente, siendo el más importante para obtener el mejor tratamiento porque establece el rango de eficiencia que se tiene en el proceso al realizar su remoción.

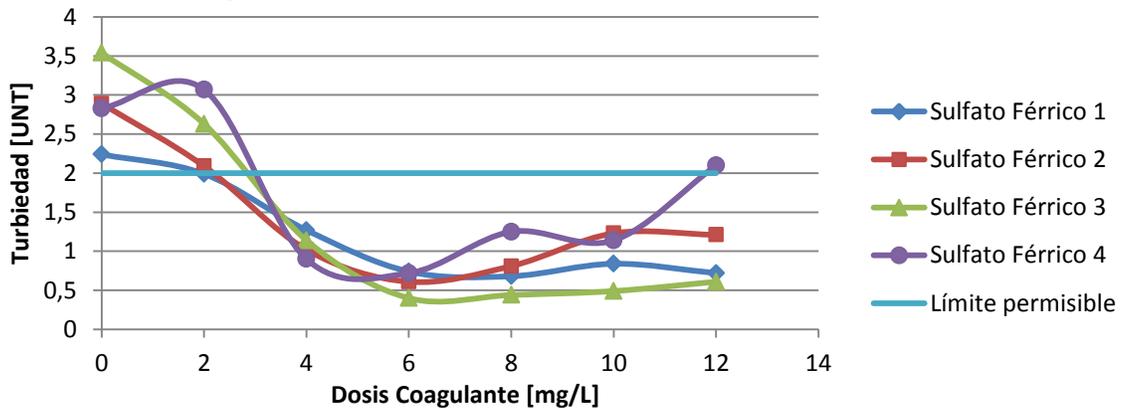
Estas gráficas permiten, además, observar que en las mayores remociones se obtienen resultados menores a los límites permitidos de 2,0 UNT con porcentajes hasta de 94% de remoción (Tabla 35), dando con ello, una factibilidad en la implementación de estas concentraciones para la planta de tratamiento.

**Gráfica 9.** Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras en las dosis de 4 a 14 mg/l después de la clarificación.



Respecto a este comportamiento, la turbiedad después del proceso de clarificación y su posterior filtración permite evidenciar la remoción eficiente obtenida con las diferentes dosis del coagulante sulfato férrico al eliminar la mayor cantidad de partículas en suspensión del agua en tratamiento por debajo del límite máximo permitido de 2,0 UNT.

**Gráfica 10.** Comportamiento de la turbiedad en la en las pruebas de jarras en las dosis de 2 a 12 mg/l después de la clarificación.

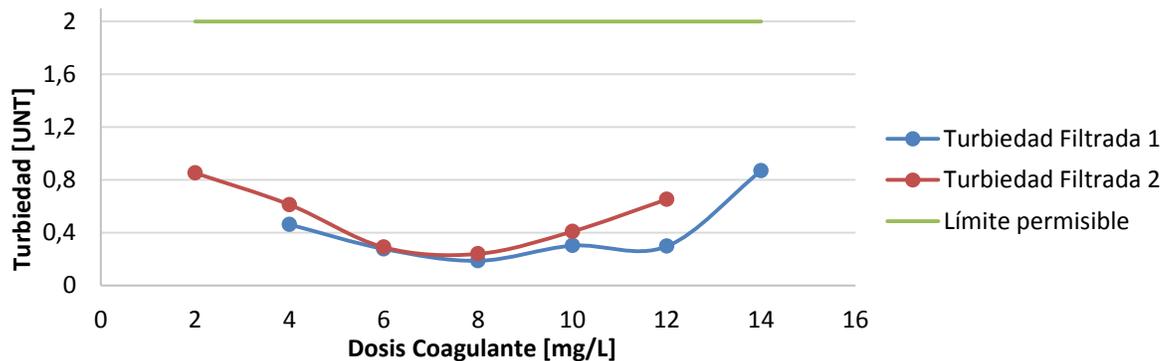


En esta gráfica, el comportamiento de la remoción dentro de los límites permisibles se mantiene, obteniendo una tendencia de reducción de la turbiedad con mayores remociones en dosis entre 6 mg/L y 8 mg/L donde de turbiedad iniciales entre 2,2 y 2,8 UNT, pasa a turbiedad finales menores a 0,7 UNT.

En las gráficas 8 y 9, el resultado en los comportamientos respecto a las dosificaciones tuvo variaciones en pequeñas y excesivas cargas de coagulante en el agua a tratar, obteniendo mayores remociones en concentraciones de 6 mg/L a 8 mg/L dentro de la norma. Al aplicar el proceso de filtración, en cada prueba se obtuvieron remociones por debajo de 2,0 UNT, pudiendo seleccionar cualquiera,

pero a fin de obtener mayores eficiencias con menor cantidad de agente químico, se selecciona la dosis de 8 mg/L en la que en cada una de las pruebas se obtuvo la mayor cantidad removida de partículas suspendidas.

**Gráfica 11.** Resultados promedio de la turbiedad después de la filtración para todas las pruebas realizadas con el coagulante sulfato férrico



De acuerdo a la gráfica 11, al realizar la filtración para los dos intervalos diferentes de dosificación entre 2 a 12 mg/L y 4 a 14 mg/L, se obtuvo una reducción en el parámetro de turbiedad al quedar las partículas coloidales retenidas en los medios filtrantes durante el proceso.

**4.2.2.5 Comportamiento del Aluminio residual.** Aunque el coagulante empleado es Sulfato Férrico, que contiene Hierro en su molécula en vez de Aluminio, se realizó una prueba determinando el contenido de Aluminio, puesto que este metal ha generado problemáticas en la planta de tratamiento, debido a su aumento en varias ocasiones al realizar las pruebas de campo, ocasionando la variación y disminución en la aplicación del coagulante Sulfato de Aluminio en la planta de tratamiento para evitar aumentarlo a los valores máximos permitidos por la Resolución 2115 de 2007.

Los datos arrojados por esta prueba en la tabla 24, permitieron determinar que, al emplear el Sulfato Férrico, no ocasiona un aumento en la concentración de Aluminio Residual en las dosis de 6 mg/L y 8 mg/L, manteniéndose por debajo de 0,2 mg/L, valor que no afecta su entrega para el consumo de la población.

**Tabla 24.** Resultados prueba de Aluminio residual con el coagulante sulfato férrico

	DOSIS COAGULANTE [mg/L]	ALUMINIO RESIDUAL [mg/L]
1	4	0,3
2	6	0,13
3	8	0,1
4	10	0,23
5	12	0,25
6	14	0,31

Como alternativa para sustituir el Sulfato de Aluminio Tipo B líquido usual, es posible emplearla en la planta de tratamiento a menores dosis [mg/L] que las que están empleando actualmente, obteniendo un agua potable apta para consumo, cuando se disminuye el contenido de Hierro al emplear la filtración posterior a la sedimentación.

**4.2.3 Alternativa coagulante Policloruro de Aluminio (PAC).** Para ésta alternativa, se realizaron las pruebas de jarras inicialmente a concentraciones menores a las del Sulfato de Aluminio actual, sin obtener buenos resultados; tomando como base el índice de Willcomb<sup>50</sup> para observar visualmente la formación de los flóculos, cuyo valor fue de 0, obteniendo un floc coloidal que no tiene ningún signo de aglutinación. Por lo que, respecto a éstas pruebas teniendo en cuenta el pH inicial en un rango entre 6,0 y 7,0 unidades de pH, no se tomaron datos debido a la falta de remoción visual que se obtuvo.

Por ello, se aumentó su dosificación junto con un aumento en la alcalinidad al agregar Cal (CaO), para observar si a mayores concentraciones permitía la generación de los flóculos que aparecen al interactuar el coagulante con las partículas coloidales del agua luego de su mezcla rápida y lenta, y si a mayor alcalinidad se permitía la remoción de turbiedad. La información generada en las siguientes tablas (25 y 26), muestra que a pesar del aumento tanto de la concentración como de la alcalinidad no se favoreció la formación de los flóculos.

**Tabla 25.** Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Policloruro de Aluminio a dosis de 12 mg/L a 22 mg/L añadiendo cal al agua a tratar.

Coagulante		Policloruro de Aluminio – Ultrafloc 110					
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 1</b>							
pH	6,84	Color (UPC)				30,1	
Turbiedad (UNT)	2,58	Alcalinidad (mg CaCO3/L)				57,2	
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>	
Dosis Coagulante (mg/L)	12	14	16	18	20	22	
Turbiedad Residual (UNT)	2,74	2,64	2,9	2,78	2,95	3,1	
Color Residual (UPC)	25,8	23,9	25,5	24,8	25,9	26,1	
pH	6,8	6,39	6,47	5,21	5,07	5,38	
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 2</b>							
pH	6,63	Color (UPC)				29,5	
Turbiedad (UNT)	3,34	Alcalinidad (mg CaCO3/L)				54,6	
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>	
Dosis Coagulante (mg/L)	12	14	16	18	20	22	
Turbiedad Residual (UNT)	1,58	1,33	1,44	2,54	1,87	1,98	
Color Residual (UPC)	21,8	21,2	27,3	29,2	27,5	28,4	
pH	6,03	6,12	6,6	6,7	6,04	5,18	

<sup>50</sup> El índice de Willcomb permite determinar cualitativamente el tipo de floc que se obtiene después de los procesos de coagulación y floculación por observación visual.

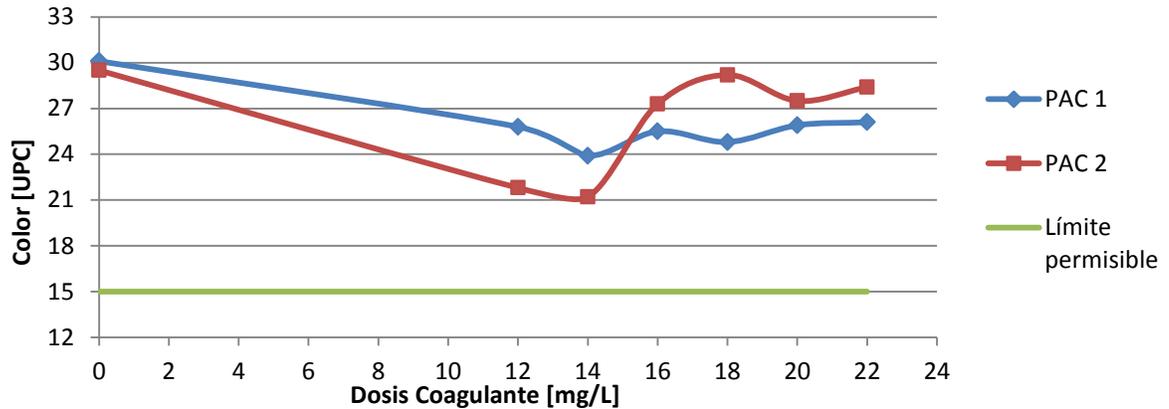
**Tabla 26.** Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Policloruro de Aluminio, cambiando la condición de pH con ácido sulfúrico

Coagulante		Policloruro de Aluminio – Ultrafloc 110				
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 3</b>						
pH	4,05	Color (UPC)				23,9
Turbiedad (UNT)	1,83	Alcalinidad (mg CaCO3/L)				13,5
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	6	8	10	12	14	16
Turbiedad Residual (UNT)	1,31	1,39	0,88	1,24	0,95	0,86
Color Residual (UPC)	16,5	15,5	13,6	16,3	14,2	16,9
pH	3,16	3,39	3,8	3,62	3,3	3,49
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 4</b>						
pH	4,55	Color (UPC)				27,2
Turbiedad (UNT)	2,33	Alcalinidad (mg CaCO3/L)				11,94
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Turbiedad Residual (UNT)	1,11	1,2	0,93	1,15	0,98	0,89
Color Residual (UPC)	17	14,9	12,8	15,6	14,8	15
pH	3,25	3,67	3,89	3,71	3,43	3,21

También, se tomaron pruebas en las que se mantuvo las pequeñas dosificaciones, pero disminuyendo además el valor del pH agregando al agua Ácido sulfúrico, disminuyendo de 6,35 a un valor menor a 4,5 unidades de pH. Al realizar la prueba de jarras, los resultados obtenidos para estas condiciones presentadas en las tablas anteriores, muestran buenas remociones tanto en turbiedad como en color, además de la Tabla 40 (Ver Anexo E), que presenta los porcentajes de remoción obtenidos en cada prueba realizada para los parámetros de mayor importancia, manteniéndose dentro de los límites permitidos en la Resolución 2115 de 2007; de acuerdo al cambio de pH con el empleo de un ácido, se obtuvo resultados menores al límite mínimo de 6,5 unidades de pH, ocasionando un problema para emplear en la planta de tratamiento, porque su rango de pH después del proceso no cumple con los requerimientos de calidad para potabilización de agua.

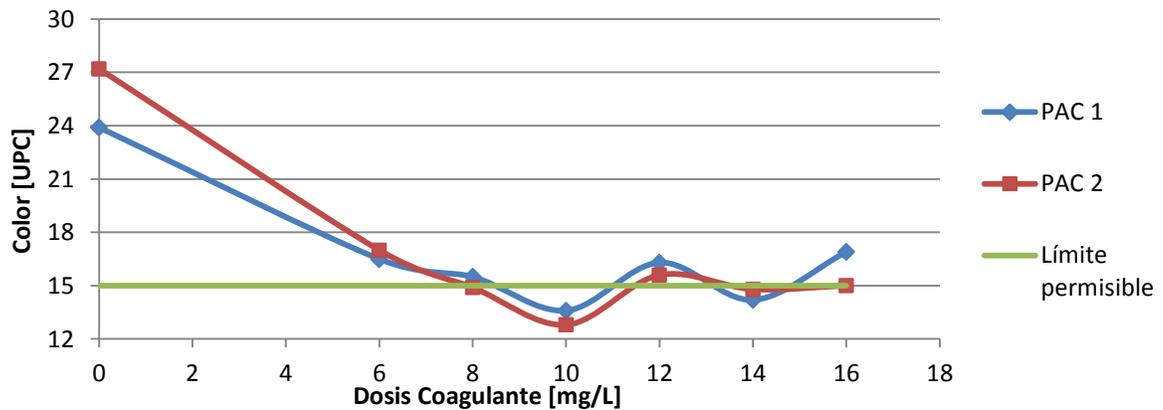
**4.2.3.1 Color.** De acuerdo a los datos presentados en las tablas, se presenta una relación entre el color tanto inicial como residual respecto a las cantidades de Policloruro de Aluminio empleado. En las gráficas 12 y 13 se muestra después del proceso de coagulación – floculación y posterior sedimentación que, se genera una remoción poco eficiente al emplear éste coagulante en la planta para este tipo de agua cruda al modificar también las condiciones iniciales de la misma implementando ácidos y bases para comprobar su posible uso.

**Gráfica 12.** Comportamiento del color en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio utilizando Cal



En la gráfica 12, aunque se observa una reducción de color en dosis de 12 y 14 mg/L, aún queda por encima del valor máximo de 15 UPC presentado en la Resolución 2115, estableciendo que no es factible su empleo porque no es posible entregar un agua a la población con estas características.

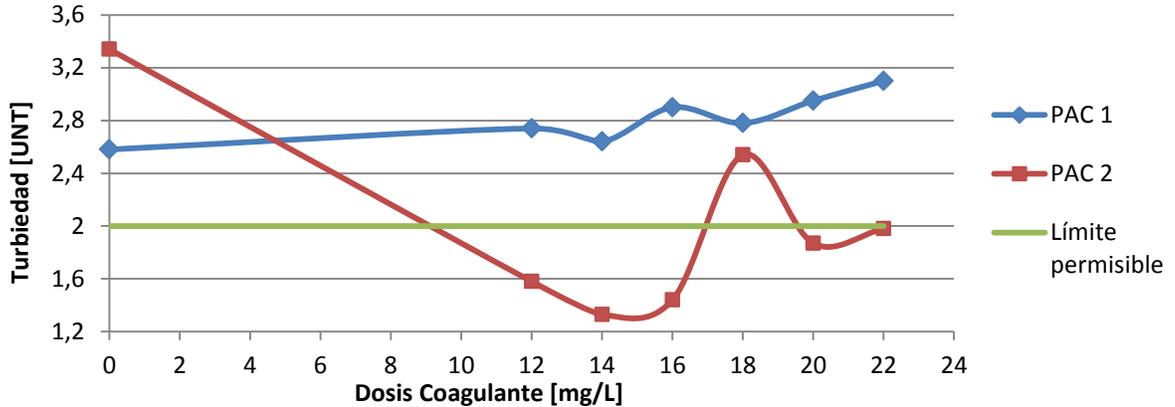
**Gráfica 13.** Comportamiento del color en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio al añadir ácido sulfúrico



En esta gráfica, se observa que hubo una elevada reducción en el color desde el color del agua cruda presentado a una dosis de 0 mg/L y cuya remoción final del mismo después del proceso de clarificación quedó por debajo del límite de 15 UPC a una dosis entre 8 mg/L y 10 mg/L al agregar un ácido que disminuye su pH.

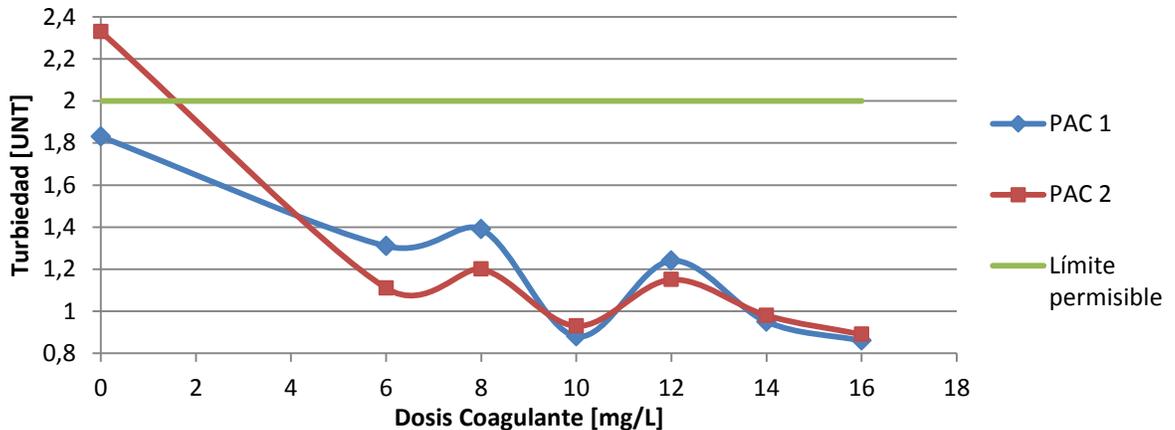
**4.2.3.2 Turbiedad.** Teniendo en cuenta los resultados presentados en las tablas para cada intervalo de dosis empleado, para el caso de la remoción de turbiedad en la gráfica 14, hay una remoción por debajo del máximo permitido de 2 UNT al agregar cal; y, en la gráfica 15, el comportamiento de remoción mejora, porque las turbiedades finales en cada una de las pruebas está por debajo de 2 UNT a condiciones de agregar un ácido al agua a tratar.

**Gráfica 14.** Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio con Cal



Al emplear el coagulante policloruro de aluminio junto con un estabilizador de pH alcalino, en este caso cal, la turbiedad no cumple en todas las pruebas con los parámetros permitidos porque se agregan nuevas sustancias al agua con las que el coagulante no puede reaccionar en su totalidad, evitando la remoción completa de las partículas suspendidas; esto se puede observar en la prueba 1, en la que, a una turbiedad inicial de 2,58 UNT, aplicar éste coagulante aumenta la turbiedad del agua durante el proceso de clarificación a las diferentes dosis implementadas. Ya para la prueba 2, se encontró una remoción desde 3,34 UNT a 1,58 UNT en dosis de 12 mg/L a 16 mg/L, en las que sería posible su implementación en la planta.

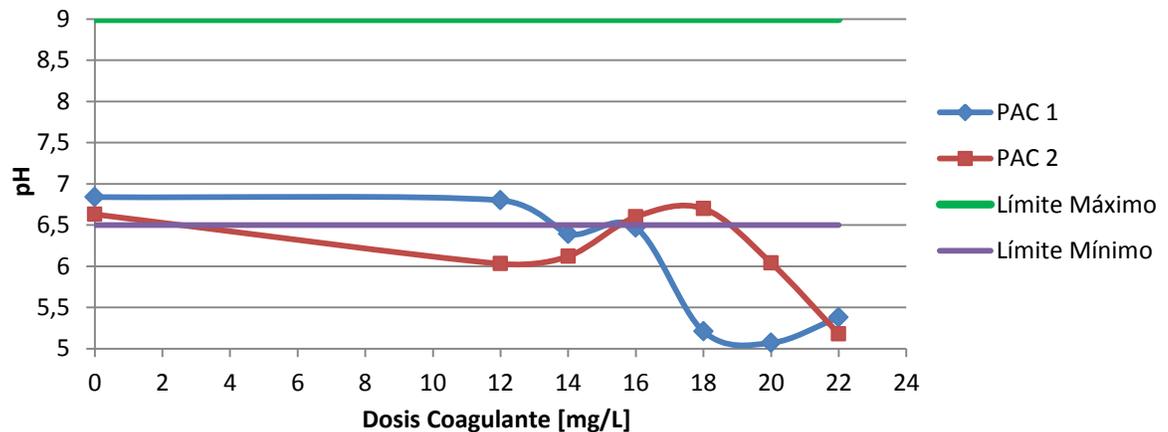
**Gráfica 15.** Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio con ácido sulfúrico



En las pruebas en las que se agregó ácido sulfúrico para la disminución del pH, permitió mejorar la remoción respecto al agua con cal agregada, en cuanto al parámetro de turbiedad en concentraciones de 10 mg/l a 14 mg/l, obteniendo valores dentro de los límites permitidos de 2 UNT como máximo.

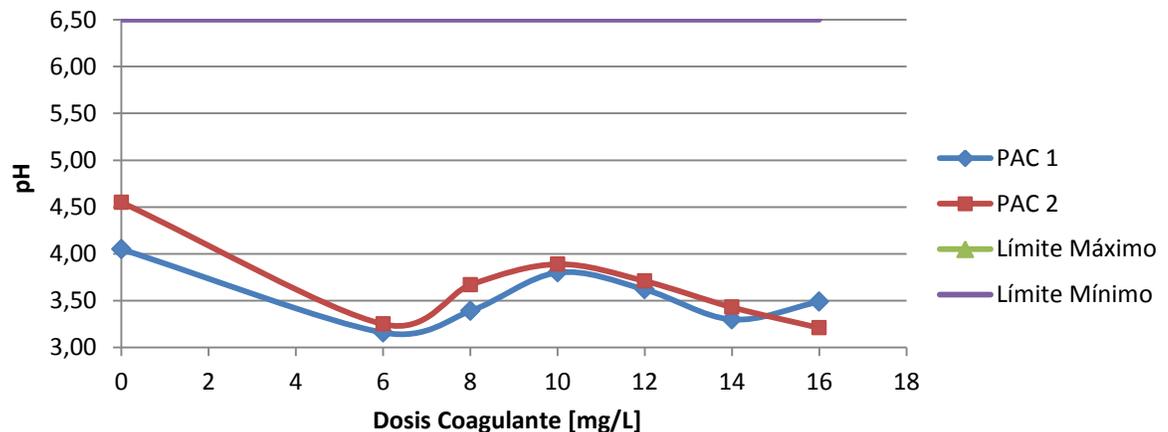
**4.2.3.3 pH.** De acuerdo al pH, el comportamiento en la gráfica 16 permite ver que a una dosis específicas se encuentra dentro de los límites máximo y mínimo permitidos, 9 y 6,5 unidades de pH respectivamente; y, en la gráfica 17, éste comportamiento es completamente diferente porque los resultados arrojan una medición menor a la permitida en los valores mínimos permitidos, tomando como base los resultados obtenidos en las tablas para este proceso.

**Gráfica 16.** Comportamiento del pH en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio con Cal



En la gráfica 16, al agregar mayor cantidad de cal en el agua cruda, la alcalinidad de ésta aumenta, aumentando también la interacción entre las partículas que reaccionan, pero afectan el comportamiento del pH porque el proceso dura más tiempo para que se dé la desestabilización y aglomeración de las partículas disminuyendo el valor de pH con el transcurrir del tiempo. Con ello, en las pruebas realizadas se observa una variación tanto en aumento como en disminución en el valor del pH, estando por fuera de los límites permitidos a concentraciones superiores a 14 mg/L.

**Gráfica 17.** Comportamiento del pH en las pruebas de jarras para el coagulante Policloruro de Aluminio con ácido sulfúrico



Al implementar el coagulante policloruro de aluminio junto con sustancias para modificar el pH, se observa que la reacción que ocurre entre éstas y las partículas suspendidas en el agua permite disminuir el pH durante el proceso hasta valores menores a 5,0 que se encuentran por fuera de la norma por lo que no hace posible su uso. Como puede observarse en la gráfica 17, en la que, al agregar un ácido, permite disminuir en gran medida el pH a valores inferiores al límite mínimo requerido.

Los resultados arrojados en las tablas y en las gráficas anteriores, permiten observar que no se ve favorecido el empleo de éste coagulante para éste tipo de agua cruda, porque no permite la formación de flóculos, impidiendo con esto la remoción de los parámetros influyentes en el agua a tratar. Aunque, con los resultados arrojados en éstas tablas, donde se permite la remoción de color y turbiedad dentro de los parámetros establecidos en la normatividad, la condición de pH está por debajo del límite mínimo al añadir ácido sulfúrico, evitando su uso por no cumplir con la normatividad y porque se requeriría agregar una etapa en el proceso para añadir un ácido al agua cruda antes de entrar al proceso de coagulación y después del proceso de filtración para estabilizarlo dentro de los límites permitidos, permitiendo así la formación de otros compuestos y aumento de costos en el tratamiento.

Para este coagulante, no se realizaron pruebas a dosis superiores a 22 mg/L, porque lo que se busca es una reducción en las concentraciones para ayudar en la disminución de costos a la empresa; y, debido a que éste coagulante es más costoso que el Sulfato de aluminio tipo B líquido actual, no sería una alternativa para sustituirlo.

**4.2.4 Alternativa coagulante Cloruro Férrico.** En la realización de ésta prueba de jarras los resultados permitieron observar el comportamiento de las dosis del coagulante de sal de hierro, Cloruro Férrico, respecto a los parámetros de importancia en la práctica.

Para éste coagulante, según se muestra en las tablas 27 y 28, se realizaron 4 pruebas diferentes variando la dosis de coagulante teniendo en cuenta las condiciones iniciales, para determinar concordancia o poca variabilidad en los resultados que se obtienen, y posteriormente se determinaron los porcentajes de remoción en la Tabla 41 para verificar la mejor dosis respecto a este coagulante. (Ver Anexo F).

**Tabla 27.** Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Cloruro Férrico a dosis de 4 mg/L a 14 mg/L.

Coagulante		Cloruro Férrico				
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 1</b>						
pH	6,67	Color (UPC)				29,4
Turbiedad (UNT)	3,16	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				16,23
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	4	6	8	10	12	14
Turbiedad Residual (UNT)	3,21	3,42	2,26	0,96	1,1	1,12
Color Residual (UPC)	43,9	48,2	38,2	15,3	18,4	20,3
pH	6,52	6,65	6,7	6,73	6,81	6,89
Hierro Residual	2,64	2,31	1,99	0,92	1,29	1,32
Turbiedad Filtrada (UNT)	2,32	2,41	1,27	0,25	0,46	0,52
Color Filtrado (UPC)	41,9	44	28,1	8,1	7,3	6,9
Hierro Filtrado	2	2,06	1,34	0,21	0,18	0,15
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 2</b>						
pH	6,74	Color (UPC)				30,9
Turbiedad (UNT)	3,11	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				16,05
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	4	6	8	10	12	14
Turbiedad Residual (UNT)	3,13	3,29	1,98	0,87	1,2	1,18
Color Residual (UPC)	40,9	45,6	39,8	15,8	19,3	22,5
pH	6,4	6,62	6,71	6,78	6,83	6,91
Hierro Residual	2,25	1,98	1,22	0,97	1,15	1,18
Turbiedad Filtrada (UNT)	2,1	2,19	0,83	0,23	0,45	0,31
Color Filtrado (UPC)	37,1	40,3	25,8	9,8	10,1	14,9
Hierro Filtrado	1,87	1,34	0,19	0,14	0,16	0,23

Inicialmente, se tomaron dosis desde 10 mg/L hasta 60 mg/L, variando en 10 mg/L en cada jarra; con éstos valores se observó que la coagulación y floculación a un índice de Willcomb de 4 ocurrió únicamente en la jarra 1 con una dosis de 10 mg/L; por lo que, posteriormente se hicieron variaciones en la concentración del coagulante empleado para cada jarra, abarcando desde 4 mg/L hasta 14 mg/L y de 8 mg/L hasta 18 mg/L, cantidades determinadas con base a la falta de formación de los flóculos de acuerdo al índice de Willcomb y a las concentraciones utilizadas actualmente en la planta de tratamiento de la Empresa EAF SAS ESP. Al requerir disminuir costos en la planta, se realiza el desarrollo experimental con menores cantidades de coagulantes químicos pero que también permitan generar una buena coagulación-floculación respetando los límites permisibles de la norma al obtener mayores porcentajes de remoción después del proceso.

**Tabla 28.** Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Cloruro Férrico a dosis de 2 mg/L a 12 mg/L.

Coagulante		Cloruro Férrico				
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 3</b>						
pH	6,73	Color (UPC)				31,6
Turbiedad (UNT)	3,07	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				15,92
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	8	10	12	14	16	18
Turbiedad Residual (UNT)	2,39	1,14	0,98	1,07	3,26	3,93
Color Residual (UPC)	38,3	17,4	16,9	10,2	54,1	59,1
pH	6,7	6,62	6,46	6,13	5,85	5,97
Hierro Residual	2,04	1,12	1,14	1,21	2,5	2,55
Turbiedad Filtrada (UNT)	0,84	0,16	0,23	0,12	0,15	0,2
Color Filtrado (UPC)	21,1	7,6	6,7	5,2	6,9	7,3
Hierro Filtrado	1,07	0,23	0,21	0,16	0,23	0,23
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 4</b>						
pH	6,85	Color (UPC)				28,9
Turbiedad (UNT)	3,24	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				18,35
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	8	10	12	14	16	18
Turbiedad Residual (UNT)	2,19	1,1	0,85	0,98	3,1	3,58
Color Residual (UPC)	37	19,3	17,1	11,3	49,3	53,4
pH	6,65	6,6	6,51	6,42	6,1	5,85
Hierro Residual	2,1	0,95	0,97	1,18	1,23	1,9
Turbiedad Filtrada (UNT)	2,19	1,1	0,85	0,98	3,1	3,58
Color Filtrado (UPC)	25,3	13,2	12,1	7,5	9,2	11,3
Hierro Filtrado	0,98	0,21	0,28	0,31	0,38	0,41

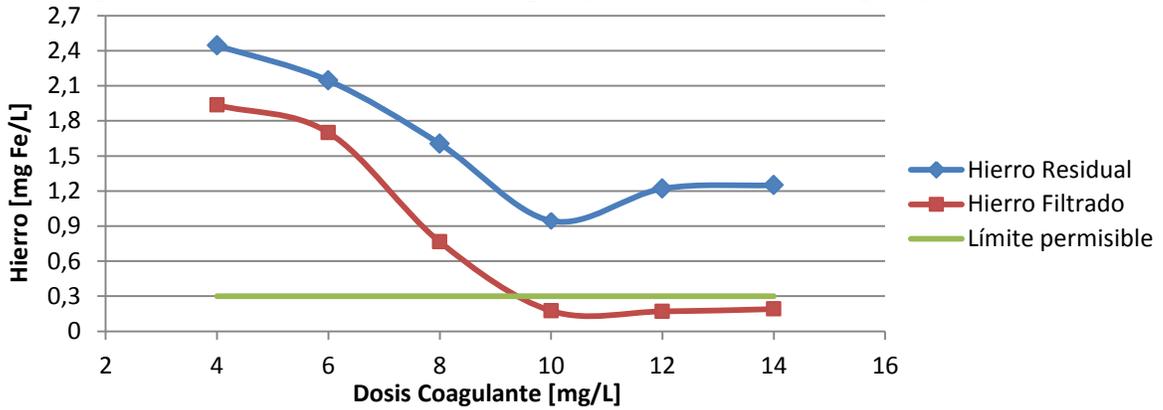
**4.2.4.1 Hierro residual.** De acuerdo a éste parámetro, al ser un coagulante con contenido de hierro, se hace importante determinar su remoción con el fin de hacer cumplimiento con la norma vigente, cuyo valor debe ser máximo 0,3 mg/L. En las tablas anteriores, se muestran estos resultados de acuerdo a las pruebas de hierro realizadas, observándose que para el hierro residual se estaría superando los límites máximos permitidos y no sería posible su uso.

Con la posterior filtración se busca reducir las concentraciones de hierro en el agua clarificada empleando papel de filtro con embudos para hacer la filtración a cada una de las muestras a pequeña escala, con el fin de observar si las partículas de hierro indeseadas quedan retenidas en el mismo, resultados observados en las tablas anteriores para el Hierro filtrado.

En las gráficas 18 y 19 se presentan los resultados de la filtración realizada en el laboratorio, obteniéndose una reducción en el contenido de hierro por debajo del límite permisible de 0,3 mg/l a concentraciones del Cloruro Férrico de 10 mg/L a 14 mg/L. En las variaciones entre las dosis para cada jarra, se observa que tanto una concentración muy pequeña como una concentración alta, eleva los

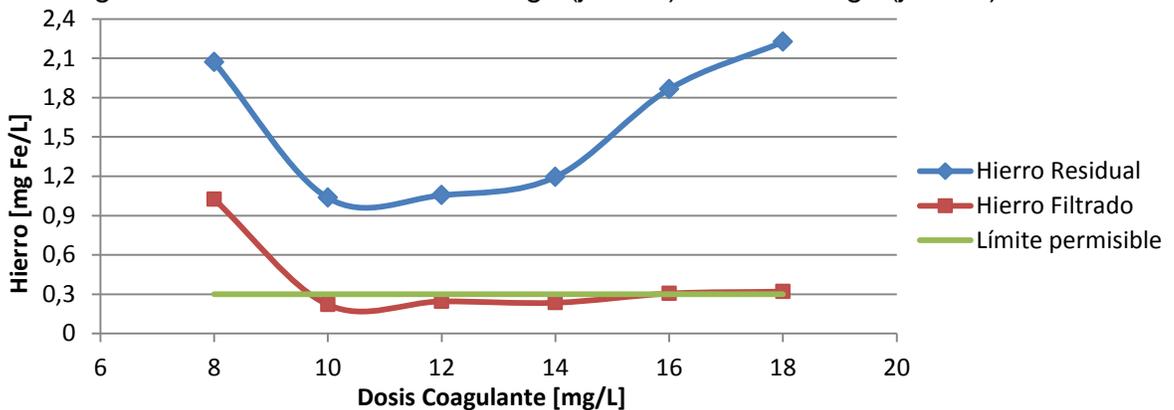
parámetros por fuera de la norma establecida o no genera una buena floculación, minimizando la posibilidad de precipitación de las partículas coloidales.

**Gráfica 18.** Resultados de Hierro en la filtración de las muestras empleando dosis de coagulante Cloruro Férrico de 4 mg/L (jarra 1) hasta 14 mg/L (jarra 6).



En las gráficas 18 y 19, se presentan los resultados que muestran la comparación entre el proceso de clarificación y su posterior filtración para determinar si éste proceso ayuda a disminuir el contenido de hierro en el agua tratada; para éste coagulante, a dosis entre 10 mg/L y 14 mg/L se logra una remoción por debajo de los límites permitidos; valores menores o superiores a estas dosis, se presentan porque al aplicar exceso de coagulante se generará un exceso en el residual de hierro después del proceso de clarificación debido a la falta de partículas coloidales que puedan interactuar con el coagulante, dejando un remanente de hierro en el agua aún después de filtrar las muestras.

**Gráfica 19.** Resultados de Hierro en la filtración de las muestras empleando dosis de coagulante Cloruro Férrico de 8 mg/l (jarra 1) hasta 18 mg/l (jarra 6)

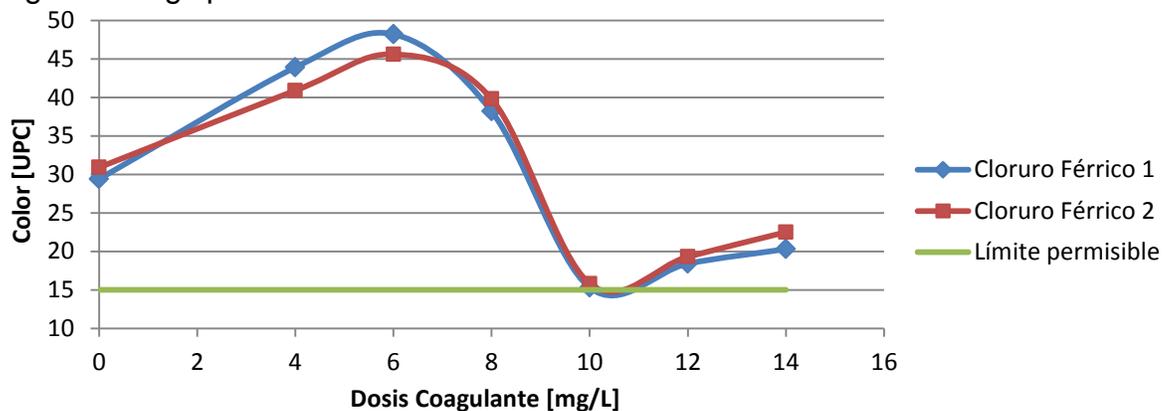


**4.2.4.2 Color.** De acuerdo al parámetro de color, los resultados arrojados en las tablas, permiten observar que la mayor remoción ocurre a una dosis entre 10 mg/L y 14 mg/L. En la gráfica 20, se observó remoción en el color pero quedando aún

por encima del valor máximo de 15 UPC presentado en la Resolución 2115, estableciendo que no es factible su empleo porque no es posible entregar un agua a la población con estas características. En cambio, en la gráfica 21 la remoción de color quedó por debajo del límite de 15 UPC a una dosis de 14 mg/L.

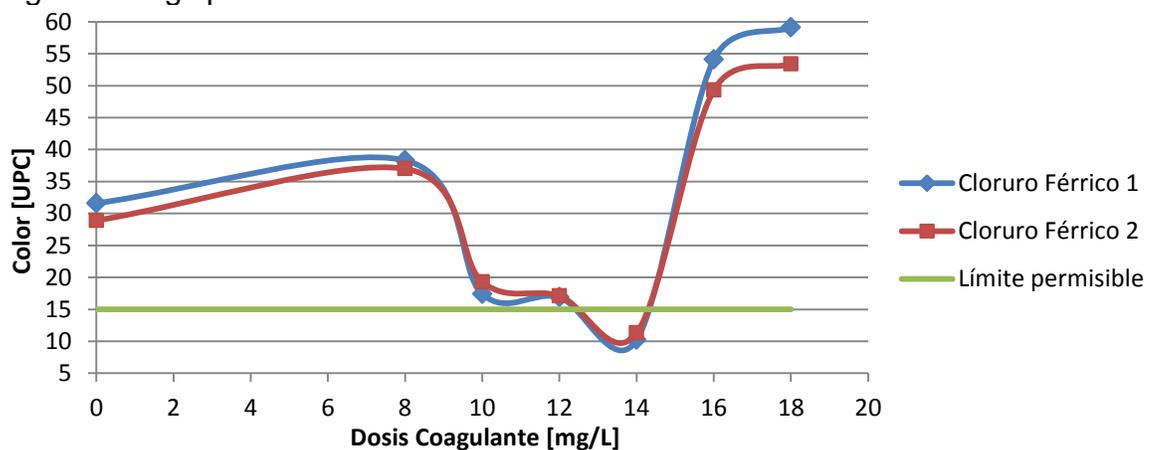
Pero, posterior a la filtración, los resultados para el color presentados también en la Tabla 41 (Ver Anexo F) muestran una mayor reducción expresados en porcentajes de color removido, quedando dentro del límite de 15 UPC a una dosis óptima mínima de 10 mg/L, logrando con ello poder realizar su aplicación para éste tipo de agua cruda.

**Gráfica 20.** Comportamiento del color en las pruebas de jarras en las dosis de 4 mg/l a 14 mg/l para el Cloruro Férrico



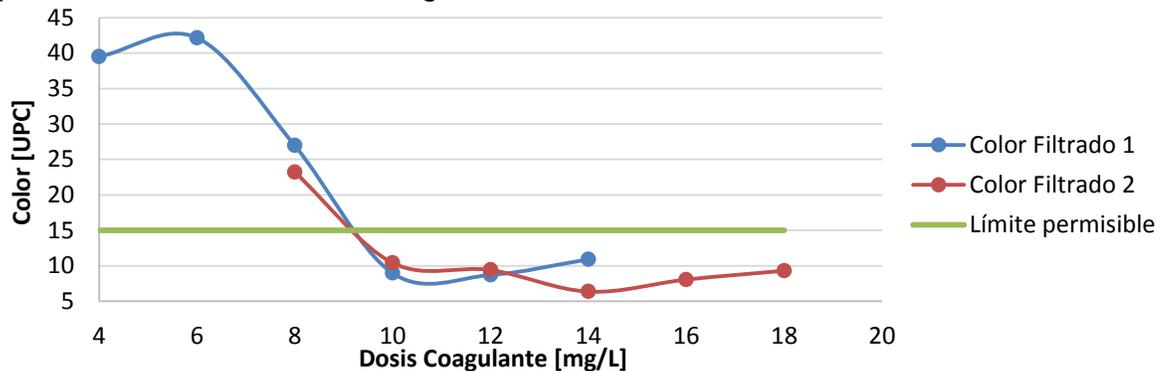
En la gráfica 20, para cada una de las pruebas en este intervalo de dosificación, se presentó una remoción eficiente a una dosis de 10 mg/L, pero con el aumento de la concentración afectó también la cantidad de color en el agua al haber un exceso de coagulante en el agua que no pudo retener todas los minerales que se encontraban en la misma.

**Gráfica 21.** Comportamiento del color en las pruebas de jarras en las dosis de 8 mg/l a 18 mg/l para el Cloruro Férrico



En esta gráfica, el comportamiento de remoción del color disminuyó en concentraciones superiores a 12 mg/L e inferiores a 14 mg/L, valor después del cual se disparó el contenido del color en el agua tratada pasando de 11,3 UPC a 51 UPC aproximadamente; lo cual permite verificar que las concentraciones en las que se puede emplear el coagulante cloruro férrico varía de 10 a 14 mg/L, dosis en las que se obtienen remociones eficientes dentro de 15 UPC que es el límite permitido.

**Gráfica 22.** Resultados promedio para el color luego de la filtración en todas las pruebas realizadas con el coagulante cloruro férrico

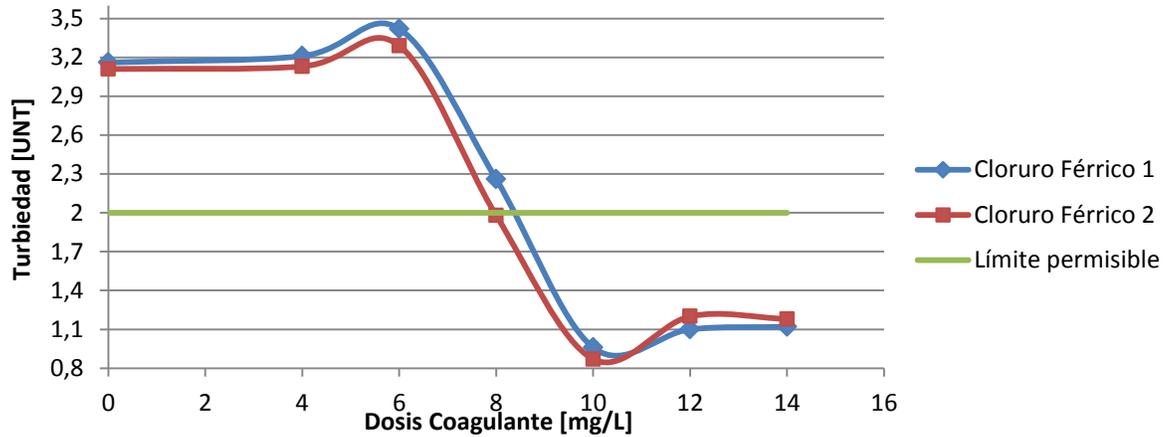


En la gráfica 22, se tomaron en cuenta los resultados promedios para cada una de las dosis trabajadas en los ensayos de jarras del proceso de filtración a pequeña escala con el fin de determinar si las partículas minerales quedaban retenidas en el filtro disminuyendo así el contenido del parámetro de color; esto ocurrió en dosificaciones iguales y superiores a 10 mg/L a partir de las cuáles el color filtrado se encuentra dentro de los límites permitidos, y cuya mejor dosis se encuentra en el intervalo de 10 a 14 mg/L en las que se obtuvieron las mayores remociones.

**4.2.4.3 Turbiedad.** Se realiza el mismo tratamiento para la turbiedad obteniendo resultados tanto para turbiedad residual como para turbiedad filtrada mostrados en las tablas anteriores. Además de observar el porcentaje de remoción para este parámetro, cuyo mayor porcentaje permite mayores eficiencias en el tratamiento de potabilización de agua.

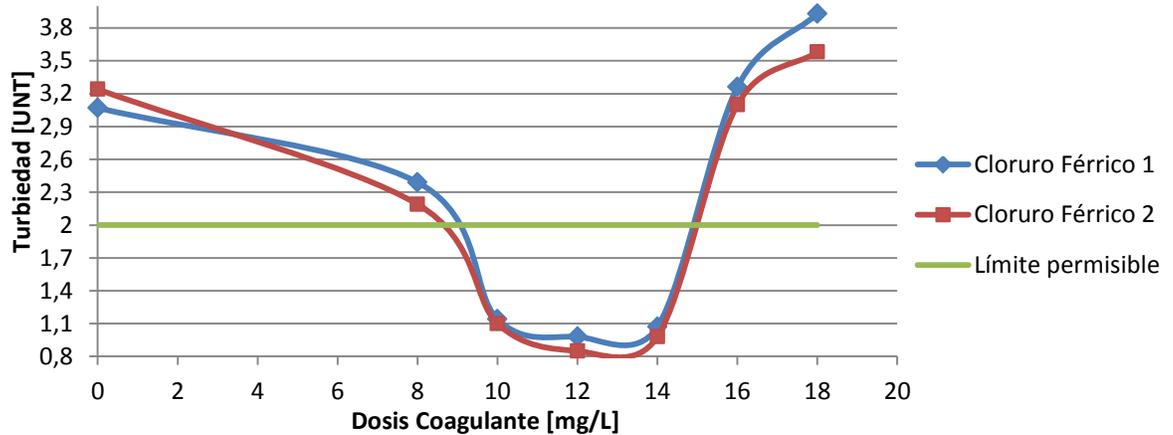
En las gráficas del comportamiento de la turbiedad (Gráfica 23 y Gráfica 24), se muestra relación entre las dosis de coagulantes de 10 mg/L y 12 mg/L en las que se obtienen las mayores remociones de éste parámetro a porcentajes de 96%, según la tabla 41, resultados menores al límite máximo permitido de 2 UNT generando factibilidad para utilizar este coagulante a esas concentraciones en la planta de tratamiento.

**Gráfica 23.** Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras desde la muestra de agua cruda hasta la clarificación en las dosis de 4 a 14 mg/l para el Cloruro Férrico



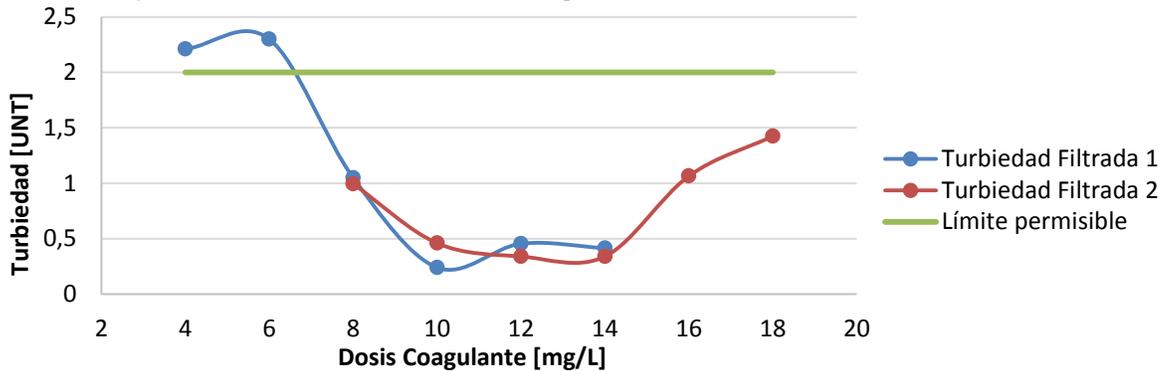
En la gráfica 23, el comportamiento de la turbiedad muestra inicialmente en el agua cruda (0 mg/L) valores superiores a 3,0 UNT, en la cual, al aplicar el coagulante cloruro férrico permite reducir su contenido hasta valores entre 0,86 y 1,20 UNT en dosis de 10 mg/L a 14 mg/L en las que las remociones fueron mayores respecto a la inicial.

**Gráfica 24.** Comportamiento de la turbiedad en las pruebas de jarras desde la muestra de agua cruda hasta la clarificación en las dosis de 8 a 18 mg/l para el Cloruro Férrico



En la gráfica 24, el comportamiento es similar obteniendo eficientes remociones de turbiedad a dosis entre 10 y 14 mg/L con resultados de turbiedades entre 0,85 UNT y 1,25 UNT que se encuentran dentro del límite permitido de 2 UNT, valor después del cual se genera un aumento en el parámetro que reduce la transparencia del agua por las partículas en suspensión que no lograron interactuar con el coagulante y ser retenidas por el mismo.

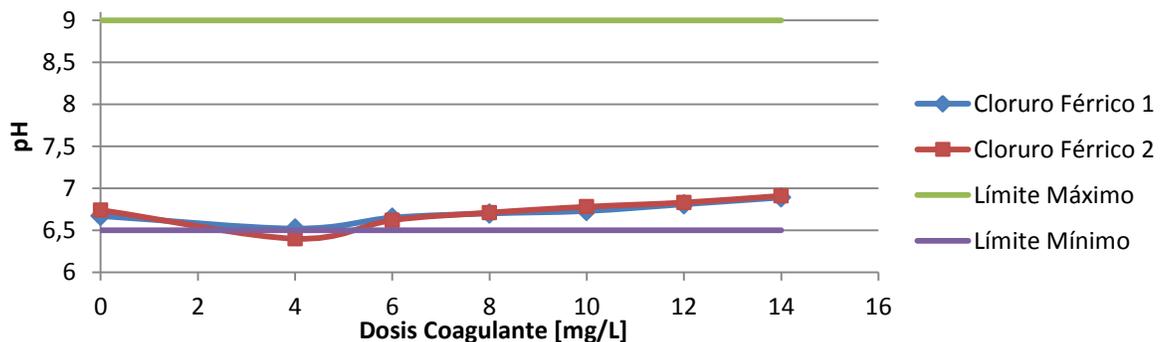
**Gráfica 25.** Resultados promedio de la turbiedad después de la filtración para todas las pruebas realizadas con el coagulante cloruro férrico



En la gráfica 25, los resultados promedios presentados para la turbiedad luego de realizada la filtración en cada prueba con intervalo de dosificación diferente entre 4 a 14 mg/L y 8 a 18 mg/L para el coagulante cloruro férrico, muestra que en el agua clarificada se disminuye la cantidad de partículas coloidales al hacerla pasar por medios filtrantes que las retienen y permiten obtener remociones mayores, permitiendo con ello poder emplear éste coagulante para éste tipo de agua cruda si se realiza una etapa posterior de filtración.

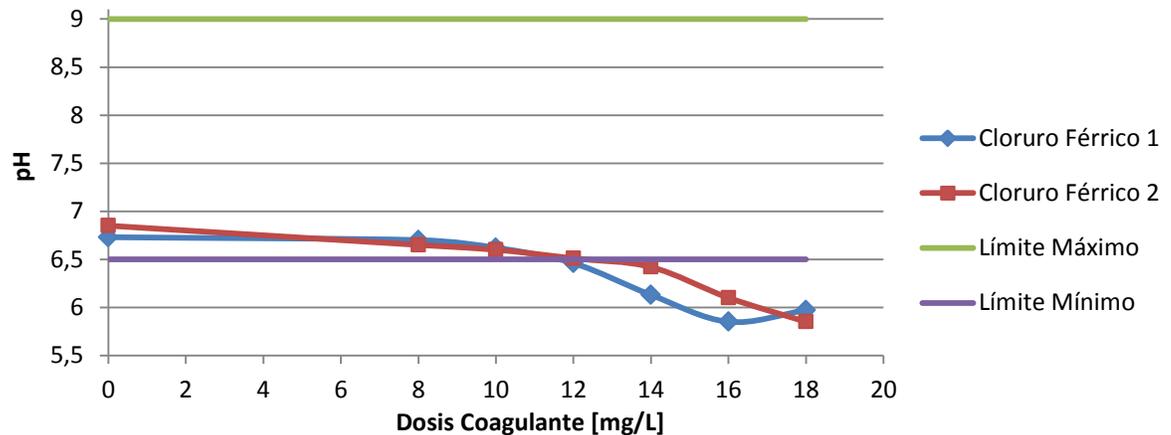
**4.2.4.4 pH.** Las mediciones realizadas para el agua cruda y el agua clarificada de acuerdo al pH se presentan en las anteriores tablas, cuyos datos permiten establecer en las gráficas 26 y 27 la relación entre los intervalos de dosis aplicados a cada una de las jarras, su pH tanto inicial como final y los límites permisibles en la resolución 2115, observándose para las pruebas en ambos intervalos de concentraciones de Cloruro Férrico, que podría emplearse entre los 6 mg/L a 12 mg/L, valor después del cuál el pH residual sufre una disminución mayor respecto al valor mínimo permitido que es de 6,5; con ello, el coagulante Cloruro Férrico puede emplearse a concentraciones más bajas que las empleadas actualmente, sin alejarse de los rangos establecidos en la Resolución 2115 de 2007.

**Gráfica 26.** Comportamiento del pH en las pruebas de jarras para el coagulante Cloruro Férrico en dosis de 4 mg/l a 14 mg/l



En la gráfica 26, se presenta el comportamiento del pH cuyo pH inicial oscilaba entre 6,60 y 6,75 unidades de pH. Al agregar el coagulante cloruro férrico, se mantuvo dentro de los límites permisibles mínimos y máximos a concentraciones superiores a 6 mg/L, indicando que, es posible aplicarlo en cualquiera de éstas dosis porque no variará notoriamente éste parámetro durante el proceso de clarificación.

**Gráfica 27.** Comportamiento del pH en las pruebas de jarras para el coagulante Cloruro Férrico en dosis de 8 mg/l a 18 mg/l



En esta gráfica, el comportamiento del pH varía respecto a las pruebas anteriores a valores superiores a 12 mg/L, valores después del cual disminuye por fuera de los límites permitidos, a razón de que, al agregar un coagulante al agua cruda, el pH tiende a disminuir por la acidificación de la molécula coagulante; por ello, a elevadas concentraciones, la disminución del pH va a aumentar, siendo inversos.

**4.2.5 Discusión del desarrollo experimental.** El desarrollo experimental permitió observar la variación que tenían los parámetros de influencia en el agua cruda como el color, el pH, la turbiedad y el hierro residual durante el desarrollo de las alternativas de coagulantes a sustituir.

Para este desarrollo, se tuvo en cuenta por revisión bibliográfica, las ventajas y desventajas del empleo de coagulantes en los diferentes tipos de agua existentes. Con ello, se busca determinar con las alternativas su dosis adecuada para el efectivo tratamiento del agua potable, que genere una menor cantidad de color, hierro y turbiedad a menores concentraciones de coagulante. Durante el proceso de la investigación, las sales metálicas empleadas como coagulantes en el tratamiento, fueron Policloruro de Aluminio, Cloruro Férrico y Sulfato Férrico, sales encontradas en mayor proporción en esta industria.

Las alternativas cuyos resultados generaron menores concentraciones para emplearse en la planta de tratamiento a menores valores en los parámetros

influyentes del agua tratada, fueron el Sulfato Férrico y el Cloruro Férrico, en los que, aunque su contenido de Hierro al realizar la prueba de jarras superó los límites permisibles, se pudo observar que en el proceso posterior de la filtración, éste contenido queda retenido gracias a los medios filtrantes empleados; pudiendo emplearse en este tipo de agua cruda con baja turbiedad y baja alcalinidad, requiriéndose menores cantidades del Sulfato férrico y del Cloruro férrico respecto al Sulfato de aluminio utilizado actualmente.

En la prueba de jarras, se logró determinar que las dosis óptimas de trabajo del Sulfato férrico como coagulante seleccionado, se encuentra en los 8 mg/L, y la dosis óptima para el Cloruro férrico es de 10 mg/L, concentraciones menores a las empleadas actualmente, permitiendo reducir cantidades de químicos en el agua.

Según los resultados mostrados en las tablas 22 a 27 y 37 a 41, el color y la turbiedad entre éstas dosis específicamente se encuentran dentro de los límites máximos permisibles en el tratamiento, y la cantidad de hierro presente al finalizar la etapa de coagulación supera su valor máximo; al realizar la filtración su reducción mejora estando dentro de los parámetros permitidos en la Resolución 2115 de 2007, y favoreciendo su uso en la planta de tratamiento.

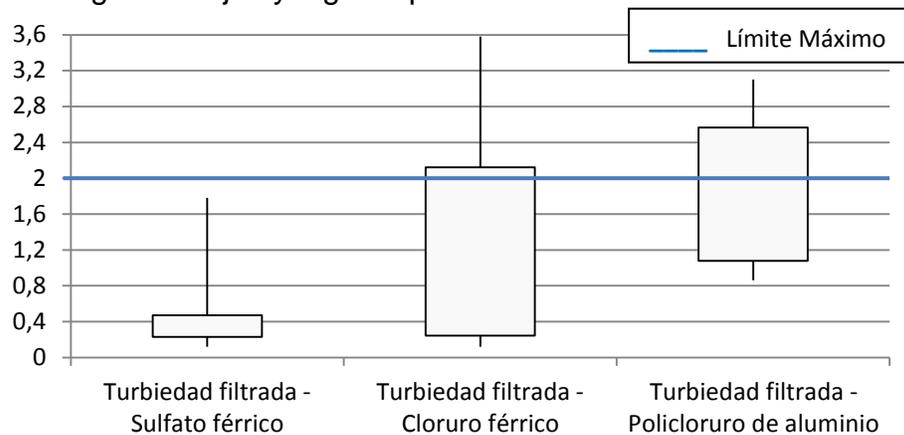
Estos coagulantes metálicos a base de sales de Hierro, tienen actualmente una amplia acogida en los tratamientos de agua, ofreciendo eficiencias en las remociones de turbiedad y color, generando una mayor velocidad de sedimentación y la formación de flóculos de mayor tamaño para su precipitación, adicional a la ventaja de encontrar los productos químicos en presentación líquida que permite la no generación de una nueva etapa en el tratamiento para la disolución de los mismos, facilitando su preparación y dosificación.

**4.2.5.1 Diagramas de cajas y bigotes.** De acuerdo a las alternativas, se realizan diagramas estadísticos de cajas y bigotes que permiten observar el rango en el que los resultados son factibles y se encuentran por debajo de los límites permitidos para cada parámetro. En la gráfica 28, se evidencia que la turbiedad cumple con los parámetros estando el 75% de los datos en un rango mayor a la mediana de 0,17 para la filtración con Sulfato Férrico, mayor a 1,28 para la filtración empleando Cloruro Férrico, y también por debajo de lo que estipula la norma, generando que se pueda emplear en la planta de tratamiento. Lo mismo sucede con los valores para el color final filtrado en la Gráfica 29, que no sobrepasa los límites establecidos en la resolución 2115 de 2007. En la Gráfica 30, nos concentramos en el 25% de los datos que se encuentran antes de la mediana, debido a que se requiere un cumplimiento de la norma respecto al parámetro de Hierro, y por debajo de la mediana de 0,35, éste requerimiento es cumplido. Por lo que, con estos gráficos se logra observar que las alternativas que cumplen con las normas establecidas son Sulfato Férrico y Cloruro Férrico, debido a que el Policloruro de Aluminio supera los rangos máximos para su implementación en este tipo de agua cruda. Por ello, las alternativas escogidas

son el Sulfato Férrico y el Cloruro Férrico, cuyas dosis son menores a las empleadas actualmente, siendo posible su uso.

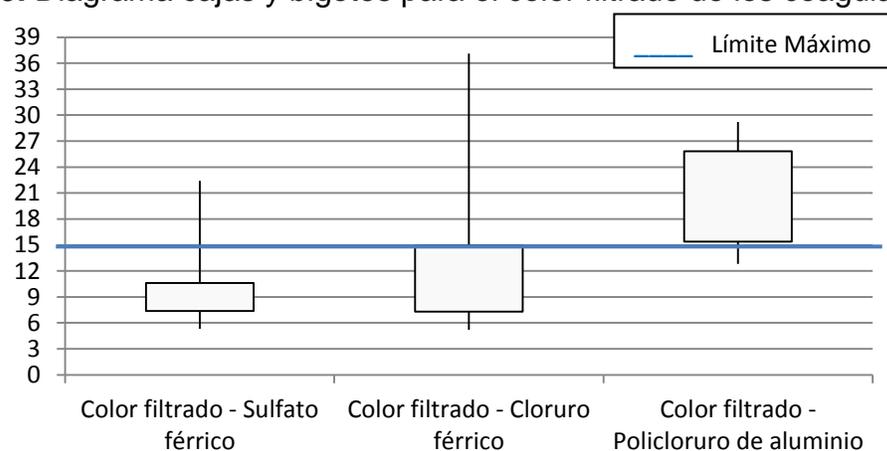
La turbiedad, el color, el hierro residual, y el pH al ser los parámetros más importantes, se observa que, para los límites permisibles, el coagulante que menos eficiencia generaría en el proceso sería el Policloruro de Aluminio en relación con los otros dos.

**Gráfica 28.** Diagrama cajas y bigotes para la turbiedad filtrada de los coagulantes



De acuerdo a los resultados arrojados para la turbiedad después de la filtración en las mejores dosis para cada uno de los coagulantes, se observa que el sulfato férrico genera mayores eficiencias al remover la turbiedad en el agua cruda, dentro de los límites máximos permitidos; seguido del cloruro férrico cuya implementación en la potabilización permite remover las partículas coloidales vinculadas con el agua para proporcionar agua de calidad.

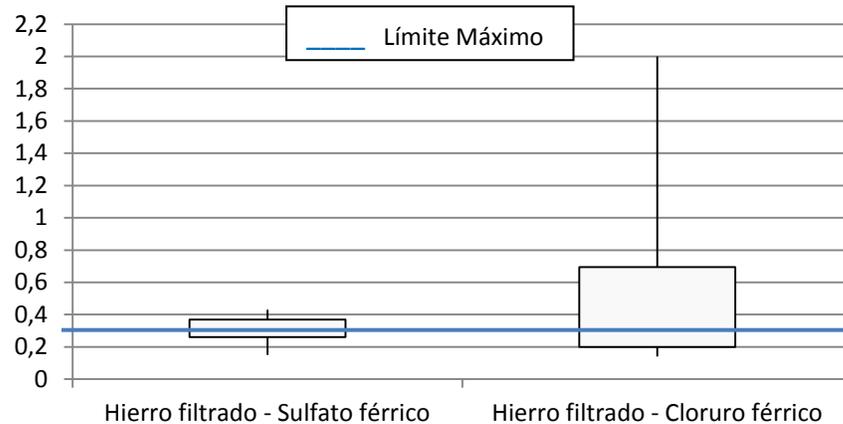
**Gráfica 29.** Diagrama cajas y bigotes para el color filtrado de los coagulantes



Para el color luego de la filtración, tanto el sulfato férrico como el cloruro férrico, son coagulantes que pueden implementarse en la planta de tratamiento EAF

porque remueve los minerales y la materia orgánica del agua cruda proporcionando agua con estándares de calidad por debajo de los límites permitidos; situación que no favorece al policloruro de aluminio, porque el proceso con éste coagulante no permitió remociones en el agua, evitando su uso para el tipo de agua caracterizada.

**Gráfica 30.** Diagrama cajas y bigotes para el Hierro Filtrado de los coagulantes

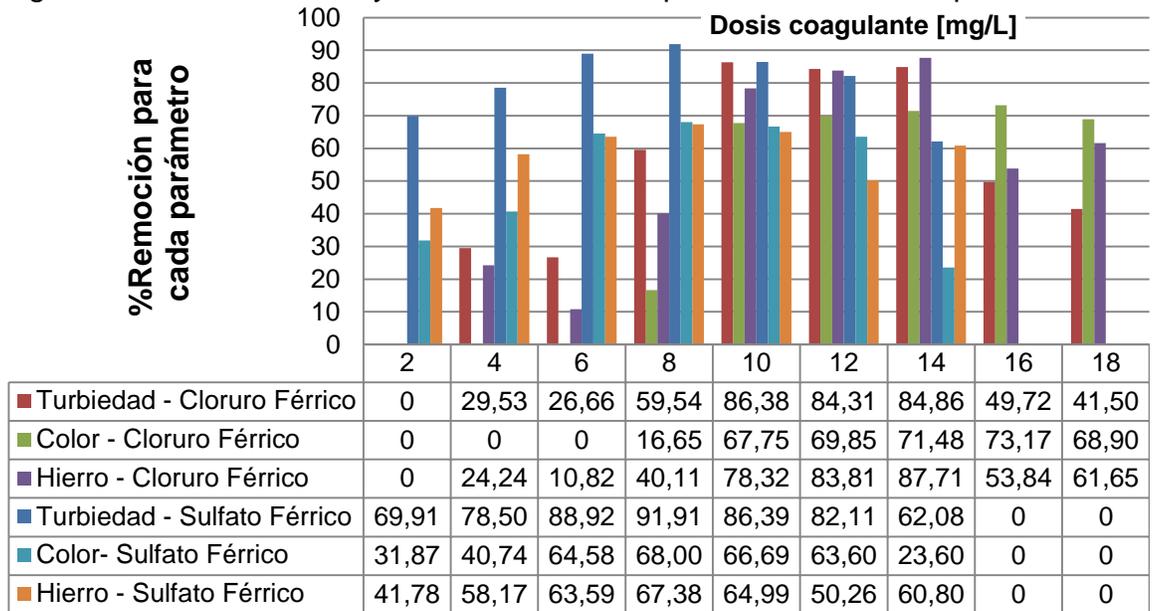


Finalmente, para la remoción de Hierro (Gráfica 30), se tiene en cuenta la filtración realizada para los coagulantes con contenido de hierro en su molécula con la finalidad de remover éste elemento del agua para evitar afectaciones en la salud humana con lo que, el Sulfato Férrico logra remociones con los datos dentro del rango máximo permitido de 0,3 mg Fe/L respecto al cloruro férrico cuyo rango es más elevado.

Con base en los resultados de las tablas 37 a 41 (Ver Anexos D, E y F) para ambos coagulantes respecto a los porcentajes removidos, en la Gráfica 31 se presentan los datos con el fin de mostrar que respecto a cada uno de los parámetros de influencia que se estudiaron, las remociones alcanzaron un porcentaje máximo de 92%, 68% y 67% para el Sulfato Férrico y de 86%, 73% y 88% para el Cloruro Férrico de acuerdo a la turbiedad, color e hierro respectivamente, porcentajes elevados que hacen denotar su posible empleo en la planta de tratamiento.

Teniendo en cuenta las tablas 32 y 33 del Anexo C, en las que se especifica la experimentación realizada para el Sulfato de Aluminio actual, se logra encontrar un máximo porcentaje de remoción de 81% para la turbiedad y 82% para el Color, mostrando que las remociones para las alternativas son mayores a éste producto químico.

**Gráfica 31.** Porcentaje de remoción para cada uno de los parámetros de los coagulantes Sulfato Férrico y Cloruro Férrico respecto a las dosis empleadas



Debido a que el porcentaje de remoción de turbiedad indica la eficiencia del sistema de clarificación, se obtienen las dosis óptimas al tener porcentajes de remoción de turbiedad elevados en el agua tratada para cada coagulante, corroborando las características de mayor poder coagulante que tienen ambos insumos para formar flóculos más densos aumentando su velocidad de sedimentación, garantizando que la turbiedad del agua clarificada será siempre menor que la del agua cruda.

Esta dosis de coagulante da pie a la buena realización del proceso de coagulación y posterior floculación, debido a que como parámetro crítico, si se adiciona por debajo de lo requerido, no se neutralizan totalmente las cargas de las partículas, impidiendo la formación de microfloculos y con ello la elevación de la turbiedad del agua tratada; si se adiciona en exceso, se produce la inversión de las cargas de las partículas y la sucesiva formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños y velocidades de sedimentación muy bajas, elevando la turbiedad del agua tratada<sup>51</sup>.

<sup>51</sup> COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclorigenato de aluminio. En: Portal de revistas UN bdigital - Facultad de Minas – UNALMED. Octubre 5 de 2010. DYNA, Volumen 78, Número 165, p. 18-27, 2011. ISSN electrónico 2346-2183. ISSN impreso 0012-7353 [en línea] <<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>> [Citado el 2 de Mayo 2017]

## 5. ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO EN LA PLANTA

Para realizar la estimación del desempeño de las dos mejores alternativas coagulantes seleccionadas en la planta de tratamiento de agua potable de acuerdo al desarrollo experimental respecto al sulfato de aluminio tipo b actual, se deben tener en cuenta las condiciones de operación en el proceso de clarificación y las características fisicoquímicas de influencia en el agua cruda y el agua tratada (pH, turbiedad, alcalinidad total, color, hierro y aluminio residual) para lograr una buena clarificación.

De acuerdo a las características fisicoquímicas estudiadas, en la tabla 29 se presentan los resultados obtenidos para ambos coagulantes después de realizar el proceso de coagulación y floculación, y su posterior filtración para reducir la remoción de Hierro con base en las mejores dosis fijadas. Determinados con el fin de establecer si las remociones de cada parámetro se encuentran dentro de los límites mínimos y máximos permitidos para entregar agua tratada de calidad. Con base en la desviación estándar, se denota que la dispersión en los datos es menor en el Sulfato Férrico que en la variabilidad con el Cloruro Férrico, bajo un promedio de 0,056 UNT, 2,285 UPC y 0,063 mg Fe/L para el Sulfato Férrico; y, 0,063 UNT, 2,53 UPC y 0,0395 mg Hierro/L para el Cloruro Férrico.

**Tabla 29.** Resultados obtenidos transcurrido el proceso de clarificación y posterior filtración

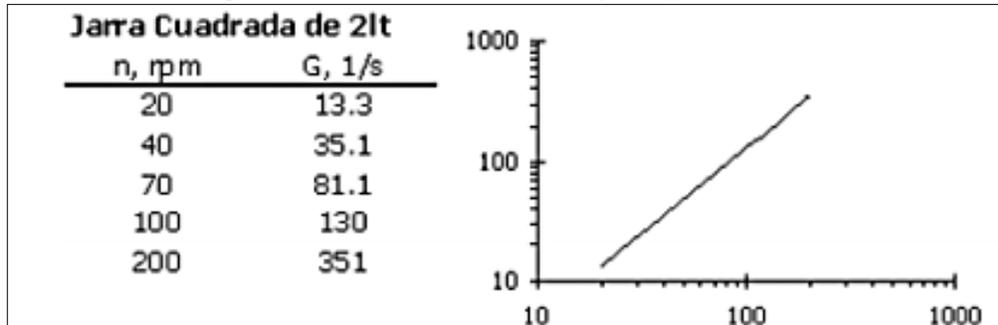
COAGULANTE	PARÁMETRO FILTRADO	PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	Desviación Estándar
SULFATO FÉRRICO	Turbiedad	0,455	1,25	0,12	0,056
	Color	11,246	12,5	5,4	2,285
	pH	6,49	6,97	6,4	0,162
	Hierro	0,484	0,38	0,19	0,063
CLORURO FÉRRICO	Turbiedad	1,118	1,14	0,16	0,445
	Color	16,988	13,2	7,6	2,53
	pH	6,517	6,78	6,6	0,0865
	Hierro	0,607	0,23	0,14	0,0395

### 5.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Teniendo en cuenta que, para el proceso de clarificación se busca tener una alta eficiencia para entregar agua potabilizada de calidad a la población, las condiciones de operación de los equipos y coagulantes empleados reflejan este comportamiento en el proceso. Para éste caso, se busca verificar cuál cumple en mejor medida con una eficiencia y un rendimiento elevado, realizando una comparación entre las características de cada variable en el proceso para ambos coagulantes seleccionados.

Los gradientes de velocidad para la planta de tratamiento están fijos en 40, 30 y 20 s<sup>-1</sup> para el proceso de mezcla lenta; por ello, Lorenzo-Acosta, Yaniris<sup>52</sup>, sugiere que para jarras cuadradas como las empleadas actualmente en el ensayo de jarras, los valores de gradiente en función de la velocidad de la agitación sean de acuerdo a los presentados en la figura 9.

**Figura 11.** Determinación del gradiente de velocidad en función de la velocidad de agitación a nivel laboratorio para jarras cuadradas de 2 L



**Fuente.** ACOSTA, Lorenzo. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación – floculación.

De acuerdo a estos valores fijados en la literatura, se determina la velocidad de agitación para cada gradiente de velocidad establecido en los equipos de la planta de tratamiento, teniendo en cuenta la pendiente de la recta:

### Muestra de cálculo

$$\text{pendiente } (m) = \frac{(G_2 - G_1)}{(rpm_2 - rpm_1)} = \frac{130 - 13.3}{100 - 20} \rightarrow m = 1,459$$

$$[rpm \text{ a } 40s^{-1}] = rpm_2 - \frac{(G_2 - G_1)}{m} = 100 - \frac{130 - 40}{1,459} = 38 \text{ rpm}$$

Teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos, a continuación, se muestra en la tabla 30 los valores de los parámetros que se tienen en cuenta en el proceso de las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta en la planta de tratamiento para ambas alternativas. En ésta tabla se observa que, según la literatura del estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación de Lorenzo Acosta, las velocidades de agitación pueden disminuir según el gradiente de la unidad de floculación para obtener la desestabilización y formación más rápida de flóculos de gran peso para su fácil sedimentación.

<sup>52</sup> ACOSTA, Lorenzo. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación – floculación. Redalyc, 2006. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XL, núm. 2, mayo-agosto, 2006, pp. 10-17 [en línea] < <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf> > [Citado el 20 de Mayo de 2017]

**Tabla 30.** Resultados para los parámetros que sirven de base en el proceso

VARIABLE	UNIDADES	SULFATO FÉRRICO	CLORURO FÉRRICO
Caudal agua cruda	[L/s]	280	280
Concentración coagulante	[mg/L]	8	10
Velocidad de agitación mezcla lenta – Floclador 1	[rpm]	40	40
Gradiente mezcla lenta	[1/s]	38	38
Tiempo mezcla lenta	[min]	20	20
Velocidad de agitación mezcla lenta – Floclador 2	[rpm]	30	30
Gradiente mezcla lenta	[1/s]	31,5	31,5
Tiempo mezcla lenta	[min]	7,5	7,5
Velocidad de agitación mezcla lenta – Floclador 3	[rpm]	20	20
Gradiente mezcla lenta	[1/s]	13,3	13,3
Tiempo mezcla lenta	[min]	7,5	7,5
Velocidad de agitación mezcla rápida	[rpm]	80	80
Gradiente mezcla rápida	[1/s]	100	100
Tiempo mezcla rápida	[min]	1	1
Tiempo de mayor sedimentación	[min]	20	20

**5.1.1 Flujo de coagulante y Flujo acondicionador de pH.** Son variables que dependerán de la concentración óptima que se logró determinar en los ensayos de jarras realizados. Los coagulantes se pueden añadir en forma pura o diluida hasta un 5%, aunque ello puede afectar su estabilidad y capacidad reactiva. Para el caso de un acondicionador de pH, se recomienda usar uno de naturaleza líquida como la soda cáustica<sup>53</sup>, para facilitar su manejo.

Para este caso, las dosis óptimas requeridas son 8 mg/L y 10 mg/L para el Sulfato Férrico y para el Cloruro Férrico respectivamente. De acuerdo al acondicionador de pH, en las pruebas de jarras se utilizó agua con contenido de Cal para mantener estable las condiciones de pH y turbiedad.

**5.1.2 Velocidad de Agitación.** Es un criterio aplicado a los equipos de floculación relacionado directamente con el número de choques entre las partículas sólidas encontradas suspendidas en el agua. Por eso, sí se tienen coagulantes que permiten la formación de flóculos más densos y de mayor tamaño respecto al Sulfato de Aluminio actual a mayores velocidades de sedimentación, se puede operar el equipo con menores velocidades de agitación. Para su determinación se tienen en cuenta características como el patrón de flujo en el equipo y las características fisicoquímicas del agua cruda que ingresa a la planta de tratamiento.

<sup>53</sup> COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *En:* Portal de revistas UN bdigital - Facultad de Minas – UNALMED. Octubre 5 de 2010. DYNA, Volumen 78, Número 165, p. 18-27, 2011. ISSN electrónico 2346-2183. ISSN impreso 0012-7353 [en línea] <<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>> [Citado el 2 de Mayo de 2017]

La velocidad de agitación para la planta de tratamiento EAF SAS ESP está estipulada por los gradientes de velocidad de los tres (3) filtros utilizados, iniciando con 100 rpm, seguido de 40, 30 y 20 rpm, valores que determinan que a una mayor velocidad de agitación, se tendrá una mayor remoción en el parámetro de turbiedad que, como ya se ha mencionado, permite determinar el grado de eficiencia del proceso.

**5.1.3 Sólidos disueltos totales.** Variable que determina el grado de eficiencia en el proceso de clarificación. De acuerdo a éste tipo de agua a tratar cuya turbiedad es baja, obteniendo también altas remociones al realizar los procesos de coagulación y floculación al emplear las alternativas de coagulantes, permite generar menores concentraciones de sólidos disueltos en el agua respecto al Sulfato de Aluminio.

**5.1.4 Costos en el tratamiento de potabilización.** Factor de gran influencia en la selección del coagulante adecuado para el tipo de agua a tratar; se determina tomando los costos de las cantidades por volumen [m<sup>3</sup>] de agua clarificada tanto de coagulantes como acondicionadores de pH<sup>54</sup>, cuando se requieran, teniendo en cuenta los balances de materia.

## 5.2 BALANCE DE MATERIA

A partir de la experimentación realizada, en la práctica, las alternativas seleccionadas y con base en el caudal de entrada promedio de la planta de 270 [L/s] en los primeros meses del año 2017, se calcula la cantidad de la dosis de los coagulantes seleccionados que se aplicarían a gran escala.

- Agua cruda

$$Q = 270 \frac{L}{s} * \frac{3600 s}{1 h} * \frac{24 h}{1 día} = 23.328.000 \frac{L}{día}$$

- Sulfato Férrico

$$[Fe_2(SO_4)_3] = 8 \frac{mg}{L} * 21.600.000 \frac{L}{día} * \frac{1 kg}{1 * 10^6 mg} = 172,8 \frac{kg Fe_2(SO_4)_3}{día}$$

$$= V_{Fe_2(SO_4)_3} = \frac{m}{\rho} = \frac{172,8 \frac{kg}{día}}{1,51 \frac{kg}{L}} = 114,44 \frac{L}{día} * \frac{1 día}{24 h} = 4,77 \frac{L}{h}$$

---

<sup>54</sup> COGOLLO FLÓREZ, Op. Cit.

- Cloruro Férrico

$$[\text{FeCl}_3] = 10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 21.600.000 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 * 10^6 \text{ mg}} = 216 \frac{\text{kg FeCl}_3}{\text{día}}$$

$$= V_{\text{FeCl}_3} = \frac{m}{\rho} = \frac{216 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{1,45 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 148,97 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 6,21 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

Además del coagulante, se requiere tanto cal como cloro para las etapas de pre-cloración, pre-cal en el proceso, estableciendo las dosis adecuadas de acuerdo a un promedio en los meses de Enero, Febrero y Marzo del año 2017:

- Cal: Estabilizante de pH

$$[\text{CaO}] = 5,26 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 23.328.000 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 * 10^6 \text{ mg}} = 122,71 \frac{\text{kg Cal}}{\text{día}}$$

$$= V_{\text{CaO}} = \frac{m}{\rho} = \frac{123 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{3,35 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 36,7 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 1,53 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

- Cloro: Desinfectante

$$[\text{Cl}_{(\text{g})}] = 2,7 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 23.328.000 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 * 10^6 \text{ mg}} = 62,99 \frac{\text{kg Cl}}{\text{día}}$$

$$= V_{\text{Cl}_{\text{g}}} = \frac{m}{\rho} = \frac{63 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{1,56 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 40,4 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 1,68 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

Tomando como base cantidades promedio tanto para el hierro residual como para el hierro filtrado en cada coagulante de acuerdo a su dosis óptima seleccionada, se obtienen en la Tabla 31 las cantidades en kg/día que estará presente en el agua.

- Cantidad de Hierro en el agua luego de la coagulación y floculación empleando Sulfato Férrico

$$[\text{Fe}] = 0,833 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 21.600.000 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 * 10^6 \text{ mg}} = 18 \frac{\text{kg Fe}}{\text{día}}$$

- Cantidad de Hierro luego de realizar la filtración empleando Sulfato Férrico

$$[\text{Fe}] = 0,28 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 21.600.000 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 * 10^6 \text{ mg}} = 6,05 \frac{\text{kg Fe}}{\text{día}}$$

- Cantidad de Hierro en el agua luego de la coagulación y floculación empleando Cloruro Férrico

$$[\text{Fe}] = 0,99 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 21.600.000 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 * 10^6 \text{ mg}} = 21,38 \frac{\text{kg Fe}}{\text{día}}$$

- Cantidad de Hierro luego de realizar la filtración empleando Cloruro Férrico

$$[\text{Fe}] = 0,198 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 21.600.000 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 * 10^6 \text{ mg}} = 4,28 \frac{\text{kg Fe}}{\text{día}}$$

**Tabla 31.** Valores obtenidos del balance de materia para las alternativas

PARÁMETRO	UNIDADES	SULFATO FÉRRICO	CLORURO FÉRRICO
Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]	1510	1450
Dosis óptima	[mg/L]	8	10
Dosis óptima	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,008	0,01
Caudal	[m <sup>3</sup> /día]	23.280	23.280
Caudal	[L/día]	23.280.000	23.280.000
Consumo día	[kg/día]	172,8	216
Consumo mes	[kg/mes]	5.184	6.480
Consumo anual	[kg/año]	62.208	77.760
Hierro Residual	[kg Fe/L]	18	21,38
Hierro Filtrado	[kg Fe/L]	6,05	4,28

Debido al riesgo que tiene entregar agua con cantidades elevadas de hierro, se determina la cantidad contenida para cada coagulante luego de realizado el proceso, obteniéndose la mayor cantidad de hierro por día en la alternativa del Sulfato Férrico después de filtrada el agua con un porcentaje de Hierro mayor a la alternativa del Cloruro Férrico; pero, cuya remoción fue elevada.

Además, con ello, se determina que el consumo de producto químico que se emplearía en la planta de tratamiento, es menor para el Sulfato Férrico respecto a la otra alternativa de coagulante, pudiendo hacer uso de éste químico.

Los costos de los coagulantes fueron suministrados por la empresa SULFOQUÍMICA S.A., la cual produce los tres coagulantes utilizados en todo el estudio (Tabla 32)

**Tabla 32.** Lista de productos químicos de las alternativas

COAGULANTE	PRECIO (\$/kg)
Sulfato férrico líquido	1300 kg + IVA
Cloruro férrico líquido	1550 kg + IVA

**Fuente.** SULFOQUÍMICA S.A.

De acuerdo a los costos de la tabla 32, se establece una relación en la tabla 33, a cifras significativas para el fácil estudio, entre los parámetros que relacionan los costos que requiere implementar las alternativas seleccionadas en la planta de tratamiento de acuerdo a la cantidad de insumo que se requiere diariamente.

**Tabla 33.** Parámetros determinantes para emplear las alternativas en la planta de tratamiento

PARÁMETRO	UNIDADES	SULFATO FÉRRICO	CLORURO FÉRRICO
Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]	1510	1450
Dosis óptima	[mg/L]	8	10
Dosis óptima	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,008	0,01
Caudal	[m <sup>3</sup> /día]	21.600	21.600
Consumo día	[kg/día]	172,8	216
Valor kilogramo	[\$/kg]	1.547	1.785
Valor total	[\$/día]	268.000	386.000

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 33, se observa que para realizar la corrida en la planta de tratamiento por 48 horas para la alternativa que requiere menor producto a emplear, se requiere de 173 kg/día, siendo un total de 350 kg de Sulfato Férrico para los dos días, incurriendo en un total de \$540.000 para su implementación. Por lo que, de acuerdo al desempeño que generarían con su uso, se encuentra que el Sulfato Férrico arroja menores costos en su obtención como insumo, menores dosis de químico utilizado, altos porcentajes de remoción de turbiedad aumentando la eficiencia del tratamiento y bajas concentraciones de Hierro dentro de los límites permitidos.

De acuerdo al desempeño operativo de las alternativas, se verifica para cada una teniendo en cuenta la cantidad de remoción que generó en el agua a tratar de forma experimental teniendo como parámetro la eficiencia del proceso de clarificación. Respecto a la gráfica 30 que representa la eficiencia en términos de remoción de los parámetros más importantes del proceso de clarificación, se determina como alternativa más viable el Sulfato Férrico cuyos porcentajes superan las remociones tanto en el Sulfato de Aluminio como en el Cloruro Férrico respecto a la turbiedad, color y cambio de pH.

Las alternativas seleccionadas y desarrolladas experimentalmente cumplen con la normatividad vigente, por lo que, se puede determinar tanto una ventaja operativa como una ventaja económica dentro del proceso.

## 6. ANÁLISIS FINANCIERO

Teniendo en cuenta los análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de jarras al agua que ingresa a la planta de tratamiento y las dosis con las que se puede trabajar, se determinó que el Sulfato Férrico es el coagulante que mejores propiedades arroja al interaccionar con este tipo de agua, estableciendo como mejor dosis 8 mg/L.

### 6.1 COMPARACIÓN DE COSTOS

Al realizar el estudio comparativo de los costos de tratamiento entre la alternativa seleccionada y el coagulante actual, se deben considerar las variables tanto de los costos de mantenimiento como los costos de operación vinculados al proceso de tratamiento.

Estos costos son un factor importante en el proceso de potabilización que incluye tanto las operaciones a realizar como el mantenimiento, mano de obra y servicios adicionales<sup>55</sup>. Requerido también en caso de accidentes o estancamiento en las operaciones, buscando siempre disminuir los costos en los presupuestos sin afectar la calidad en los procesos.

Para determinar los costos de acuerdo a los insumos utilizados en la planta de tratamiento, se tienen en cuenta las dosis de coagulante, de Cloro como desinfectante y de Cal como controlador de pH, datos promedio para su determinación, tomando los precios por unidad de tiempo (mensualmente) en la Tabla 34.

**Tabla 34.** Precios de insumos de acuerdo a su dosis óptima requerida

PARÁMETRO	UNIDADES	SULFATO FÉRRICO	SULFATO DE ALUMINIO	CAL	CLORO
Mejor dosis	[mg/L]	8	23	5,26	2,7
Mejor dosis	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,008	0,023	0,00526	0,0027
Consumo día	[kg/día]	172,8	506	123	63
Valor kilogramo	[\$/kg]	1.547	945,4	1311	7110,8
Valor total diario	[\$/día]	268.000	478.000	161.000	448.000
Valor total mensual	[\$/mes]	8.140.000	14.352.000	4.830.000	13.400.000
Valor total anual	[\$/año]	109.281.000	172.214.000	57.960.000	161.300.000
Valor/m3	[\$/m <sup>3</sup> ]	12,38	21,74	6,90	19,20

De acuerdo a los precios suministrados por SULFOQUÍMICA S.A., se determina los costos de la implementación de la alternativa del Sulfato Férrico para su

<sup>55</sup> VELASQUEZ BERNAL, Omar Andres y WALKER WALKER, Eduardo Arturo. Evaluación de polímeros orgánicos coagulantes – floculantes para realizar una sustitución parcial de Sulfato de Aluminio en la PTAP El Dorado. Bogotá D.C. Proyecto de Grado (Ingeniero Químico). Fundación Universidad de América, Facultad de Ingeniería. 2009

comparación respecto a los costos del coagulante Sulfato de Aluminio empleado actualmente, datos suministrados por la empresa. Dentro de éstos costos se incluyen: Costos de insumos requeridos, mantenimiento de los equipos, lavado de los filtros, nómina operarios y almacenamiento del agua tratada. Con ello, sólo se establece en la tabla 35 aquellos costos que generarían un cambio económico en el proceso de tratabilidad.

### Muestra de cálculos:

Para obtener el costo del tratamiento por día se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Costo} \left[ \frac{\$}{\text{día}} \right] = \text{Caudal} \left[ \frac{L}{s} \right] * \text{Dosis Coagulante} \left[ \frac{mg}{L} \right] * \text{Costo coagulante} \left[ \frac{\$}{kg} \right] * \frac{86400 s}{1 \text{ día}} * \frac{1 kg}{1 \times 10^6 mg}$$

**Tabla 35.** Resumen de costos para el estudio

COSTO	UNIDADES	SULFATO FÉRRICO	SULFATO DE ALUMINIO
Insumo de coagulante	[\$/mes]	8.900.000	15.000.000
Insumo de Cal	[\$/mes]	4.800.000	4.800.000
Insumo de Cloro	[\$/mes]	13.400.000	13.400.000
TOTAL	[\$/mes]	27.100.000	33.200.000
Valor/m3	[\$/m <sup>3</sup> ]	38,48	47,84

## 6.2 ANÁLISIS DE LA ALTERNATIVA MÁS VIABLE

De acuerdo a los costos estructurados, según los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el estudio y teniendo en cuenta el caudal del efluente, el costo del tratamiento fisicoquímico total utilizando Sulfato de Aluminio en dosis de 23 mg/L según los costos suministrados por la empresa EAF SAS ESP en la tabla 35, sería de \$33.200.000 pesos por mes (\$910.000 pesos por día) incluido el IVA; en el caso que se utilizara Sulfato Férrico en dosis de 8 mg/L el costo total operacional sería de \$27.100.000 por mes (\$750.000 pesos por día) incluido el IVA.

Por tal motivo, la suma total para ambos coagulantes permite observar que sería mejor implementar el Sulfato Férrico debido a los menores costos que otorga tanto en mantenimiento como en las condiciones de operación y la cantidad de insumo requerido. Teniendo en cuenta que, ya están establecidos los equipos, los tanques de almacenamiento de los insumos, no se ve afectado el consumo energético actual en la planta de tratamiento ni los costos por mano de obra y mantenimiento de equipos.

De acuerdo al hierro, el efecto que tiene en el proceso está vinculado con su remoción en la etapa de filtración, razón por la cual, el mantenimiento en los filtros debe ser constante para evitar la corrosión.

## 7. CONCLUSIONES

- De acuerdo al agua cruda superficial caracterizada por la empresa, se determinó aquellos químicos que resultaban más adaptables para este tipo de agua proveniente de fuentes superficiales de acuerdo a una selección entre los coagulantes existentes en mayor proporción y uso teniendo en cuenta parámetros de turbiedad, color, pH y aluminio residual que permiten determinar su eficiencia, obteniendo Sulfato Férrico, Cloruro Férrico y Policloruro de Aluminio como alternativas diferenciales para la sustitución del Sulfato de Aluminio Tipo B actual.
- En el proceso de clarificación de agua para potabilización se integran las etapas de coagulación, floculación, sedimentación y posterior filtración; de acuerdo a los coagulantes seleccionados se analizaron empleando pruebas de jarras los parámetros de mayor influencia: Hierro, Turbiedad, pH y Color, obteniendo para el pH promedio del agua cruda de 6,72 mayores remociones para el Cloruro Férrico y el Sulfato Férrico respecto al Policloruro de Aluminio, el cuál no actuó con el agua para la desestabilización de las partículas, impidiendo la formación de flocs y la remoción de las mismas. Las mínimas remociones obtenidas son 0,12 UNT, 5,4 UPC y 0,19 mg Hierro/L para el Sulfato Férrico y 0,16 UNT, 7,6 UPC y 0,14 mg Hierro/L para el Cloruro Férrico, para turbiedad, color e hierro respectivamente.
- En las pruebas, se determinó como mejores dosis para las alternativas 8 mg/L y 10 mg/L para Sulfato Férrico y Cloruro Férrico respectivamente, con lo cual se establece la eficiencia en el proceso de acuerdo a los porcentajes de remoción que alcanzaron un máximo de 92%, 68% y 67% para el Sulfato Férrico y de 86%, 73% y 88% para el Cloruro Férrico de acuerdo a turbiedad, color e hierro respectivamente; porcentajes elevados que hacen denotar su posible empleo en la planta de tratamiento por su ventaja operativa respecto al Sulfato de Aluminio actual con una dosificación promedio de 23 mg/L al remover mayor turbiedad y color dentro de la norma establecida. En estas pruebas, los resultados respecto a la turbiedad y al color, permitieron evidenciar una relación directa entre éstos parámetros en función de su remoción. Además, la cantidad de coagulante a adicionar al agua cruda superficial fue dependiente de la turbiedad, porque la coagulación podría ejecutarse difícilmente al emplear la dosis errónea en el proceso, evitando la desestabilización de las partículas y su posterior remoción.
- Respecto a los costos de los insumos empleados actualmente, se puede decir que la alternativa de coagulante representa una ventaja económica para la empresa al requerir menor cantidad de producto para emplear en el tratamiento; porque los costos operativos actuales son de \$27.269.000 y el costo con el Sulfato Férrico es de \$27.269.000, gastando mensualmente \$48/m<sup>3</sup> para el coagulante actual y un menor costo \$39/m<sup>3</sup> aproximadamente

para la alternativa, logrando disminuir costos para la empresa, sin incurrir en inversión inicial, sino realizar las pruebas rutinarias realizando esta dosificación recomendada.

## 8. RECOMENDACIONES

- Las dosificaciones recomendadas para el agua cruda solo se emplearon con suministro de fuentes superficiales; por lo que, antes de utilizarla en otro tipo de sistema, se requiere realizar todo el procedimiento para la selección del coagulante y la dosis adecuada a emplear.
- Realizar un continuo mantenimiento a los equipos y tuberías que conducen el agua tratada hasta las redes de distribución para garantizar un mayor grado de calidad en el agua.
- Es recomendable emplear mantenimientos al dispositivo dosificador del coagulante empleado para prevenir errores de funcionamiento por impurezas que pueden generarse en el equipo.
- Realizar una corrida en la planta de tratamiento involucrando también la etapa de filtración para corroborar que con éste proceso se aumenta la remoción del hierro para quedar dentro del límite máximo permitido para poder entregar el agua a la población.
- Se recomienda realizar siempre análisis de pruebas de jarras para verificar el correcto funcionamiento y dosificación del coagulante y los otros químicos empleados en el proceso en la planta de tratamiento, puesto que, las características y condiciones del agua cruda son cambiantes, modificando el cumplimiento de los parámetros determinantes del proceso de potabilización de agua.
- El estudio para la implementación de la alternativa propuesta queda abierto por si la empresa desea implementarla, siendo necesario realizar ensayos en planta piloto para ajustar las dosificaciones de los insumos, cuyos resultados no deben ser muy variables respecto a los encontrados en esta investigación; porque, las pruebas a nivel laboratorio dan información para las condiciones operativas óptimas en el proceso de tratamiento. Aunque, al trasladar la información a gran escala, no se logra reproducir los datos modificado por factores ambientales o condiciones hidráulicas, afectando la calidad del efluente.

## BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, Lorenzo. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación – floculación. Redalyc, 2006. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XL, núm. 2, mayo-agosto, 2006, pp. 10-17 [en línea] <<http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>> [Citado el 20 de Mayo de 2017]

ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua, Tomo 1, Editorial Mc Graw Hill, 3ª Edición, 2000. Bogotá, Colombia, p.99-110.

BARRENECHEA A. Coagulación. En tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría tomo 1. CEPIS Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias de Ambiente CEPIS, Lima, 2004, p. 306 [en línea]<<http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/bitstream/id/5657/BIV00012.pdf>> [Citado el 24 de Enero de 2017]

BUSTOS MONTAÑO, Leidy Viviana y SILVA VARGAS, Yuly Daniela. Propuesta de mejoramiento de la línea de insumos del proceso de tratamiento de agua potable en la planta regional de la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Zipaquirá, Bogotá D.C., 2016. Proyecto de Grado (Ingeniero Químico). Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería.

CASTAÑEDA CORTES, Maria Camila. Propuesta para la implementación de técnicas alternativas con ayudantes de coagulación naturales, En la planta de tratamiento de agua potable de la empresa aguas de Facatativá, Proyecto de Grado (Ingeniero Civil). Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingenierías, 2015. p. 18-24.

CASTRILLÓN BEDOYA, Daniela y GIRALDO, María de los ángeles. Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de villa santana. Tecnólogo Químico, Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías, 2012, p. 7-16, Disponible en el catálogo en línea de la Universidad Tecnológica de Pereira <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3146/6281622H565.pdf?sequence=1>

Centro Administrativo Documental C.A.D. E.A.F. Sr. Carlos Julio Molina Ortega Investigador y Redactor: J. Orlando Mancera Martínez. <http://acueductofacatativa.com/archivos/menu%20acueducto/historia/historia.pdf>> [Citado el 24 de Enero de 2017]

CINÉTICA QUÍMICA. Policloruro de Aluminio [en línea] <<http://www.policlorurodealuminio.com/policloruro-de-aluminio.html>> [Citado el 20 de Marzo de 2017].

COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. En: Portal de revistas UN bdigital - Facultad de Minas – UNALMED. Octubre 5 de 2010. DYNA, Volumen 78, Número 165, p. 18-27, 2011. ISSN electrónico 2346-2183. ISSN impreso 0012-7353 [en línea] <<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>> [Citado el 27 de Febrero de 2017].

HENRY, Glynn y HEINKE, Gary. Abastecimiento De Agua. En: [Anónimo] Ingeniería Ambiental. 1999.

IBARRA RODRIGUEZ, Paulo Geymar y BASTIDAS PANTOJA, German Darío. Estudio de factibilidad de un proceso fisicoquímico para la remoción de carga orgánica, color y turbiedad en aguas residuales de una central de sacrificio. Línea de Profundización en Ingeniería Ambiental, Manizales. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Química, 2004. 2012, p. 66 - 70, Disponible en el catálogo en línea de la Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1057/1/paulogeymaribarrarodriguez.2003.pdf>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado, trabajos de investigación NTC-1486. Sexta actualización. Bogotá D.C.: El Instituto, 1998. p.1

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, formas y estructura. (NTC 4490) Bogotá D.C: El Instituto, 1998. p. 2.

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, formas y estructura. (NTC 5613) Bogotá D.C: El Instituto, 1998. p. 1-2.

\_\_\_\_\_. Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras. NTC-3903 Gestión Ambiental. Bogotá D.C, 2001. P. 9-10.

MURILLO CASTAÑO, Diana Marcela. Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada. Pereira, 2011, p. 32-44. Trabajo de Grado (Químico Industrial). Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de Tecnologías. Química Industrial.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento RAS-2000. Bogotá, Noviembre de 2000.

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115 de 2007. República de Colombia. [En línea] <<http://www.minproteccionsocial.gov.co/VBeContent/NewsDetail.asp?ID=16364&IDCompany=3>> [Citado el 18 de Marzo de 2017].

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA. Programa de Capacitación y certificación del sector de agua potable y saneamiento básico. p. 89. Curso Básico, SENA, Segunda Edición, Ministerio de Desarrollo Económico, 1999. Impresión Sena Publicaciones. [en línea] <[http://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad\\_del\\_agua/operacion\\_potabilizacion/index.html#](http://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad_del_agua/operacion_potabilizacion/index.html#)> [Citado el 28 de Marzo de 2017]

OPS/CEPIS/PUB/04.109.Tratamiento de agua para consumo humano [en línea] [http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomol/ma1\\_tomo1\\_in\\_dice.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomol/ma1_tomo1_in_dice.pdf) [Consultado el 18 de Marzo de 2017].

RESTREPO OSORNO, Herán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Proyecto de Grado (ingeniero de minas), Medellín. Universidad Nacional de Colombia, 2009, p. 7-9, 12 [en línea] <[http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239\\_2009.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239_2009.pdf)>. Citado el 27 de Febrero de 2017]

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Calidad Del Agua. Tercera edición. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009. ISBN 9789588060

SEDAPAL. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN [En línea] <[http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)> [Citado el 20 de Marzo de 2017]

VARGAS, Ing. Lidia de. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo I. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS, Lima, 2004., p. 151-177

VELIZ, Eliet; LLANES, José Guadalupe; FERNÁNDEZ, Lidia Asela y BATALLER, Mayra. Coagulación-floculación, filtración y ozonización de agua residual para reutilización en riego agrícola. México, 2016. Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 1, pp. 17-34 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Morelos.

XXII CONGRESO DE CENTROAMERICA Y PANAMA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL “SUPERACION SANITARIA Y AMBIENTAL: EL RETO”. Potabilización con diferentes coagulantes de aluminio y hierro [en línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia18.pdf>, p.4-5 [Citado el 10 de Abril de 2017]

## **ANEXOS**

## **ANEXO A. DESCRIPCIÓN MÉTODOS ANALÍTICOS**

La fijación y medición de los siguientes parámetros son requeridas en el desarrollo de la prueba de jarras, para conocer sus variaciones respecto a la normativa y determinar las dosis óptimas y el coagulante adecuado.

### **DETERMINACIÓN DEL COLOR**

Para obtener los datos reales del parámetro de color, puede emplearse un fotómetro, espectrofotómetro,

1. Encender el equipo espectrofotómetro para la medición de las muestras
2. Seleccionar el código 32 correspondiente al parámetro de color.
3. Tomar la muestra de agua representativa, ya sea en cruda o en tratada
4. Agregar la muestra a la celda del equipo
5. Hacer la lectura directa expresada en UPC (Unidades de Platino-Cobalto)

### **DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD**

Para determinar el parámetro de turbiedad se puede utilizar un turbidímetro o nefelómetro, aparato que hace pasar un haz de luz en una porción del agua a observar y mide que tanta luz es absorbida por la muestra que contiene cierta cantidad de partículas suspendidas en ella.

1. Encender el turbidímetro para medir las muestras.
2. Tomar una muestra representativa y transvasar a la celda del equipo hasta el aforo
3. Tomar la celda por la tapa y agitar por inmersión para eliminar las burbujas de aire y limpiar la celda con el paño antiestático
4. Colocar primero el blanco y luego la celda de la muestra dentro del compartimiento del equipo.
5. Registrar el valor de la pantalla.

Nota. La lectura debe hacerse lo más rápido posible para evitar que las partículas pesadas se sedimenten.

### **DETERMINACIÓN DEL pH**

1. Encender el equipo pH-metro y esperar que se establezca la lectura dentro de la solución de KCL 3M
2. Tomar una muestra representativa en un vaso de precipitado de 100ml.
3. Lavar el electrodo con agua destilada e introducirlo en la muestra.
4. Leer directamente en el equipo y expresar en unidades de pH.

## DETERMINACIÓN DEL ALUMINIO RESIDUAL

1. Agregar una alícuota de 5 ml de agua tratada en un tubo de ensayo
2. Agregar una pequeña cucharada del Aluminio-1 (Polvo blanco) y agitar hasta su disolución completa
3. Adicionar 1.2 ml de Aluminio-2 (líquido incoloro) con una pipeta de 5 ml y agitar
4. Adicionar 0.25 ml de Aluminio-3 (líquido color marrón) con una pipeta de 1 ml y agitar
5. Dejar reaccionar durante 5 minutos
6. Encender el espectrofotómetro y ubicar el blanco de Al dentro del equipo
7. Agregar la mezcla a una celda del equipo e introducirla dentro del mismo
8. Leer el valor en pantalla expresado en unidades de mg Al/L

## DETERMINACIÓN DEL HIERRO TOTAL

1. Agregar una muestra de agua tratada de 5 ml a un tubo de ensayo
2. Adicionar 3 gotas del agente químico indicador de hierro Reg Fe-1 (Líquido color verdoso)
3. Agitar hasta su mezcla completa
4. Dejar reaccionar durante 3 minutos
5. Encender el equipo espectrofotómetro
6. Ubicar el blanco de Fe dentro del equipo
7. Agregar la muestra a una celda del equipo e introducirla dentro del mismo
8. Realizar la lectura directa de la muestra expresada en mg Fe/L

## DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD

1. Añadir 100 ml de la muestra de agua a analizar en un Erlenmeyer
2. Agregar 1ml de Tiosulfato de Sodio Para neutralizar el cloro
3. Adicionar 3 gotas de indicador mixto de color azul turquesa
4. Agitar de manera constante
5. Realizar la titulación gota a gota bajo una bureta con solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 0.0242N hasta obtener un color rosa.
6. Anotar el volumen gastado del ácido sulfúrico en la titulación
7. Calcular la alcalinidad expresada en mgCaCO<sub>3</sub>/L con la fórmula:

$$\text{Alcalinidad CaCO}_3 \left( \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = A * B * 500$$

Dónde:

A = Volumen gastado en ml de solución de ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

B = Normalidad del ácido sulfúrico (N = 0,0242N)

## ANEXO B. MATERIALES Y MÉTODOS DE TRABAJO

### 8.1 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

Para la realización de cada una de las pruebas a realizar, debe tenerse en cuenta los equipos, materiales y reactivos (Ver Tabla 30) que se requieren para llevar a feliz término las experimentaciones.

La descripción involucra los materiales utilizados y los reactivos requeridos para la aplicación a nivel laboratorio.

**8.1.1 Equipo de Prueba de Jarras.** Es un equipo de velocidad variable fabricado por Phipps y Bird, en el que se trata de reproducir las condiciones en las cuales se produce la coagulación, floculación y sedimentación en la planta de tratamiento. Normalmente consta de:

- 6 vasos de precipitado de 2000 ml, forma baja, de plástico con forma cuadrada con materiales resistentes a la corrosión.
- Un agitador mecánico múltiple de velocidad variable que puede crear turbulencia simultáneamente en los 6 vasos de precipitado.
- Un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador de laboratorio.

**Figura 12.** Equipo de Prueba de Jarras automática



**8.1.2 Turbidímetro Merck Turbiquant 1500T.** El turbidímetro es un instrumento nefelométrico que permite realizar la medición de la turbiedad del agua después de floculada y sedimentada al cabo de los 41 minutos que dura el proceso de clarificación; se logra con el uso de éste instrumento que mide la intensidad de la luz que pasa a través de la muestra de agua o que es dispersada por las partículas en suspensión presentes en la muestra en un ángulo de 90°. Su medición se da en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT).

**Figura 13.** Turbidímetro Merck Turbiquant 1500T



**8.1.3 Potenciómetro PHMETRO SCHOTT Instruments Lab 850 (Figura 5a) – PHMETRO WTW pH330 (Figura 5b).** Es un instrumento con electrodos que permiten medir pequeñas variaciones del pH de una disolución antes (Coagulación) y después (Sedimentación) de ocurrida la floculación. La determinación de pH consiste en medir el potencial desarrollado a través de una membrana que separa dos soluciones que poseen diferentes concentraciones de protones en ellas.

**Figura 14.** a) PHMETRO SCHOTT Instruments Lab 850; b) PHMETRO WTW pH330



a).



b).

**8.1.4 Espectrofotómetro Spectroquant Pharo 300M.** Es un espectrofotómetro utilizado para medir la relación de los valores de una misma magnitud fotométrica en función de la longitud de onda. En este caso, se empleó para determinar los

valores en la cantidad de hierro después de la prueba de jarras y posterior filtración y, para realizar un análisis comparativo del color residual en las muestras después de floculada y sedimentada empleando el método normalizado de comparación de platino cobalto empleado actualmente en la planta de tratamiento, cuya unidad de color (UPC) que se produce por 1 mg/l de Pt (Platino).

**Figura 15.** Espectrofotómetro Spectroquant Pharo 300M



**Tabla 36.** Materiales y reactivos para el desarrollo de las pruebas de jarras.

TIPO	ESPECIFICACIÓN
<b>MATERIALES</b>	Vasos de Precipitado
	Bureta
	Espátulas
	Probeta
	Balones Aforados
	Vidrio de reloj
	Pipeta graduada con succión
	Cronómetro
	Papel filtro
	Erlenmeyer
	Embudo
	<b>REACTIVOS</b>
Hierro	
Aluminio (Test)	
Sulfato Férrico	
Cloruro Férrico	
Policloruro de Aluminio – Ultrafloc 110	
Tiosulfato de Sodio: Funciona como neutralizador de Cloro	
Ácido sulfúrico: Titulante empleado en la prueba de alcalinidad a una concentración de 0,0240N	
Indicador mixto: Colorante Azul de Metileno con cambio de color azul turquesa a rosa champaña, empleado en la prueba de alcalinidad para denotar su cambio de coloración y conocer la cantidad de ácido sulfúrico gastado en la muestra.	

## ANEXO C.

### RESULTADOS PARA CADA UNO DE LOS PARÁMETROS EN LOS ENSAYOS DE JARRAS PARA EL COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO TIPO B EMPLEADO ACTUALMENTE

**Tabla 37.** Datos y resultados en la prueba de jarras con el coagulante Sulfato de Aluminio empleado actualmente en la planta de tratamiento.

Coagulante		Sulfato de Aluminio - Tipo B				
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 1</b>						
pH	6,3	Color (UPC)				27,1
Turbiedad (UNT)	3	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				21,71
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	14	16	18	20	22	24
Turbiedad Residual (UNT)	0,95	1,33	0,83	1,04	1,06	1,01
Color Residual (UPC)	10,8	13	11,1	11,8	11,9	11,5
pH	5,43	5,26	5,1	5	4,91	4,93
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 2</b>						
pH	5,93	Color (UPC)				48,7
Turbiedad (UNT)	4,5	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				18,49
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Turbiedad Residual (UNT)	1,26	1,27	1,16	0,96	1,21	1,65
Color Residual (UPC)	11,3	11,4	11,1	11,2	11,7	14,3
pH	5,4	5,17	5,05	5,01	4,98	4,93
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 3</b>						
pH	6,94	Color (UPC)				44,6
Turbiedad (UNT)	6,85	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				15,64
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Dosis Coagulante (mg/L)	10	12	14	16	18	20
Turbiedad Residual (UNT)	1,19	1,04	1,14	1,08	1,03	1,3
Color Residual (UPC)	12,4	11,4	11,4	11,2	11,9	11,5
pH	7,61	7,87	6,91	6,03	5,37	5,16
<b>AGUA CRUDA -PRUEBA No. 4</b>						
pH	6,84	Color (UPC)				44,6
Turbiedad (UNT)	6,65	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)				19,72
<b>PARÁMETROS</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>	<b>Jarra 5</b>	<b>Jarra 6</b>
Turbiedad Residual (UNT)	1,3	1,33	1,25	1,14	1,03	0,97
Color Residual (UPC)	12,5	11,9	11,1	11,4	11,4	10,1
pH	7,51	7,87	6,91	6,03	5,37	5,16

**Tabla 38.** Porcentajes de Remoción para cada prueba de jarras con el coagulante Sulfato de Aluminio a cada una de las dosis empleadas

Jarras		1	2	3	4	5	6
<b>Dosis Coagulante (mg/L)</b>		14	16	18	20	22	24
Prueba 1	% Remoción Turbiedad	68,333	55,667	72,333	65,333	64,667	66,333
	% Remoción Color	60,148	52,030	59,041	56,458	56,089	57,565
	% Cambio pH	13,810	16,508	19,048	20,635	22,063	21,746
Prueba 2	% Remoción Turbiedad	72,000	71,778	74,222	78,667	73,111	63,333
	% Remoción Color	76,797	76,591	77,207	77,002	75,975	70,637
	% Cambio pH	8,938	12,816	14,840	15,514	16,020	16,863
Jarras		1	2	3	4	5	6
<b>Dosis Coagulante (mg/L)</b>		10	12	14	16	18	20
Prueba 3	% Remoción Turbiedad	82,628	84,818	83,358	84,234	84,964	81,022
	% Remoción Color	72,197	74,439	74,439	74,888	73,318	74,215
	% Cambio pH	0	0	0,432	13,112	22,622	25,648
Prueba 4	% Remoción Turbiedad	80,451	80,000	81,203	82,857	84,511	85,414
	% Remoción Color	71,973	73,318	75,112	74,439	74,439	77,354
	% Cambio pH	0	0	0	11,842	21,491	24,561

## ANEXO D.

### RESULTADOS DE PORCENTAJES DE REMOCIÓN PARA CADA PARÁMETRO MEDIDO EN LOS ENSAYOS DE JARRAS PARA SULFATO FÉRRICO COMO COAGULANTE

**Tabla 39.** Porcentajes de Remoción para cada prueba de jarras con el coagulante Sulfato Férrico a las dosis empleadas, luego de filtradas las muestras.

	Jarras	1	2	3	4	5	6
	<b>Dosis Coagulante (mg/L)</b>	4	6	8	10	12	14
Prueba 1	% Remoción Turbiedad	48,756	88,060	94,030	90,547	80,597	11,443
	% Remoción Color	0	67,965	73,593	70,563	68,831	0
	% Cambio pH	0	0	0,299	7,485	10,629	0
	<b>% Remoción Hierro</b>	52,941	64,516	71,212	72,951	75,000	57,083
Prueba 2	% Remoción Turbiedad	90,438	88,048	90,837	81,673	89,641	91,633
	% Remoción Color	50,855	61,538	68,803	70,085	64,103	68,376
	% Cambio pH	0	0,559	3,279	12,951	13,707	16,730
	<b>% Remoción Hierro</b>	50,000	70,652	68,852	76,224	50,000	81,600
Prueba 3	% Remoción Turbiedad	96,024	96,760	97,496	95,287	93,962	81,443
	% Remoción Color	60,000	66,531	66,122	68,163	65,306	0
	% Cambio pH	0	1,767	0,736	10,751	15,317	0
	<b>% Remoción Hierro</b>	59,155	58,730	70,667	63,830	70,968	39,224
Prueba 4	% Remoción Turbiedad	88,390	86,891	91,386	91,011	95,131	91,386
	% Remoción Color	64,122	65,649	69,847	79,008	79,771	77,863
	% Cambio pH	4,526	0,292	1,168	3,066	0,584	0
	<b>% Remoción Hierro</b>	88,341	77,083	61,765	62,319	71,429	65,289
	<b>Dosis Coagulante (mg/L)</b>	2	4	6	8	10	12
Prueba 5	% Remoción Turbiedad	59,292	54,425	77,434	86,726	79,204	80,088
	% Remoción Color	4,274	6,410	36,752	55,983	35,897	32,479
	% Cambio pH	2,406	5,414	0	0	0	0
	<b>% Remoción Hierro</b>	55,600	45,143	41,322	66,346	43,548	27,068
Prueba 6	% Remoción Turbiedad	87,889	92,042	94,464	92,388	84,083	66,436
	% Remoción Color	73,214	53,214	74,643	55,357	67,143	73,571
	% Cambio pH	16,598	15,353	8,714	7,331	16,459	28,354
	<b>% Remoción Hierro</b>	44,156	43,662	75,000	68,421	69,167	32,000
Prueba 7	% Remoción Turbiedad	66,384	74,859	91,808	92,655	93,503	90,960
	% Remoción Color	0	54,054	71,042	79,151	74,131	71,429
	% Cambio pH	0	0	0,445	0,890	4,006	9,644
	<b>% Remoción Hierro</b>	24,490	74,783	49,275	65,517	64,211	66,667
Prueba 8	% Remoción Turbiedad	66,431	89,399	92,933	93,640	83,039	69,258
	% Remoción Color	68,543	56,291	72,517	75,166	68,543	53,311
	% Cambio pH	0	3,212	3,650	3,942	9,051	10,803
	<b>% Remoción Hierro</b>	42,857	51,316	72,131	66,292	67,692	8,943

## ANEXO E.

### RESULTADOS DE PORCENTAJES DE REMOCIÓN PARA CADA PARÁMETRO MEDIDO EN LOS ENSAYOS DE JARRAS PARA POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE

**Tabla 40.** Porcentajes de Remoción para cada prueba de jarras con el coagulante Policloruro de Aluminio a las dosis empleadas en la experimentación, luego de filtradas las muestras.

	Jarras	1	2	3	4	5	6
	<b>Dosis Coagulante (mg/L)</b>	12	14	16	18	20	22
Prueba 1	% Remoción Turbiedad	0	0	0	0	0	0
	% Remoción Color	14,286	20,598	15,282	17,608	13,953	13,289
	% Cambio pH	0,585	6,579	5,409	23,830	25,877	21,345
Prueba 2	% Remoción Turbiedad	52,695	60,180	56,886	23,952	44,012	40,719
	% Remoción Color	26,102	28,136	7,458	1,017	6,780	3,729
	% Cambio pH	9,050	7,692	0,452	0	8,899	21,870
	Jarras	1	2	3	4	5	6
	<b>Dosis Coagulante (mg/L)</b>	6	8	10	12	14	16
Prueba 3	% Remoción Turbiedad	28,42	24,04	51,91	32,24	48,09	53,01
	% Remoción Color	30,96	35,15	43,10	31,80	40,59	29,29
	% Cambio pH	21,98	16,30	6,17	10,62	18,52	13,83
Prueba 4	% Remoción Turbiedad	52,36	48,50	60,09	50,64	57,94	61,80
	% Remoción Color	37,50	45,22	52,94	42,65	45,59	44,85
	% Cambio pH	28,57	19,34	14,51	18,46	24,62	29,45

## ANEXO F.

### RESULTADOS DE PORCENTAJES DE REMOCIÓN PARA CADA PARÁMETRO MEDIDO EN LOS ENSAYOS DE JARRAS PARA CLORURO FÉRRICO COMO COAGULANTE

**Tabla 41.** Porcentajes de Remoción para cada prueba de jarras con el coagulante Cloruro Férrico a las dosis empleadas en la experimentación, luego de filtradas las muestras

	Jarras	1	2	3	4	5	6
	<b>Dosis Coagulante (mg/L)</b>	4	6	8	10	12	14
Prueba 1	% Remoción Turbiedad	26,582	23,73	59,81	92,09	85,44	83,54
	% Remoción Color	0	0	4,42	72,45	75,17	76,53
	% Cambio pH	2,249	0,30	0	0	0	0
	<b>% Remoción Hierro</b>	24,242	10,82	32,66	77,17	86,05	88,64
Prueba 2	% Remoción Turbiedad	32,476	29,58	73,31	92,60	85,53	90,03
	% Remoción Color	0	0	16,50	68,28	67,31	51,78
	% Cambio pH	5,045	1,78	0,45	0	0	0
	<b>% Remoción Hierro</b>	16,889	32,32	84,43	85,57	86,09	80,51

	Jarras	1	2	3	4	5	6
	<b>Dosis Coagulante (mg/L)</b>	8	10	12	14	16	18
Prueba 3	% Remoción Turbiedad	72,64	94,79	92,51	96,09	95,11	93,49
	% Remoción Color	33,23	75,95	78,80	83,54	78,16	76,90
	% Cambio pH	0,45	1,63	4,01	8,92	13,08	11,29
	<b>% Remoción Hierro</b>	47,55	79,46	81,58	86,78	90,80	90,98
Prueba 4	% Remoción Turbiedad	32,41	66,05	73,77	69,75	4,32	0
	% Remoción Color	12,46	54,33	58,13	74,05	68,17	60,90
	% Cambio pH	2,92	3,65	4,96	6,28	10,95	14,60
	<b>% Remoción Hierro</b>	53,33	77,89	71,13	73,73	69,11	78,42

## ANEXO G. FICHAS TÉCNICAS DE LAS ALTERNATIVAS



Certificado N° 152-1

### Sulfato Férrico Ficha Técnica del Producto

#### Propiedades Químicas (Adaptación de Sulfoquímica S.A la norma AWWA B406-06)

Fórmula Química	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (ac)
Densidad g/mL	1.48 ± 0.04
Contenido de Hierro Férrico Fe <sup>+3</sup>	8.5 ± 0.5 %
Contenido de Hierro Ferroso Fe <sup>+2</sup>	2.0 % max.
Contenido de Insolubles	0.1 % max.

\*Vida útil posterior a su fabricación: 6 – 12 meses

#### Indicaciones o generalidades

El Sulfato Férrico es una sal inorgánica en estado líquida de color rojizo, el cual es una sal oxidante fuerte capaz de disolver una amplia variedad de minerales sulfurados.

#### Aplicaciones

El Sulfato Ferroso se usa para purificación de agua por floculación y para eliminar fosfatos en las plantas de depuración municipal e industrial para prevenir la eutrofización de masas de agua superficiales, además se tienen algunas aplicaciones en la medicina. Adicionalmente tiene usos en la industria del cuero.

#### Presentación

Se presenta en condiciones líquidas en canecas de 25 y 70kg, tambor de 250kg, IBC de 1300kg y granel.

#### Condiciones de Manejo

El producto debe ser almacenado y conducido empleando acero inoxidable 316, fibra de vidrio, PVC, o cualquier otro material termoplástico. También es compatible con caucho natural y vitón. El producto no debe ponerse en contacto con hierro, cobre o aluminio y en acero

inoxidable 304 puede haber efectos menores.

Es deseable que el Sulfato Férrico sea dosificado como se entrega; su uso diluido puede ser consultado con el personal técnico de Sulfoquímica S.A. Para la dosificación exacta y uniforme, debe ser usada una bomba de desplazamiento positivo diafragma o peristáltica.

El producto no se deteriora con el tiempo mientras sea manejado bajo las condiciones explicadas.

#### Precauciones y Seguridad

El producto no presenta alto riesgo en su manejo pero por ser una sal ácida debe tratarse con cuidado. Se recomienda el uso de guantes y gafas protectoras.

En los ojos y mucosas causa irritación; en caso de contacto debe enjuagarse con agua abundante

El producto no emite gases y por lo tanto no causa efectos nocivos al ser inhalado.



#### Oficina Principal y Producción

Medellín: Calle 55 No 46-85 Itagüé, Antioquia; Tel: (574)370 1170; Fax: (574)277 5676; Coordenadas: 6° 10' 14.68 N 75° 36' 13.23 O [info@sulfoquimica.com](mailto:info@sulfoquimica.com)

#### Producción

Malambo Atlántico: Km 3 Vía Malambo - Sabanagrande; Parque Industrial PIMSA; Cel 3104044980 Coordenadas: 10° 50' 01.4"N 74° 46' 01.3" W;

Tel (575)347 8350; Fax: (575)3478353; [sgbarranquilla@sulfoquimica.com](mailto:sgbarranquilla@sulfoquimica.com)

Caloto: km. 7 Vía Caloto - Cauca. Cel 3217010527, 3157216417; Coordenadas: 3° 03'13.0" N 76° 25' 55.9"W [sgcaloto@sulfoquimica.com](mailto:sgcaloto@sulfoquimica.com)

Barbosa: km. 4 Vía Girardota - El Hatillo (Vereda Platanito), Barbosa, Antioquia. Tel. (574)289 2480, Fax. (574)289 1234; Cel 3116740919 Coordenadas: 6°24'07.7"N 75°25'10.4"W [sgbarbosa@sulfoquimica.com](mailto:sgbarbosa@sulfoquimica.com)

**Cloruro Férrico 42%**  
 Ficha Técnica del Producto

**Propiedades Químicas (NTC 3976)**

Formula Química	FeCl <sub>3</sub>
Contenido de Cloruro Férrico (FeCl <sub>3</sub> ) (% p/p)	40 – 45
Cloruro Ferroso (FeCl <sub>2</sub> ) (% p/p)	< 0.92
Acidez (HCl) (% p/p)	<1.0
Insolubles (% p/p)	<0.2
Densidad (20 °C) (g/mL)	1.418 – 1.485

Vida útil posterior a su fabricación: 6 – 12 meses

**Indicaciones o generalidades**

Es una Solución acuosa que se presenta en forma de líquido viscoso de color rojizo oscuro. La producción industrial de cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>) en solución, se obtiene por la reacción de óxidos de hierro con ácido clorhídrico (HCl).

**Aplicaciones**

Posee un alto poder de formación de flóculos, característica que es utilizada para diversas aplicaciones, como coagulante en el tratamiento de aguas residuales, industriales y potables. Además, el Cloruro Férrico ha sido utilizado por muchos años como un acondicionador de lodos, etapa previa a la filtración.

La utilización del Cloruro Férrico se va extendiendo al presentar ventajas técnicas y económicas con relación a otros productos utilizados en la coagulación de muchas aguas, especialmente en aquellas que poseen un elevado pH de floculación.

**Presentación**

Se presenta en condiciones líquidas en canecas de 25 y 70kg, tambor de 250kg, IBC de 1300kg y granel.

**Condiciones de manejo**

El producto es altamente corrosivo, por lo tanto, se debe evitar el contacto con objetos elaborados de aluminio, acero al carbón,

acero inoxidable y cobre, evite también el contacto con nylon. Los derrames en pisos de concreto pueden generar coloración y desgaste en los mismos.

Es deseable que el Cloruro Férrico sea dosificado como se entrega; su uso diluido puede ser consultado con el personal técnico de Sulfoquímica S.A.

**Precauciones y seguridad**

Producto considerado corrosivo, irritante y tóxico. Evite el contacto con metales que puedan sufrir corrosión tales como aluminio, acero al carbón, acero inoxidable y cobre, evite también el contacto con nylon. Se recomienda el uso de guantes y gafas protectoras.

En los ojos y mucosas causa irritación; en caso de contacto debe enjuagarse con agua abundante. Reacciona con metales, cloruro de alio, sodio, potasio, álcalis. Puede formar vapores tóxicos u corrosivos.


**Oficina Principal y Producción**

Medellín: Calle 55 No 46-85 Itagüí, Antioquia; Tel: (574)370 1170; Fax: (574)277 5676; Coordenadas: 6° 10' 14.68 N 79° 36' 13.23 O [info@sulfoquimica.com](mailto:info@sulfoquimica.com)

**Producción**

Malambo Atlántico: Km 3 Vía Malambo - Sabanagrande; Parque Industrial PIMSA; Cel 3104044980 Coordenadas: 10° 50' 01.4" N 74° 46' 01.3" W; Tel (575)347 8350; Fax: (575)3478353; [sabranquilla@sulfoquimica.com](mailto:sabranquilla@sulfoquimica.com)

Caloto: km. 7 Vía Caloto - Cauca. Cel 3217010527, 3157216417; Coordenadas: 3° 03' 13.0" N 76° 25' 55.9" W [socaloto@sulfoquimica.com](mailto:socaloto@sulfoquimica.com)

Barbosa: km. 4 Vía Girardola - El Hatillo (Vereda Plataniño), Barbosa, Antioquia. Tel. (574)289 2480, Fax. (574)289 1234;

Cel 3116740919 Coordenadas: 6°24'07.7" N 75°25'10.4" W [sobarbosa@sulfoquimica.com](mailto:sobarbosa@sulfoquimica.com)

**Policloruro de Aluminio PAC**  
**Ficha Técnica del Producto**

**Propiedades Químicas (Adaptación de Sulfoquímica S.A la norma NTC 4760 2ªda revisión)**

Fórmula química	$[Al(OH)_m Cl_{3-m}]_n$
Densidad a 25 °C (g/mL)	1.23 ± 0.03
Contenido de Alúmina % $Al_2O_3$	10.5 ± 0.5
Relación de Basicidad	70% min

Vida útil posterior a su fabricación: 3 meses

**Indicaciones o generalidades**

El Policloruro de Aluminio (PAC) es una sal de alta basicidad con base en anión cloruro. Se diferencia del Hidroxicloruro de Aluminio (ACH) debido a que presenta especies polinucleares del metal convirtiéndolo en un coagulante de alto desempeño, con excelentes propiedades para el tratamiento de aguas con dificultades especiales y generando bajo volumen de lodos, pues trabaja bien con poco suministro de alúmina.

**Aplicaciones**

El Policloruro de aluminio es usado como coagulante para clarificar aguas potables y residuales.

**Presentación.**

Se presenta en condiciones líquidas en canecas de 25 y 70kg, tambor de 250kg, IBC de 1300kg y granel.

**Condiciones de manejo**

El producto debe ser almacenado en tanques de fibra de vidrio, polietileno o acero recubierto en caucho y conducido empleando fibra de vidrio, PVC o cualquier otro material termoplástico. También es compatible con caucho natural y vitón. El producto no debe estar en contacto con

hierro, acero al carbón, acero inoxidable y bronce.

Es deseable que el Policloruro de Aluminio Líquido sea dosificado tal como se recibe del proveedor y no ser contaminados con agua u otra impureza durante el almacenamiento.

Para la dosificación exacta y uniforme, debe ser usada una bomba de desplazamiento positivo, diafragma o peristáltica. El producto no se deteriora con el tiempo mientras sea manejado bajo las condiciones explicadas.

**Precauciones y seguridad**

El producto no presenta alto riesgo en su manejo pero, por ser una sal ácida debe tratarse con cuidado. Evite el contacto con metales que puedan sufrir corrosión tales como hierro, cobre, bronce, aluminio y acero inoxidable. Se recomienda el uso de guantes y gafas protectoras.

Causa irritación en los ojos y mucosas, en caso de contacto debe enjuagarse con agua abundante.

El producto no emite gases y por lo tanto no causa efectos nocivos al ser inhalado.



**Oficina Principal y Producción**

Medellín: Calle 55 No 46-85 Itagüí, Antioquia; Tel: (574)370 1170; Fax: (574)277 5676; Coordenadas: 6° 10' 14.68 N 79° 36' 13.23 O [info@sulfoquimica.com](mailto:info@sulfoquimica.com)

**Producción**

Malambo Atlántico: Km 3 Vía Malambo - Sabanagrande; Parque Industrial PIMSA; Cel 3104044980 Coordenadas: 10° 50' 01.4" N 74° 46' 01.3" W;

Tel (575)347 8350; Fax: (575)3478353; [sobarranquilla@sulfoquimica.com](mailto:sobarranquilla@sulfoquimica.com)

Caloto: km. 7 Vía Caloto - Cauca. Cel 3217010527, 3157216417; Coordenadas: 3° 03' 13.0" N 79° 25' 55.9" W [socaloto@sulfoquimica.com](mailto:socaloto@sulfoquimica.com)

Barbosa: km. 4 Vía Girardota - El Haullo (Vereda Platanillo), Barbosa, Antioquia. Tel. (574)289 2480, Fax. (574)289 1234; Cel 3116740919 Coordenadas:

6°24'07.7" N 75°25' 10.4" W [sobarbosa@sulfoquimica.com](mailto:sobarbosa@sulfoquimica.com)

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

## AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

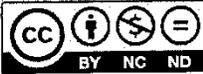
Yo **JESSICA PAULIN PÉREZ BELTRÁN** en calidad de titular de la obra **EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL AGENTE COAGULANTE –SULFATO DE ALUMINIO- EN EL PROCESO ACTUAL DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN DE AGUA POTABLE EN LA EMPRESA EAF SAS ESP**, elaborada en el año 2016, autorizo al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que me corresponde y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autor manifiesto conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor establezco las siguientes condiciones de uso de mi obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	

Licencias completas: [http://cc.creativecommons.org/?page\\_id=13](http://cc.creativecommons.org/?page_id=13)

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su autor.

De igual forma como autor autorizo la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

<b>AUTORIZO</b>	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	<input checked="" type="checkbox"/>	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación		<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Información Confidencial:</b> este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		<input checked="" type="checkbox"/>

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 22 días del mes de Agosto del año 2017.

**EL AUTOR:**

**Autor 1**

<b>Nombres</b>	<b>Apellidos</b>
JESSICA PAULIN	PÉREZ BELTRÁN
<b>Documento de identificación No</b>	<b>Firma</b>
1070969775	