

**EVALUACIÓN DEL EXTRACTO DE FIQUE EN LA POTABILIZACIÓN DE AGUA
POR COAGULACIÓN QUÍMICA.**

**MAHIRA ALEJANDRA FUYER GAZPAR
EDWARD CAMILO MORENO MUÑOZ**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
POPAYAN
2014**

**EVALUACIÓN DEL EXTRACTO DE FIQUE EN LA POTABILIZACIÓN DE AGUA
POR COAGULACIÓN QUÍMICA.**

**MAHIRA ALEJANDRA FUYER GAZPAR
EDWARD CAMILO MORENO MUÑOZ**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**Director
JAVIER ERNESTO FERNÁNDEZ MERA
Ingeniero Sanitario, MSc.**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2014**

Nota de aceptación:

Firma del director:

Firma del jurado:

Firma del jurado:

Popayán, 23 de Abril de 2014

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía y fortaleza, por permitirme cumplir mis metas.

A mis padres, abuelos y hermanos por ser lo más importante de mi vida, por su acompañamiento durante toda esta etapa, por brindarme su cariño y su apoyo incondicional. Gracias por sus consejos, cada palabra de aliento y por cada una de las enseñanzas recibidas.

MAHIRA ALEJANDRA FUYER G.

DEDICATORIA

A Dios por permitirme mantener el camino y cumplir mis metas.

A mis padres y hermana por estar a lo largo de toda mi vida y de esta etapa brindándome siempre su apoyo y compañía, por cada ayuda, cada momento, cada palabra y cada consejo para salir siempre adelante.

EDWARD CAMILO MORENO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias.

Doy gracias a mis padres: Flor Marina Gazpar y William Hernán Fuyer; por apoyarme en todo momento, por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación. Sobre todo por ser un excelente ejemplo a seguir.

A mis abuelos: Celmira Burgos y Jorge Hernan Fuyer; por haber confiado y creído en mí, por cada una de sus enseñanzas y por su apoyo incondicional.

A mis hermanos; por su apoyo, por ser parte de mi vida y por llenar mi vida de alegría.

A Camilo; por su apoyo y confianza, por ser esa gran persona, un excelente compañero y gran amigo.

A mis amigos; por su apoyo, por su amistad brindada y por cada una de las vivencias compartidas.

A mi director de trabajo de grado Javier Fernández, por el apoyo brindado, por su paciencia, dedicación y por cada uno de sus consejos.

A la Universidad del Cauca, docentes y profesores; por su tiempo, apoyo y conocimientos transmitidos.

A el Acueducto y Alcantarillado de Popayán - S.A. E.S.P; por el apoyo recibido.

A todas aquellas personas que hicieron que esto fuera posible y que de alguna u otra forma han aportado en mi vida personal y me han hecho crecer como persona.

MAHIRA ALEJANDRA FUYER G.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme salir adelante.

A mis padres y hermana; Claudia Muñoz, Eduardo Moreno, Julieth Moreno, por todo su apoyo y paciencia, por permitirme salir adelante para cumplir cada objetivo planteado ayudándome a superar todos los obstáculos y momentos duros acompañándome en cada instante de esta etapa.

A mis familiares; Por toda su ayuda y consejos.

A Alejandra; por su apoyo, compañía y confianza, por ser la persona que eres, una excelente compañera, una gran amiga.

A mis amigos; por todo el apoyo, el ánimo y fe, por el tiempo brindado, por los momentos alegres y los momentos que no lo fueron tanto, por todas las risas y su enorme compañía.

A mi director de trabajo de grado Javier Fernández por el apoyo, confianza y consejos brindados.

A la Universidad del Cauca, docentes y profesores por los conocimientos adquiridos.

A el Acueducto y Alcantarillado de Popayán - S.A. E.S.P; por el apoyo prestado.

A todas aquellas personas que de alguna forma u otra han aportado algo en mi vida haciéndome crecer como persona.

EDWARD CAMILO MORENO M.

TABLA DE CONTENIDO

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
2	JUSTIFICACIÓN.....	3
3	OBJETIVOS	4
3.1	OBJETIVO GENERAL	4
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
4	MARCO TEÓRICO	5
4.1	COAGULACIÓN.....	5
4.1.1	Factores que influyen en la coagulación	5
4.1.1.1	Características del agua	5
4.1.1.2	Tipo de coagulante	5
4.1.1.3	Dosis de coagulante	6
4.1.1.4	Intensidad y tiempo de mezcla rápida.....	7
4.1.1.5	Temperatura	7
4.2	FLOCULACIÓN.....	8
4.2.1	Factores que influyen en la floculación.	8
4.2.1.1	Concentración y naturaleza de las partículas.....	8
4.2.1.2	Tiempo de detención.	8
4.2.1.3	Gradiente de velocidad.....	9
4.2.1.4	Agitación.....	9
4.3	SEDIMENTACIÓN	9
4.4	SISTEMA DE SIMULACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN- SEDIMENTACIÓN: PRUEBA DE JARRAS.....	9
4.5	EL FIQUE.....	10
4.5.1	Usos del fique.....	10
4.5.2	Las saponinas y sus propiedades.....	11
5	METODOLOGIA	12
5.1	DESARROLLO METODOLÓGICO ESPECÍFICO	12

5.2	CONDICIONES PRELIMINARES.....	12
5.2.1	Calidad del agua cruda.....	12
5.2.2	Preparación del agua sintética.....	13
5.2.3	Dilución de los coagulantes empleados.....	13
5.2.4	Obtención del Extracto de fique.....	13
5.2.5	Parámetros e instrumentos de medición.....	14
5.3	FASE 1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN PARA LOS DOS COAGULANTES PRIMARIOS.....	14
5.3.1	Determinación de dosis óptima.....	15
5.3.2	Determinación de la mezcla rápida.....	15
5.3.3	Determinación de la mezcla lenta.....	15
5.3.4	Determinación pH óptimo.....	16
5.3.5	Determinación de velocidad y tiempo de sedimentación.....	16
5.4	FASE 2. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE USAR EL EXTRACTO DE FIQUE COMO COAGULANTE PRIMARIO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	16
5.5	FASE 3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE USAR EL EXTRACTO DE FIQUE COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	16
5.6	FASE 4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS COAGULANTES ESTUDIADOS CON Y SIN EL EXTRACTO DE FIQUE.....	17
6	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	18
6.1	DETERMINACION DE PARAMETROS OPTIMOS DEL PROCESO DE COAGULACION-FLOCULACION-SEDIMENTACION.....	18
6.1.1	Optimización de los parámetros para el sulfato de aluminio.....	18
6.1.1.1	Selección de dosis óptima para el sulfato de aluminio.....	18
6.1.1.2	Selección de gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida para el sulfato de aluminio.....	19
6.1.1.3	Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta para el sulfato de aluminio.....	20
6.1.1.4	Selección de pH óptimo para el sulfato de aluminio.....	21
6.1.1.5	Selección de la velocidad y tiempo de sedimentación para el sulfato de aluminio.....	21
6.1.2	Optimización de los parámetros para el cloruro férrico.....	23
6.1.2.1	Selección de dosis óptima para el cloruro férrico.....	23

6.1.2.2	Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida para el cloruro férrico.	23
6.1.2.3	Selección de gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta para el cloruro férrico.	24
6.1.2.4	Selección de pH óptimo para el cloruro férrico.....	25
6.1.2.5	Selección de la velocidad y tiempo de sedimentación para el cloruro férrico.	26
6.2	DESARROLLO DEL OBJETIVO 1. DETERMINACIÓN DEL EXTRACTO DE FIQUE COMO COAGULANTE PRIMARIO EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA.	27
6.3	DESARROLLO OBJETIVO 2: DETERMINACIÓN DEL EXTRACTO DE FIQUE COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN USANDO DOS COAGULANTES PRIMARIOS.	28
6.3.1	Condiciones operacionales para la realización de las pruebas.	28
6.3.2	Resultados con el sulfato de aluminio usando extracto de fique como ayudante de coagulación.	29
6.3.3	Resultados con el cloruro férrico usando extracto de fique como ayudante de coagulación.	30
6.3.4	Procesamiento de datos y análisis de resultados.....	31
6.3.4.1	Análisis estadístico para sulfato de aluminio con y sin extracto de fique como ayudante.....	31
6.3.4.1.1	Análisis de los resultados de turbiedad.	31
6.3.4.1.2	Análisis de los resultados de color	32
6.3.4.1.3	Análisis de los resultados de pH.....	33
6.3.4.1.4	Análisis para los resultados de absorbancia.....	33
6.3.4.2	Análisis estadístico utilizando cloruro férrico con y sin extracto de fique como ayudante.....	34
6.3.4.2.1	Análisis de los resultados de turbiedad.	34
6.3.4.2.1.1	<i>Determinación de la dosis con mayor efecto sobre la calidad del agua por medio del grafico de cajas y bigotes con muescas de mediana.....</i>	35
6.3.4.2.1.2	<i>Eficiencias de remoción para turbiedad con diferentes dosis de extracto de fique.</i>	36
6.3.4.2.2	Análisis para los resultados de color.	37
6.3.4.2.3	Análisis para los resultados de pH.....	38
6.3.4.2.4	Análisis de los resultados de absorbancia.....	38
6.4	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE TURBIEDAD PARA LOS DOS COAGULANTES PRIMARIOS CON EL EXTRACTO DE FIQUE COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN	39
7	CONCLUSIONES	41

8	RECOMENDACIONES.....	42
9	BIBLIOGRAFÍA.....	43
10	ANEXOS (CONTENIDO EN EL CD ANEXOS)	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones iniciales para la preparación del agua sintética	13
Tabla 2. Parámetros e instrumentos de medición	14
Tabla 3. Resultados promedio obtenidos para los parámetros de calidad de agua usando el extracto de fique como coagulante primario.	27
Tabla 4. Datos operacionales para los coagulantes primarios.	28
Tabla 5. Dosis de extracto de fique establecidas	29
Tabla 6. Resumen de los resultados obtenidos para los parámetros de calidad... ..	29
Tabla 7. Resumen de los resultados obtenidos para los parámetros de calidad de agua.	30
Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis para turbiedad usando sulfato de aluminio con y sin el blanco.	32
Tabla 9. Prueba de Kruskal-Wallis para sulfato de aluminio con extracto de fique como ayudante.	32
Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis para pH usando sulfato de aluminio y extracto de fique como ayudante.	33
Tabla 11. Prueba de Kruskal-Wallis para absorbancia utilizando sulfato de aluminio y extracto de fique como ayudante.	34
Tabla 12. Prueba de Kruskal-Wallis para turbiedad usando Cloruro férrico con y sin extracto de fique como ayudante.	35
Tabla 13. Prueba de Kruskal-Wallis para color usando cloruro férrico y extracto de fique como ayudante.	37
Tabla 14. Prueba de Kruskal-Wallis para pH utilizando cloruro férrico y extracto de fique como ayudante.	38
Tabla 15. Prueba de Kruskal-Wallis para absorbancia utilizando cloruro férrico y extracto de fique como ayudante.	39
Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para turbiedad utilizando cloruro férrico y sulfato de aluminio con extracto de fique como ayudante.	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de extracción, maceración del extracto de fique (a) y filtración del extracto de fique (b)	14
Figura 2. Selección de dosis óptima para el sulfato de aluminio	18
Figura 3. Selección de gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida para el sulfato de aluminio, Color (a) y Turbiedad (b)	19
Figura 4. Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta para el Sulfato de Aluminio, Turbiedad (a) y Color (b)	20
Figura 5. Selección de pH óptimo para el Sulfato de Aluminio	21
Figura 6. Curva de sedimentación para el sulfato de aluminio.	22
Figura 7. Selección de dosis óptima de Cloruro Férrico	23
Figura 8. Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida para el cloruro férrico, Turbiedad (a) y Color (b)	24
Figura 9. Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta para el cloruro férrico, Turbiedad (a) y Color (b)	25
Figura 10. Selección de pH óptimo para el cloruro férrico.....	26
Figura 11. Curva de sedimentación para el sulfato de aluminio.	26
Figura 12. Gráfico de cajas y bigotes con muescas de mediana.	36
Figura 13. Porcentajes de remoción para turbiedad usando cloruro férrico y extracto de fique como ayudante.	37

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es un término empleado para describir las características físicas, químicas y biológicas del recurso hídrico, dependiendo generalmente del uso al que se destina. La definición de la calidad del agua se basa en la utilización conjunta de parámetros de tipo fisicoquímico y biológico, con los cuales se evalúan los diferentes fenómenos o alteraciones que puede presentar un cuerpo de agua (CVC, 2008). Uno de los problemas principales del uso de agua superficial como fuente de agua potable es el alto contenido de materia orgánica natural, ésta puede causar olor, puede influir en el sabor y puede aumentar el crecimiento de la corrosión y la biopelícula en la red de distribución (Meier *et al*, 2006).

La actividad agrícola de la mayoría de los países suramericanos, genera en muchos casos numerosos residuos, lo que conlleva un gran impacto ambiental y una preocupación sobre el adecuado manejo de los mismos (Jaramillo, 2009). La producción de fibra de fique genera impactos ambientales, debido al vertimiento de los residuos sin tratamiento. Estos desechos generados, especialmente los líquidos sin un manejo adecuado ocasionan problemas de contaminación hídrica afectando la ictiofauna de las quebradas y la disponibilidad de los recursos hídricos para consumo humano y animal (Mojica y Paredes, 2004; citado por Solarte *et al*, 2011). Sus principales impactos están relacionados con altas cargas orgánicas que genera reducción en el oxígeno disuelto de la fuente receptora, el vertimiento de sustancias como el extracto de fique afecta la vida acuática.

En la planta del fique se encuentra variedad de aplicaciones para beneficio ambiental, estudios realizados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2006) muestran que residuos del desfibrado han sido empleados como abono orgánico para la recuperación de suelos, también se ha utilizado como medio de protección del suelo puesto que esta planta controla la erosión, aumenta la materia orgánica y evita la pérdida de elementos vitales. Por otro lado, los jugos que resultan del desfibrado se pueden usar en el riego de cultivos como control de plagas. Lo anterior abarca beneficios solo a nivel de suelo, se cuentan con pocos estudios que contienen los posibles beneficios del extracto de fique para el recurso hídrico, ya que ésta planta es vista como contaminante tóxico para la biota acuática.

El presente documento tiene como objetivo evaluar el extracto de fique como un potencial coagulante primario o ayudante de coagulación para el tratamiento de aguas para consumo humano mediante la realización de pruebas de jarras a nivel de laboratorio, teniendo en cuenta la utilización de dos diferentes agentes de coagulación (cloruro férrico y sulfato de aluminio) en el proceso de coagulación-floculación y sedimentación. La investigación se desarrolló en las instalaciones de la Universidad del Cauca con el apoyo del Acueducto y Alcantarillado de Popayán - S.A. E.S.P.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cabuya es la fibra natural de mayor producción en Colombia, esta fibra proviene del fique la cual es una planta fibrosa que crece de forma natural en la región andina de Colombia y de otros países de América tropical, desde México hasta Brasil (Rodríguez y Lozano, 2012). La transformación del fique demanda grandes volúmenes de agua, especialmente durante la etapa de lavado de fibra, donde se genera el “Licor Verde” que contiene celulosa y otros compuestos que son vertidos directamente a quebradas y/o fuentes de agua con la consiguiente contaminación e impacto de las comunidades acuáticas (Dagua *et al* , 2008). Lo anterior, se debe a las propiedades fisicoquímicas de los jugos contenidos en el fique por cuanto estos contienen un alto contenido de azúcares, principalmente sacarosa, glucosa y fructosa, proteínas sapogénicas, esteroides y minerales que como lo demuestra un estudio realizado por la universidad del Bosque son extremadamente tóxicos para los peces y los organismos acuáticos (Martínez & Caicedo, 2002; Citado por MAVDT, 2006).

Otras investigaciones han determinado que fuentes de agua contaminadas con residuos de extracto de hojas de fique pueden alcanzar concentraciones de DQO del orden de los 1000 mg/L, lo cual lo convierte en una sustancia de gran impacto y altamente contaminante (Ecofibras Ltda. et al. 2004; Citado por Rivas, 2012).

Además de la toxicidad generada en los organismos acuáticos, el proceso de desfibrado del fique genera altos volúmenes de biosólidos los cuales no son aprovechados, generando problemas de atracción de moscas y contaminando las fuentes hídricas por escorrentía y las aguas subterráneas por filtración y lixiviación (MAVDT, 2006). Por este motivo, se requiere hacer un correcto aprovechamiento de los residuos de fique para así disminuir los efectos que tienen estos residuos al contaminar los cuerpos de agua. Tal condición, lleva a evaluar los procesos de extracción de la fibra de fique, con el fin de plantear alternativas de manejo agroindustrial asequibles para el campesino (CASTELLANOS, 2001).

2 JUSTIFICACIÓN

Estudios recientes con el jugo de fique en el agua realizados por Lozano (2012), han indicado que el uso del extracto de fique (*Furcraea* sp) puede ser empleado como un potencial coadyuvante de coagulación para el tratamiento de efluentes de pastelería. Se estima que más de la mitad del agua usada es descargada como agua residual; esta agua proviene especialmente de las actividades de limpieza de equipos y aseo de las instalaciones. Otros estudios realizados por Lozano (2012) indican que el uso del extracto de fique también puede ser un potencial coadyuvante de coagulación para el tratamiento de lixiviados donde las saponinas presentes en el extracto de la hoja de fique, entre otras propiedades, actúan como agentes surfactantes biodegradables que, disueltos en el agua, reducen su tensión superficial y actúan como disgregantes de grasas y aceites. Estas características anfífilas pueden ser aprovechadas como potenciales coadyuvantes de coagulación química en la remoción de contaminantes presentes en los lixiviados con el fin de incrementar las posibilidades de aprovechamiento de la planta.

En la planta de tratamiento de potabilización de agua “El Tablazo” ubicada en la ciudad de Popayán, se ha evidenciado una mejora en la remoción de turbiedad del agua, sin necesidad de utilizar coagulante primario, se cree que esta mejora se debe a los residuos del fique, lo cuales son vertidos aguas arriba de la bocatoma de la planta (Ramírez, 2013). Con base a esto, en el presente estudio se evaluó el uso del extracto de fique como un potencial coagulante primario y/o ayudante de coagulación en el tratamiento del agua para consumo humano como una alternativa para el aprovechamiento de los residuos del fique.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el extracto de fique como un potencial coagulante primario y/o ayudante de coagulación para el tratamiento de aguas para consumo humano.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar comparativamente distintas concentraciones del extracto de fique como coagulante primario en el tratamiento de agua para consumo humano.
- Evaluar el efecto de usar el extracto de fique como ayudante de coagulación en el tratamiento de agua para consumo humano.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 COAGULACIÓN

Se denomina coagulación al proceso de desestabilización y posterior agregación de partículas en suspensión coloidal presentes en el agua, para potenciar la etapa de sedimentación de partículas las cuales deben separarse del agua. El objetivo de la coagulación como proceso previo a la sedimentación es cambiar las propiedades de los elementos insolubles, de modo que sean más fácilmente separables (Pérez & Urrea, 2011). Básicamente consiste en una serie de reacciones químicas entre los coagulantes, las superficies de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma (Arboleda, 2000).

4.1.1 Factores que influyen en la coagulación

Los siguientes factores afectan el proceso de coagulación: características físicas y químicas del agua, dosis y tipos de coagulantes, intensidad y tiempo de la mezcla rápida y temperatura (Arboleda, 2000).

4.1.1.1 Características del agua

Las características físicas y químicas del agua cruda que más influencia tienen en el proceso son:

- La concentración de coloides evaluada directamente mediante la medición de los parámetros de turbiedad y color.
- El pH y la alcalinidad, en especial cuando son sales de aluminio y de hierro los coagulantes utilizados. El pH es la variable más importante que tiene una gran influencia en la coagulación, en general el pH óptimo para la coagulación de aguas con color es más bajo, ese rango está entre (4 – 6 unidades) que para aguas con turbiedad en donde el pH óptimo fluctúa entre (6.5 – 8.5 unidades). Regularmente las sales férricas son efectivas en un rango mucho más amplio de pH que las sales de aluminio.

4.1.1.2 Tipo de coagulante

Los coagulantes los podemos clasificar en dos grupos: Los ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos, además de la existencia de coagulantes de origen natural (Rodríguez, 2008). Los ayudantes de coagulación o coagulantes auxiliares más conocidos son los álcalis y los ácidos, en este grupo también se incluyen los polielectrolitos, compuestos de alto peso molecular que se aplican en muy pequeñas concentraciones y son usados en plantas de tratamiento, estos al ser usados en unión de coagulantes metálicos comunes, producen un floc que sedimenta rápidamente, pero dosis excesivas producen dispersión en lugar de ayudar a la coagulación. Los polielectrolitos pueden ser de origen sintético o natural, los últimos están presentes en aguas naturales y pueden ser activados mediante un tratamiento adecuado. Un ejemplo muy particular es el almidón de yuca.

En cuanto a los coagulantes metálicos se puede clasificar en tres tipos: sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios. Las sales de aluminio forman un floc ligeramente pesado. El sulfato de aluminio, es el coagulante más conocido, llamado también alumbre, éste por su bajo costo y su manejo relativamente sencillo se usa con mayor frecuencia en las plantas de tratamiento de agua potable. Las sales de hierro más conocidas son: el cloruro férrico, el sulfato férrico y sulfato ferroso, tienen ventaja sobre las sales de aluminio en algunos casos, porque forman un floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento. (Arboleda, 2000). Además, las sales de hierro pueden tener ventaja sobre las sales de aluminio porque pueden trabajar con un rango de pH mucho más amplio. Sin embargo, su manejo a nivel de planta es más complejo que el de las sales de aluminio debido al efecto corrosivo que genera en las estructuras y equipos de dosificación (Gómez, 2005). Cada coagulante, dependiendo de la calidad y característica del agua, actúa de modo diferente. Por tanto, la selección del tipo de coagulante deberá hacerse mediante trabajo a nivel de laboratorio.

4.1.1.3 Dosis de coagulante

En general la dosis requerida depende en gran parte del mecanismo de desestabilización, en el caso de baja turbiedad cuando se necesita un floc de hidróxido voluminoso, la dosis requerida tiende a disminuir a medida que la concentración de coloides aumenta, en el caso de alta turbiedad una buena parte de la desestabilización se lleva a cabo por adsorción y la dosis requerida es menor incrementándose con la concentración de coloides. Las aguas de baja turbiedad pueden ser coaguladas por otra técnica auxiliar que consiste en la adición de partículas de arcilla para aumentar la turbiedad antes de agregar el coagulante, con la cual la coagulación se efectúa en buena parte por adsorción y no por barrido requiriéndose así menores dosis de coagulante.

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así:

- Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflóculos es muy escaso, por lo tanto la turbiedad residual es elevada.
- Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada.
- La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de pruebas de jarra. (Cárdenas, 2000)

La dosis de coagulante requiere determinarse experimentalmente. Muchos autores dan diversas opiniones acerca de los factores que afectan o determinan el establecimiento de la dosis de coagulante, aunque están de acuerdo que existe para cada tipo de agua una dosis óptima de coagulante (Gómez, 2005).

4.1.1.4 Intensidad y tiempo de mezcla rápida

Se requiere una mezcla adecuada para que el coagulante sea distribuido uniformemente a través del agua. Por tanto se debe realizar la mezcla lo más rápidamente que sea posible ya que las reacciones se completan en tiempos menores que un segundo cuando la coagulación se realiza por adsorción y en menos de 8 segundos cuando se efectúa por precipitación de hidróxidos. La intensidad de agitación o de mezcla se relaciona con el gradiente de velocidad, el cual se deriva de la cantidad media de trabajo aplicado por unidad de tiempo a un volumen unitario bajo una determinada viscosidad. El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecho y que se produzca la reacción química de neutralización de cargas correspondiente (Gómez, 2005). El tiempo necesario para que la reacción sea completa es determinado en parte por la concentración de coagulantes. Cuando la solución es concentrada, los iones reactivos están tan cerca uno del otro que su movilidad normal es un desplazamiento corto y por lo tanto poco tiempo para que se produzca la reacción. Cuando la solución esta diluida, como lo es en la práctica de tratamiento de aguas, el tiempo sería demasiado largo si no se utilizara algún sistema que acorte la distancia o el tiempo de traslado entre las moléculas adyacentes (American Water Works Association, 1986).

4.1.1.5 Temperatura

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación (Cárdenas, 2000). La temperatura cambia el tiempo de formación del floc, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación del floc es mayor (Bedoya & Giraldo, 2012).

4.2 FLOCULACIÓN

La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microfloculos y después en los flóculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes construidos para este fin, denominados decantadores (Pérez & Urrea, 2011). La formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras. Puede ser causada por la colisión entre las partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las superficies sólidas, las fuerzas de Vander Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión, por la reducción de la carga eléctrica que trae como consecuencia la disminución de la repulsión eléctrica. La floculación puede ser ortocinética, que es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias) y es cuando los contactos son producidos por el movimiento del fluido, o pericinéctica que es la promovida dentro del líquido por el movimiento que tienen las partículas en él, debido a la agitación y por la gravedad y el peso de las partículas, las que se aglomeran al caer y es cuando el contacto entre las partículas es producido por el movimiento Browniano (Acosta, 2006).

4.2.1 Factores que influyen en la floculación.

La floculación está condicionada por una serie de factores que determinan su eficacia en el proceso de separación de la fase sólido/líquido. Dichos factores son:

4.2.1.1 Concentración y naturaleza de las partículas.

La velocidad de formación del floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.

4.2.1.2 Tiempo de detención.

La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación en cámaras. Se puede decir que una eficiencia dada se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie. Por razones de orden práctico el número de cámaras no puede ser muy grande, estableciéndose un mínimo de tres (3) unidades (Bedoya & Giraldo, 2012).

4.2.1.3 Gradiente de velocidad.

Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del floc (Bedoya & Giraldo, 2012). El tiempo y el gradiente de velocidad son importantes al aumentar la probabilidad de que las partículas se unan y da más tiempo para que las partículas descendan, por efecto de la gravedad, y así se acumulen en el fondo (Elizalde *et al*, 2008).

4.2.1.4 Agitación.

Una adecuada agitación es necesaria tanto en el momento de dosificación del polímero como en el proceso de formación y engorde del flóculo. La dispersión del polímero en el seno del agua exige una rápida agitación para favorecer una floculación homogénea en todos los puntos y crear un tamaño de flóculo igualmente homogéneo. Una vez iniciada la floculación, conviene reducir la velocidad de agitación para evitar el rompimiento del floc. De cualquier modo, es necesario siempre un óptimo estado de agitación para lograr que las partículas se acerquen lo suficiente para formar puentes de enlace y formar los agregados (Perez & Urrea, 2011).

4.3 SEDIMENTACIÓN

Cuando hablamos de sedimentación se entiende por esta la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación (CEPIS, 2004). Estas partículas sólidas están constituidos generalmente por arenas, limos y coloides agrupados mediante las etapas anteriores de coagulación y floculación (Cogollo, 2010).

4.4 SISTEMA DE SIMULACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN: PRUEBA DE JARRAS

La prueba de jarras es un procedimiento que se utiliza comúnmente en los laboratorios. Este método determina las condiciones de operación óptimas generalmente para el tratamiento de aguas, la prueba muestra resultados de la eficacia del tratamiento en términos de materia en suspensión y remoción de materia orgánica. Sin embargo, a pesar de tener todos estos resultados, la selección de coagulante no es una tarea fácil ya que un coagulante puede eliminar eficazmente los sólidos en suspensión, pero al mismo tiempo aumenta la conductividad y aumenta considerablemente la producción de lodos que contienen productos químicos tóxicos y colorantes. Esto hace que la selección final de coagulantes sea muy dependiente de la importancia relativa asignada a cada parámetro medido (Aragonés *et al*, 2009). Es la técnica más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros. En ella se tratan de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio. Existe en el mercado una gran variedad de equipos para pruebas de

jarras, pero en toda su versatilidad debe radicar en utilizar una serie de jarras al mismo tiempo y la posibilidad de variación de la velocidad de agitación (r.p.m).

En este proceso influyen factores químicos e hidráulicos. Entre éstos tenemos:

1. pH
2. Temperatura
3. Concentración de coagulante
4. Secuencia de aplicación de las sustancias químicas
5. Grado de agitación
6. Tiempo de sedimentación (Acosta, 2006)

Estos sistemas consisten en simular en vasos de precipitado o jarras el proceso de coagulación que se produce en la planta de tratamiento y evaluar distintos parámetros durante o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento (RAS, 2000). Las pruebas de jarras pueden utilizarse tanto para controlar la coagulación-floculación de una planta de tratamiento existente como para obtener los datos de diseño para el proyecto de nuevas unidades (Cepis, 1973).

4.5 EL FIQUE

El fique es una planta originaria de la América Tropical, su cultivo se da de manera particular en las zonas andinas de Colombia, crece casi en todos los climas, se desarrolla incluso en sitios donde la tierra no es apta para los cultivos. Son plantas grandes, de tallo erguido, su altura varía entre 2 y 7 m, de hojas de color verde, en forma radial, largas (1 a 3m), angostas (10 y 20 cm), carnosas, puntiagudas, acanaladas, y dentado espinosas (MAVDT, 2006).

El extracto presente en la hoja de fique es de color verde ocre y olor fuerte, con una densidad media de 1.02 kg/L y un pH que oscila entre las 4 y las 5 unidades. Está conformado por un 85 % de agua, 6% de celulosa (D-glucosa), 8 % de materia orgánica (sacarosa, proteínas, nitrógeno, fósforo, calcio, potasio, saponinas y sapogeninas) y 1 % de minerales (Lozano, 2012). Del desfibrado, queda un 96 % de residuos y subproductos que en general, se desechan. El jugo constituye el 70 % (MAVDT, 2006).

4.5.1 Usos del fique

La fabricación de empaques, textiles, tapetes y artesanías, se ha constituido en la gama de productos más elaborados a partir de la fibra del fique. Las investigaciones que se han venido adelantando en cuanto al aprovechamiento integral de la planta concluyen que el panorama del fique es más amplio y promisorio (FAO, 2009). El fique es una fibra biodegradable, de la cual sólo se utiliza el 4 % y el 96 % restante, que son residuos compuestos por el jugo y el bagazo, se desechan. El programa de aprovechamiento múltiple de esta planta, desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) en conjunto con la Compañía de Empaques y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural tiene

como objetivo utilizar del fique no sólo su fibra para hacer empaques, cabuya y productos artesanales, sino también usar su jugo y bagazo (Osorio, 2010).

Los usos del jugo de fique son amplios. Con el extracto se puede producir etanol gracias a las levaduras presentes en este desecho; también se han descubierto compuestos químicos esteroidales que sirven para ser la base de antibióticos. Igualmente presenta propiedades fungicidas e insecticidas, que sirve como controlador de plagas. El jugo de fique, es una sustancia que se caracteriza por tener propiedades tensoactivas, y por poseer esteroides naturales entre los que se han encontrado saponinas y fitoesteroles (Osorio, 2010).

4.5.2 Las saponinas y sus propiedades

Las saponinas son moléculas de estructuras diversas denominadas químicamente como triterpenos y glicósidos esteroides que consisten en agliconas no polares unidas con una o más fracciones de monosacáridos (Oleszek y Bilaly, 2006; citado por Benavides *et al*, 2011); esta combinación de elementos polares y no polares explican su comportamiento como jabón en soluciones acuosas (Benavides *et al*, 2011). Algunas de las propiedades halladas en las saponinas presentes en el extracto de la hoja de fique son las de actuar como agente surfactantes biodegradables que, disueltos en agua, reducen la tensión superficial y actúan como disgregantes de grasas y aceites. (Lozano, 2012). Conociendo la existencia de saponinas en los jugos y su responsabilidad como agente tóxico, es posible que se desarrollen tecnologías que nos permitan el manejo de estos jugos, para ser utilizados como pesticidas, fertilizantes o herbicidas para solucionar el problema de contaminación (MAVDT, 2006).

5 METODOLOGIA

5.1 DESARROLLO METODOLÓGICO ESPECÍFICO

El estudio fue realizado dentro de las instalaciones de la Universidad del Cauca en el laboratorio de Química Sanitaria y Ambiental de la facultad de Ingeniería Civil, mediante la prueba de jarras.

Se preparó inicialmente el agua sintética a nivel de laboratorio determinándose los parámetros óptimos de tratabilidad relacionados con el proceso de coagulación, floculación y sedimentación, con ensayos a escala de laboratorio con dos coagulantes: sulfato de aluminio y Cloruro férrico en solución y finalmente se probó el extracto de fique como posible coagulante o ayudante de coagulación.

El estudio para la determinación del extracto de fique como posible coagulante o ayudante fue desarrollado por etapas, la primera comprendió los estudios de la determinación de los parámetros óptimos de tratabilidad relacionados con el proceso de coagulación (dosis, pH, gradiente y tiempo de mezcla rápida y lenta, velocidad y tiempo de sedimentación) para los dos coagulantes primarios sulfato de aluminio y cloruro férrico; la segunda etapa abarcó el uso del extracto de fique como posible coagulante primario, la tercera fase comprendió el uso del extracto de la hoja de fique como posible ayudante de coagulación para los coagulantes primarios empleados en el estudio, por último la cuarta etapa en la que se compararon los resultados obtenidos para los parámetros de turbiedad, color, pH y absorbancia con los coagulantes primarios con y sin extracto de fique como ayudante de coagulación teniendo en cuenta los parámetros óptimos de tratabilidad seleccionados.

5.2 CONDICIONES PRELIMINARES.

En la presente investigación no se utilizó el agua cruda de la bocatoma de la planta de tratamiento “El Tablazo” ya que ésta viene con trazas de residuos de fique, por esta razón, se preparó el agua en el laboratorio (agua sintética) tomando como referencia la información de la calidad del agua cruda que entró a la planta en el año 2012 suministrada por el Acueducto y Alcantarillado de Popayán de la planta “El Tablazo”, donde el agua preparada tuvo características similares a los datos proporcionados.

5.2.1 Calidad del agua cruda

Teniendo en cuenta que la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P suministró la información sobre la calidad de agua cruda del río Las Piedras que abastece a la planta de tratamiento “El Tablazo” de los parámetros de turbiedad, color, pH para el año 2012; los cuales fueron tomados en cuenta para la preparación del agua sintética en el laboratorio.

En la tabla 1 se presentan los valores de los parámetros de calidad de agua (turbiedad, color, pH) que se obtuvieron mediante percentiles 80 con los cuales se preparó el agua sintética en el laboratorio de Química Ambiental y Sanitaria para el posterior estudio. En el anexo 1 se muestra la información proporcionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P

Tabla 1. Condiciones iniciales para la preparación del agua sintética

Parámetro	Valor	Unidad
Turbiedad	<7.2	NTU
Color	<22.3	Pt/Co
pH	<7.8	Unidades de pH

Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Preparación del agua sintética

Se tomó de la llave agua potable del laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria para asemejar esta agua a las características promedio del agua de la bocatoma de la planta “El Tablazo”. Para simular estas condiciones se trabajó con arcilla no plastificable para ajustar la turbiedad alrededor de los valores establecidos, también se emplearon bolsas de aromática (manzanilla) de origen orgánico para ajustar el color cercano a los valores determinados. En cuanto a la alcalinidad no fue necesario agregar cal ya que el agua presentaba valores óptimos de alcalinidad con valores cercanos a 30 mg/L CaCO₃.

5.2.3 Dilución de los coagulantes empleados.

Los coagulantes empleados (sulfato de aluminio y cloruro férrico) fueron suministrados por la planta de tratamiento “El Tablazo”, a una concentración del 50% P/V para el sulfato de aluminio y del 42% P/V para el cloruro férrico; los cuales fueron llevados al laboratorio y diluidos a una concentración del 1% V/V.

5.2.4 Obtención del Extracto de fique

El extracto de fique se obtuvo manualmente en la Finca el Oasis ver anexo 35 (registro fotográfico). En el procedimiento de extracción, las hojas fueron maceradas y exprimidas, y luego almacenadas en un recipiente plástico limpio y rotulado para luego ser transportadas a las instalaciones del laboratorio de Química Ambiental y Sanitaria. Para obtener un extracto libre de grumos y material suspendido, se filtró a través de un geotextil NT 2000 de Pavco. Una vez filtrado el jugo del fique se procedió a diluirlo a una concentración del 1 % v/v.

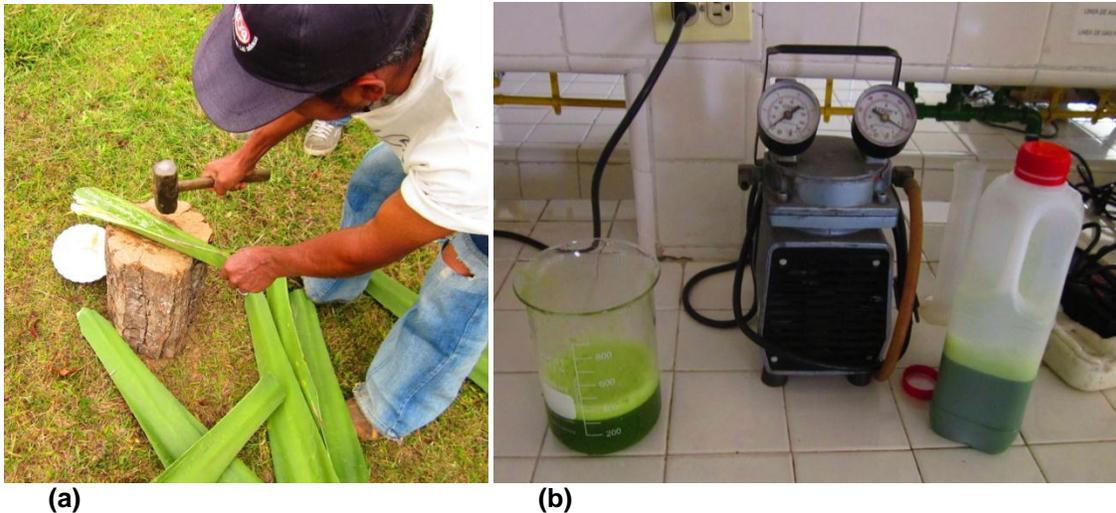


Figura 1. Proceso de extracción, maceración del extracto de fique (a) y filtración del extracto de fique (b)

5.2.5 Parámetros e instrumentos de medición.

El tratamiento fue realizado en un equipo de pruebas de jarra, donde se simuló el proceso de tratamiento hasta el proceso de sedimentación. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para la medición de la calidad de agua se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros e instrumentos de medición

Variable	Instrumento de medición	Método estándar
	Prueba de Jarras	-
pH (unidades)	pHmetroHatch	-
Color (UPC)	Espectrofotómetro	2120 C.
Turbiedad (NTU)	Hach DR/2010	2130 B.
Alcalinidad	Equipo para titulación	2320 B.
Absorbancia UV 254 nm	Espectrofotómetro Merck Pharo 300	-

Fuente: elaboración propia.

Para la determinación de la alcalinidad total se utilizó el método titulométrico con solución titulante de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.02 N.

5.3 FASE 1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN PARA LOS DOS COAGULANTES PRIMARIOS.

Se determinaron los parámetros óptimos referentes al proceso de coagulación-floculación por medio de pruebas de jarras, las cuales arrojaron resultados de: dosis óptimas, pH's óptimos de coagulación, gradientes y tiempos de mezcla

rápida y lenta, velocidad y tiempos de sedimentación para cada uno de los dos coagulantes estudiados.

5.3.1 Determinación de dosis óptima.

Una vez preparada el agua sintética se tomaron alícuotas de 2 litros para cada una de las jarras que fueron puestas en el equipo de jarras respectivamente, enseguida se añadió la solución de coagulante a una concentración 1 % v/v a las cinco primeras jarras a diferentes dosis (10, 15, 20, 25 y 30 mg/L) dejando el 6° vaso como control; luego se simuló la mezcla rápida agitando por un minuto a 300 RPM, después se procedió al proceso de floculación a un gradiente de 40 RPM durante 20 minutos, se levantaron las paletas y se dejó sedimentar durante 20 min. Al finalizar el proceso de coagulación-floculación y sedimentación se tomó una muestra de cada jarra para medición de los parámetros de turbiedad, color, pH y alcalinidad. Este procedimiento se repitió tres veces donde según los resultados obtenidos se acortaron los rangos de dosificación; teniendo en cuenta los mejores resultados se escogió la dosis que mejor resultado presentó en los parámetros de calidad de agua. Este mismo procedimiento se realizó de la misma manera para los dos coagulantes empleados en el estudio (sulfato de aluminio y cloruro férrico).

5.3.2 Determinación de la mezcla rápida

Una vez determinada la dosis óptima para cada coagulante se vaciaron proporciones de 2 litros de agua preparada en cada una de las jarras que fueron puestas en el equipo, luego se agregó la dosis óptima de coagulante determinada; luego se simuló la mezcla rápida donde se evaluaron tiempos de mezcla rápida (10 hasta 60 segundos); considerando un intervalo de 10 segundos entre cada jarra, de esta manera la primera jarra quedó con tiempo de mezcla rápida de 60 segundos y la última con un tiempo de 10 segundos; con gradientes de 300, 150 y 100 rpm; las muestras se flocularon a una velocidad de 40 RPM durante 20 minutos, luego se levantaron las paletas para sedimentar por 20 minutos. Al final se tomaron muestras de cada jarra y se realizó la medición de los parámetros requeridos (turbiedad, color, pH). Se consideró como gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida aquellos que generaron los mejores resultados en los parámetros de calidad de agua.

5.3.3 Determinación de la mezcla lenta

Una vez determinado el gradiente y el tiempo óptimo de mezcla rápida se procedió a vaciar porciones de 2 litros de agua a cada una de los vasos para ser puestos en la prueba de jarras, luego se agregó la dosis de coagulante determinada y se agitaron las muestras al gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida previamente seleccionado; en este procedimiento se evaluaron gradientes de floculación (20, 30, 40, 50 y 60 RPM) a diferentes tiempos de floculación en cada jarra (10, 15, 20, 25, 30, 40 minutos), luego se dejó sedimentar durante 20 minutos. Finalizado el proceso de coagulación, floculación y sedimentación, se tomó una muestra de cada jarra y se midieron los parámetros de color, turbiedad y pH residual. Se

consideró como gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta aquellos que generaron los mejores resultados en los parámetros de calidad de agua.

5.3.4 Determinación pH óptimo

Se tomaron 2 litros de agua preparada para cada una de las jarras, luego se procedió a ajustar el pH de cada una de las jarras con ácido sulfúrico 0.02 N e hidróxido de sodio 0.02 N, en un rango de 4.0 – 12.0 unidades de pH respectivamente; las jarras fueron llevadas al equipo y se ajustaron los parámetros óptimos de coagulación y floculación previstos. La sedimentación se realizó durante 20 minutos. Se consideró como pH óptimo aquel que generó los mejores resultados en los parámetros de calidad de agua.

5.3.5 Determinación de velocidad y tiempo de sedimentación

Se dosificó la dosis óptima determinada en cada jarra y se fijaron los gradientes y tiempos de mezcla de rápida, mezcla lenta y pH óptimo previstos. Se midió la distancia del nivel de agua en la jarra al punto de toma de la muestra (10 cm). Para la sedimentación se tuvo en cuenta un tiempo diferente para cada Jarra (5, 7, 10, 12, 15, 18, 20, 23, 25, 27, 30 y 40 minutos), luego se tomaron muestras de turbiedad y color del agua sedimentada después de cada tiempo de sedimentación. Finalmente se graficó la velocidad de sedimentación versus la fracción de turbiedad removida. Con la distancia del nivel de agua y la velocidad de sedimentación crítica determinada se halló el tiempo de sedimentación óptimo para cada coagulante estudiado.

5.4 FASE 2. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE USAR EL EXTRACTO DE FIQUE COMO COAGULANTE PRIMARIO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO.

Se realizaron seis pruebas de jarras con diferentes dosis de extracto de fique (15, 17.5, 20, 22.5, 25, 35 mg/L) a una concentración 1 % v/v, las dosis fueron adicionadas a las muestras de agua preparada, luego se tomaron muestras de cada jarra a las cuales se les midieron los parámetros de calidad de agua (turbiedad, color, pH).

En esta fase no se realizaron las pruebas de optimización, lo cual se argumenta en el apartado de presentación y discusión de resultados.

5.5 FASE 3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE USAR EL EXTRACTO DE FIQUE COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO.

Se realizaron nueve pruebas de jarras para cada coagulante primario (sulfato de aluminio y cloruro férrico) utilizando la dosis y condiciones óptimas de cada coagulante determinada en la fase 1 con diferentes dosis de extracto de fique (0, 5, 10, 15, 17, 20 mg/L) como ayudante de coagulación obteniendo 9 réplicas para

cada dosis de extracto de fique, logrando un total de 54 datos para cada uno de los parámetros estudiados (turbiedad, color, pH) y 18 datos más para el parámetro de absorbancia por medio del método de espectrofotometría UV (254 nm) por el cual se determinó indirectamente el aumento o disminución de la materia orgánica. Esto se realizó tanto para el sulfato de aluminio como para el cloruro férrico.

5.6 FASE 4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS COAGULANTES ESTUDIADOS CON Y SIN EL EXTRACTO DE FIQUE.

Se analizaron los resultados obtenidos en las pruebas de jarras realizadas mediante la comparación por medio del programa estadístico Statgraphics para los dos coagulantes primarios con y sin el extracto de fique como ayudante de coagulación.

6 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de obtener el mejor comportamiento del proceso de coagulación se determinaron los parámetros óptimos en prueba de jarras, estos incluyeron dosis óptima, gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida y lenta, pH, velocidad y tiempo de sedimentación para cada uno de los coagulantes considerados en el estudio, las condiciones iniciales del agua sintética se observan en el anexo correspondiente a cada prueba; los resultados, así como la selección realizada se presentan a continuación.

6.1 DETERMINACION DE PARAMETROS ÓPTIMOS DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN.

6.1.1 Optimización de los parámetros para el sulfato de aluminio

6.1.1.1 Selección de dosis óptima para el sulfato de aluminio.

Una vez preparada la concentración de coagulante al 1 % v/v para el sulfato de aluminio como coagulante primario se realizaron pruebas de jarras para determinar su dosis óptima utilizando inicialmente concentraciones de coagulante como se menciona en la metodología (0, 10, 15, 20, 25, 30 mg/L).

En la figura 2 se muestran los resultados promedio obtenidos de tres ensayos de coagulación química para diferentes dosis de sulfato de aluminio una vez acortados los rangos (10, 11,12, 13, 14 y 15 mg/L) que fueron aplicadas a las muestras de agua para los parámetros de color y turbiedad. Los resultados específicos y las condiciones de cada una de las pruebas, se muestran en el anexo 2.

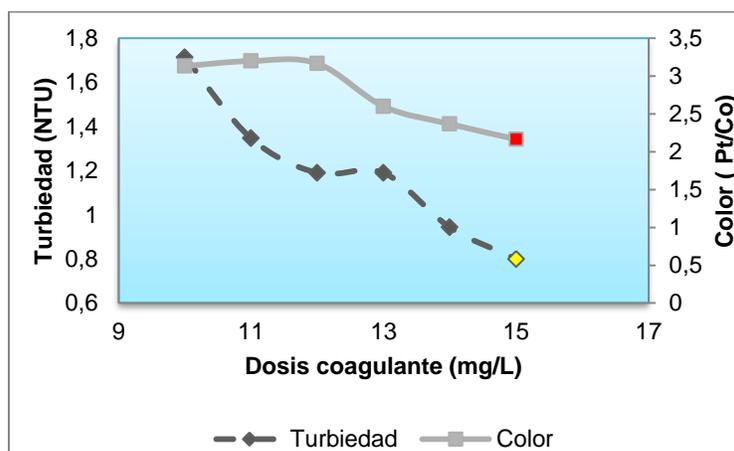


Figura 2. Selección de dosis óptima para el sulfato de aluminio

En la figura 2 se evidencia tanto para el color como para la turbiedad comportamientos análogos para las dosis aplicadas. En ambos casos se observa un comportamiento inversamente proporcional, a menores concentraciones de coagulante se presentan mayores valores de turbiedad. De acuerdo a los resultados mostrados en la figura se escoge como dosis óptima el menor valor

para los parámetros de turbiedad y color en las muestras de agua preparada con una dosis de 15 mg/L la cual tiene un valor de 0,8 NTU y 2,16 Pt/Co para turbiedad y color respectivamente. Si bien la dosis escogida es el valor máximo en el rango utilizado, dosis mayores podrían aumentar levemente la eficiencia en las remociones pero se incurriría en mayores costos al utilizarse dosis superiores de coagulante.

6.1.1.2 Selección de gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida para el sulfato de aluminio.

En la Figura 3 se presentan los resultados promedio obtenidos para color y turbiedad a una dosis fija (15 mg/L) de tres ensayos de coagulación donde se evaluaron gradientes de mezcla rápida (300, 150 y 100 RPM) a diferentes tiempos (10, 20, 30, 40, 50 y 60 segundos) en las pruebas realizadas con el agua preparada. Los resultados específicos y las condiciones de cada una de las pruebas se presentan en el anexo 3, 4 y 5.

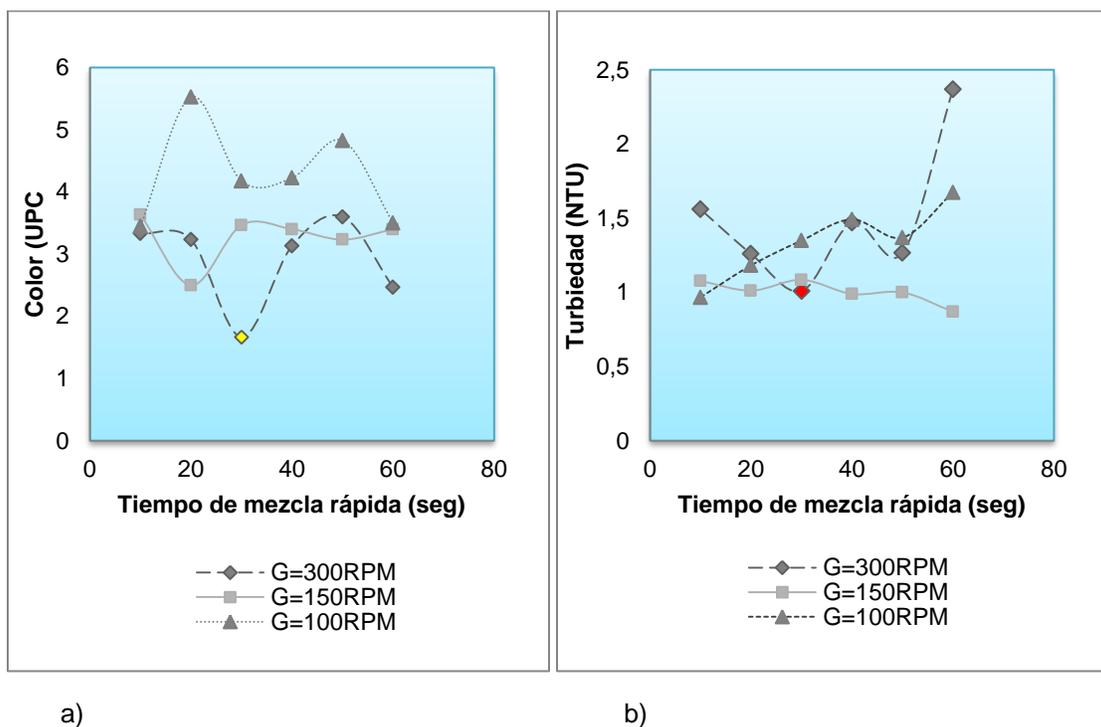


Figura 3. Selección de gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida para el sulfato de aluminio, Color (a) y Turbiedad (b)

En la Figura 3b se evidencia que a un gradiente de 150RPM y a un tiempo de 60 segundos se obtiene el menor valor para turbiedad (0.87 NTU), sin embargo con este gradiente se observó un floc liviano al igual que con el gradiente de 100 RPM; caso contrario ocurrió con el gradiente de 300 RPM a un tiempo de 30 segundos donde se presentó una buena densidad de floc, este mismo gradiente generó el menor valor para color (1.66 Pt/Co) como se aprecia en la figura 3a, por lo anterior

se considera este gradiente y tiempo como los óptimos para el proceso de mezcla rápida.

6.1.1.3 Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta para el sulfato de aluminio.

En la Figura 4 se presentan los resultados promedio obtenidos para los parámetros de color y turbiedad a una dosis fija (15 mg/L) de tres ensayos de coagulación por medio del equipo de prueba de jarras donde se evaluaron diferentes gradientes de mezcla lenta (20, 30, 40, 50 y 60 RPM) a distintos tiempos (10, 15, 20, 25, 30 y 40 minutos) en las pruebas con agua sintética. Los resultados específicos y condiciones de las pruebas realizadas se presentan en el anexo 6, 7, 8, 9 y 10.

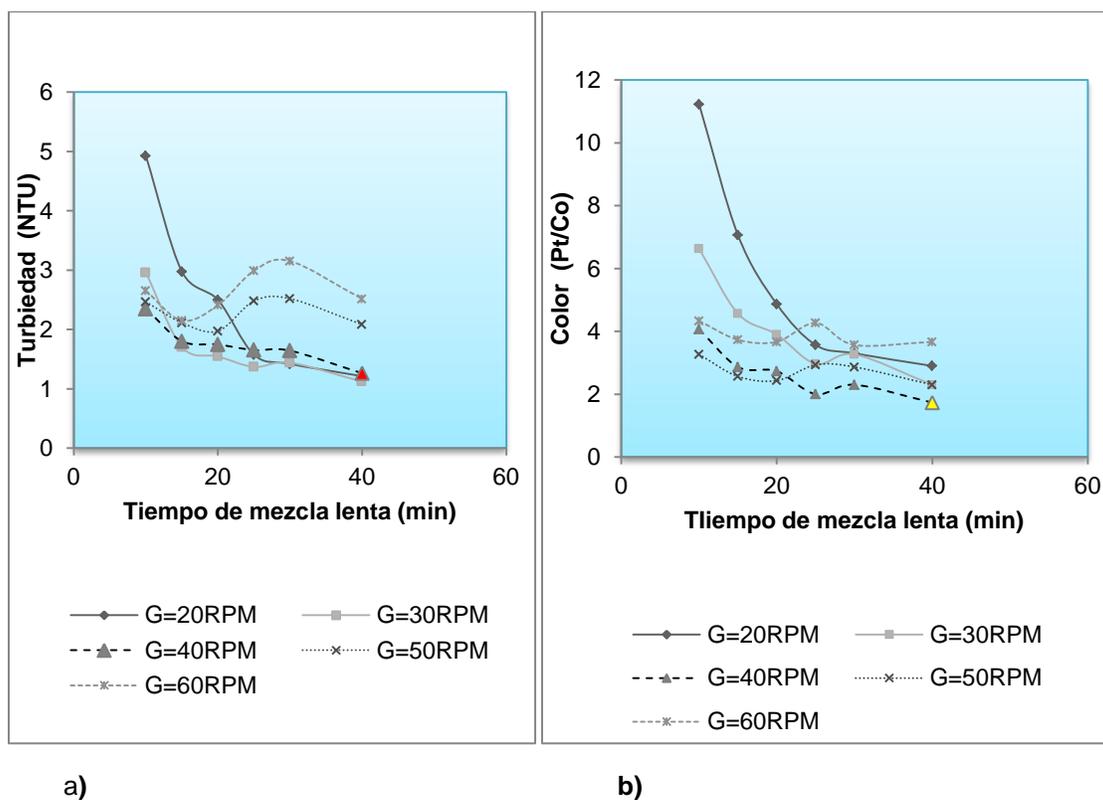


Figura 4. Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta para el Sulfato de Aluminio, Turbiedad (a) y Color (b)

En la Figura 4a se evidencia que a un gradiente de 30 RPM y un tiempo de 40 minutos se obtiene el menor valor para turbiedad (1.12 NTU), sin embargo con este gradiente se observó un floc liviano, únicamente se logró observar buena densidad del floc a un gradiente de 40 RPM y un tiempo de 40 minutos, donde se encontró el menor valor para color (1.73 Pt/Co) como se aprecia en la figura 4b, por lo cual se considera este gradiente y tiempo como los óptimos para el proceso de mezcla lenta.

6.1.1.4 Selección de pH óptimo para el sulfato de aluminio.

En la figura 5 se presentan los resultados promedio para color y turbiedad a una dosis fija (15 mg/L) de cuatro ensayos de coagulación química a diferentes pHs (7.7, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9 y 8.0 unidades) en las pruebas con agua preparada. Los resultados específicos de las pruebas y condiciones de cada una de las pruebas se presentan en el anexo 11.

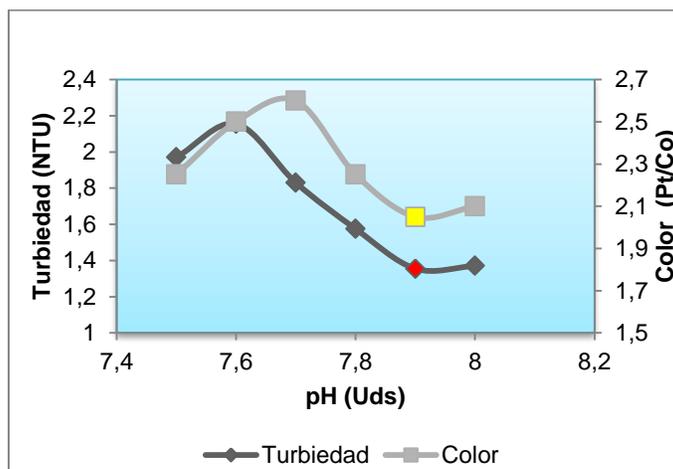


Figura 5. Selección de pH óptimo para el Sulfato de Aluminio

En la figura 5 se evidencian las variaciones de turbiedad y color a diferentes pHs previstos, se observa que el menor valor para turbiedad (1.35 NTU) y para color (2.05 Pt/Co) se presentan a un pH de 7.9 unidades por esta razón se escoge este valor como pH óptimo para el proceso.

6.1.1.5 Selección de la velocidad y tiempo de sedimentación para el sulfato de aluminio.

Se realizaron pruebas de jarras en donde se obtuvieron los resultados promedio de tres ensayos de coagulación química para turbiedad a diferentes tiempos de sedimentación (5, 7, 10, 12, 15, 18, 20, 23, 25, 27, 30 y 40 minutos).

A continuación, se muestra la relación de la velocidad de sedimentación y fracción remanente en la figura 6.

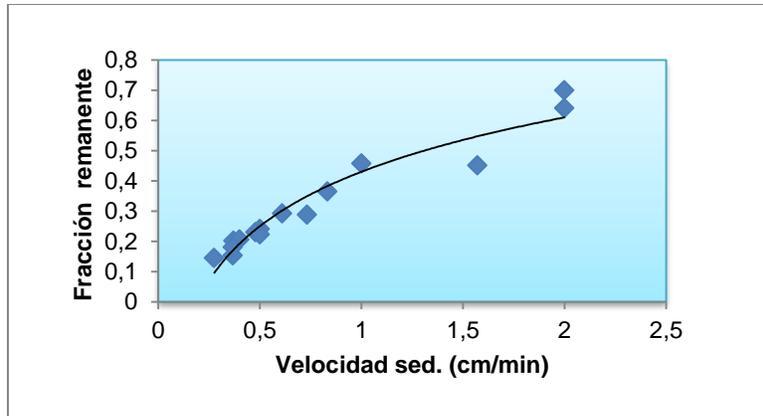


Figura 6. Curva de sedimentación para el sulfato de aluminio.

Para determinar el tiempo de sedimentación óptimo a utilizar en la prueba de jarras se realizó la curva de sedimentación que se muestra en la figura 6. Se determinó una velocidad de sedimentación crítica con la cual se logró llegar a una eficiencia de remoción teórica del 85 %, lo que indica que la turbiedad final se disminuyó a un valor menor o igual a 1 NTU al final del proceso de sedimentación. La velocidad de sedimentación que se determinó fue de 0.4 cm/min para una fracción remanente de 0.2. Se consideró una altura de 10 cm para la toma de la muestra determinándose así el tiempo de sedimentación óptimo que fue de 25 minutos. La eficiencia y el tiempo de sedimentación están definidos por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Turbi} - \text{Turbf}}{\text{Turbi}}$$

$$\text{Eficiencia} = \left[(1 - C) + \left(\frac{A}{V_{sc}} \right) \right] \times 100$$

$$T_{sed} = \frac{h}{v_{sc}}$$

Donde:

Turbf: Turbiedad final (NTU)

Turbi: Turbiedad inicial (NTU)

C: Fracción remanente

A: Área bajo la curva (cm²)

V_{sc}: velocidad crítica de sedimentación (cm/minuto)

T_{sed}: Tiempo de sedimentación (minutos)

h: altura hasta la toma de muestra (cm)

Las pruebas realizadas, las condiciones iniciales de las mismas y los cálculos correspondientes se presentan en el Anexo 12.

6.1.2 Optimización de los parámetros para el cloruro férrico.

6.1.2.1 Selección de dosis óptima para el cloruro férrico.

Una vez diluida la concentración de coagulante al 1% para cloruro férrico se realizaron las respectivas pruebas para determinar su dosis óptima con diferentes concentraciones de coagulante (0, 10, 15, 20, 25, 30 mg/L).

En la Figura 7 se muestran los resultados promedio obtenidos de tres ensayos de coagulación por medio de la prueba de jarras para diferentes dosis de cloruro férrico una vez acortados los rangos (12.5, 13.5, 14.5, 15.5, 16.5 y 17.5 mg/L) adicionadas al agua preparada, donde se resumen los resultados para color y turbiedad. Los resultados específicos y las condiciones iniciales de cada una de las pruebas se muestran en el anexo 13.

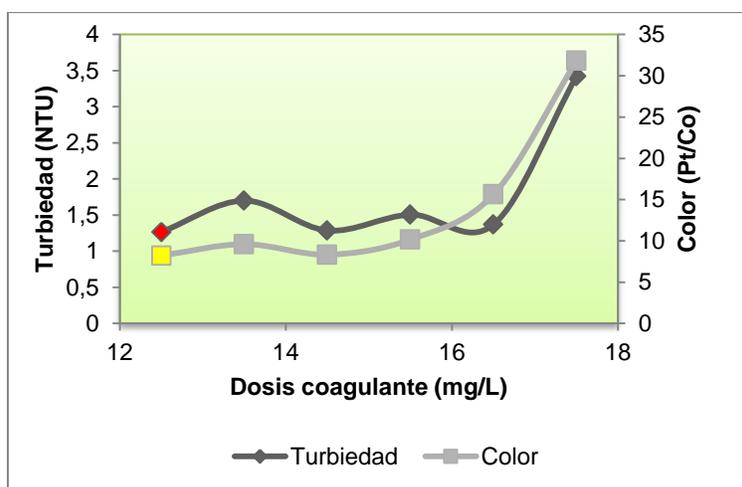


Figura 7. Selección de dosis óptima de Cloruro Férrico

En la Figura 7 se observa para los parámetros de turbiedad y color valores bajos con dosis pequeñas en un rango (12.5 - 14.5 mg/L); sin embargo se encontró que los valores de color no son lo suficientemente bajos como se evidencia con el coagulante sulfato de aluminio. Según la figura se escoge como dosis optima el menor valor para los parámetros de turbiedad y color en las muestras de agua preparada con dosis de 12.5mg/L el cual arroja un valor de 1.26 NTU y un valor de 8.23 Pt/Co para turbiedad y color respectivamente.

6.1.2.2 Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida para el cloruro férrico.

Los resultados promedio obtenidos para color y turbiedad a una dosis fija (12.5mg/L) de coagulante de tres ensayos de coagulación química por medio del equipo de prueba de jarras para tres gradientes (300, 150 y 100 RPM) a diferentes tiempos de mezcla rápida (10, 20, 30, 40, 50 y 60 segundos) en las pruebas con agua preparada se muestran en la Figura 8. Los resultados específicos de las pruebas realizadas se presentan en los Anexos 14, 15 y 16.

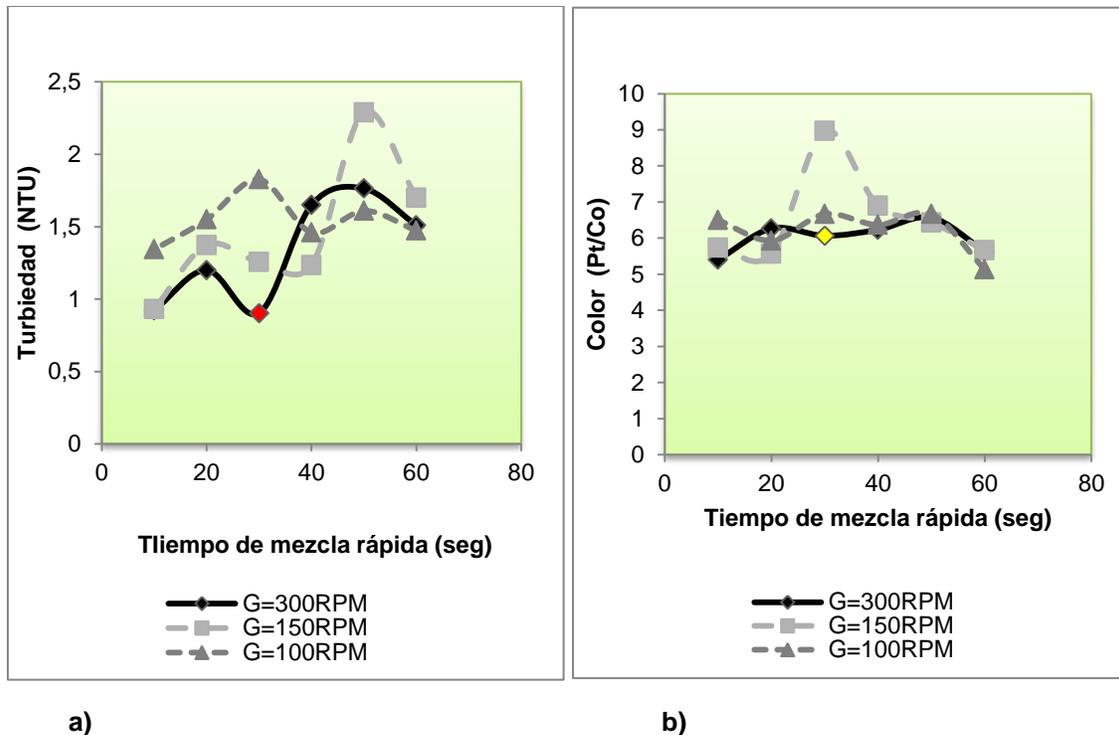


Figura 8. Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida para el cloruro férrico, Turbiedad (a) y Color (b)

En la Figura 8a, se evidencia que a un gradiente de 300 RPM y un tiempo de 30 segundos se obtiene el menor valor para turbiedad (0.90 NTU) y la formación de un floc consistente; en la Figura 8b se observa que el menor valor presentado para color (5.13 Pt/Co) se obtuvo con un gradiente de 100 RPM y un tiempo de 60 segundos, sin embargo en las pruebas no se observó una buena densidad del floc, por lo cual se consideró seleccionar el gradiente de 300 RPM a un tiempo de 30 segundos, el cual arroja el mejor resultado para turbiedad y un resultado de color de 6.06 Pt/Co no muy alejado del menor valor para color.

6.1.2.3 Selección de gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta para el cloruro férrico.

En la figura 9 se muestran los resultados promedio para color y turbiedad a una dosis fija (12.5 mg/L) de coagulante, de tres ensayos de coagulación para gradientes (20, 30, 40, 50 y 60 RPM) y distintos tiempos de mezcla lenta (15, 20, 25, 30 y 40 minutos) en las pruebas con agua preparada. Los resultados específicos de las pruebas se presentan en los Anexos 17, 18, 19, 20 y 21.

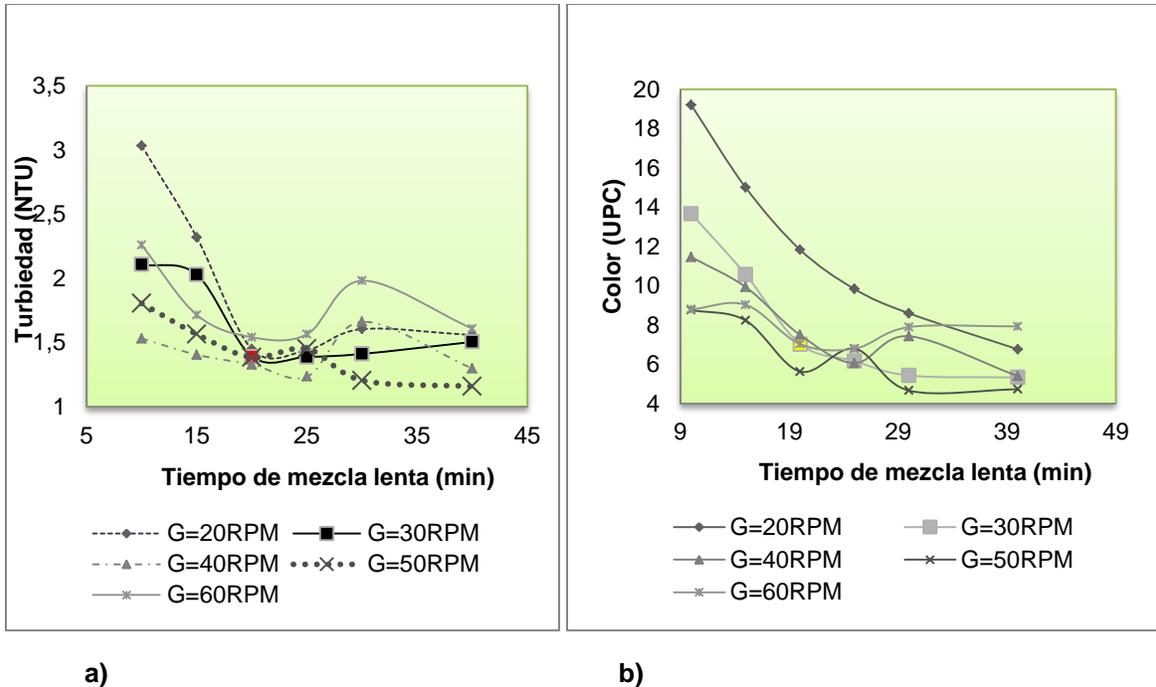


Figura 9. Selección de Gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta para el cloruro férrico, Turbiedad (a) y Color (b)

En la figura 9a, se evidencia que a un gradiente de 50 RPM y un tiempo de 40 minutos se obtiene el menor valor para turbiedad (1.16 NTU), de igual manera se logra observar en la figura 9b con el mismo gradiente y tiempo los mejores resultados de color, sin embargo con este gradiente se logró observar una formación de floc poco consistente. Por el contrario, se observó una mejor formación de floc con el gradiente de 30 RPM donde el menor valor de turbiedad se obtuvo con un tiempo de mezcla lenta de 20 minutos, por lo cual se consideraron como gradiente y tiempo óptimo de mezcla lenta para el cloruro férrico.

6.1.2.4 Selección de pH óptimo para el cloruro férrico.

Se muestran en la figura 10 los resultados promedio obtenidos para los parámetros de color y turbiedad a una dosis fija de coagulante (12.5 mg/L) de tres ensayos de coagulación química para diferentes pHs (7; 7.5; 8.0; 8.3; 8.6 y 9 unidades) en las pruebas realizadas con el agua sintética. Los resultados de las pruebas específicas se presentan en el Anexo 22.

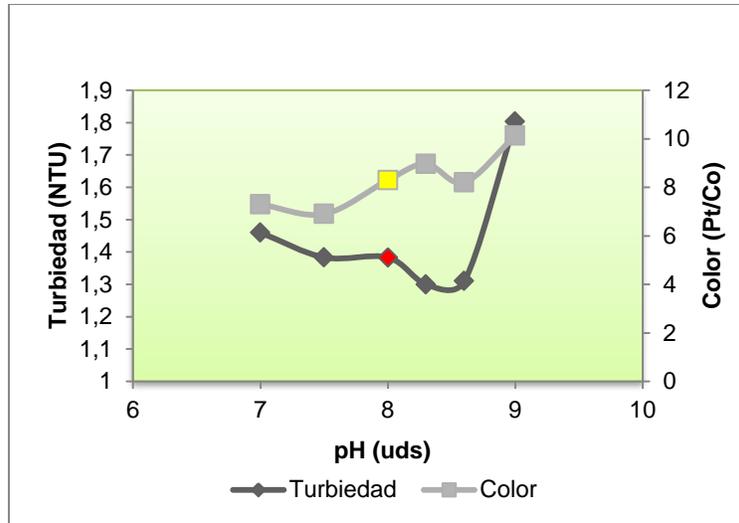


Figura 10. Selección de pH óptimo para el cloruro férrico

En la figura 10 se observa las variaciones de turbiedad y color a diferentes pHs previstos los cuales no presentan una tendencia uniforme. De acuerdo a los resultados de turbiedad y color se escoge como pH optimo 8 unidades con un valor de turbiedad (1.38 NTU) y un valor de color (8.3 Pt/Co), siendo el punto intermedio entre los pHs que mejores resultados arrojan (7.5 y 8.3) en cuanto a los parámetros de calidad de agua.

6.1.2.5 Selección de la velocidad y tiempo de sedimentación para el cloruro férrico.

Se realizaron pruebas de jarras, se obtuvieron los resultados promedio obtenidos de tres ensayos de coagulación para el parámetro de turbiedad a diferentes tiempos de sedimentación (5, 7, 10, 12, 15, 18, 20, 23, 25, 27, 30 y 40 minutos). A continuación, se muestra la relación de la velocidad de sedimentación y turbiedad remanente en la figura 11.

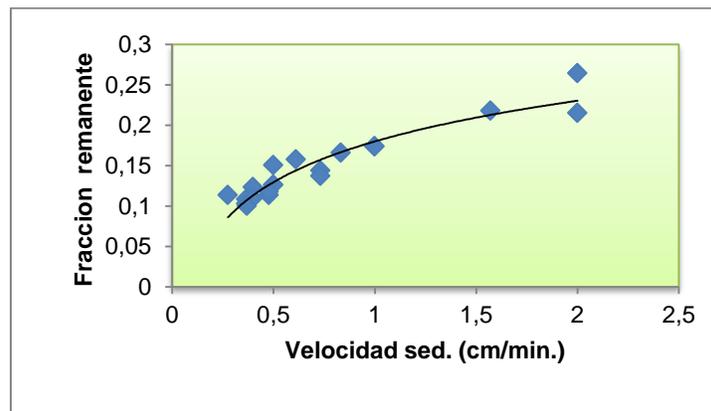


Figura 11. Curva de sedimentación para el sulfato de aluminio.

Para determinar el tiempo de sedimentación óptimo a utilizar en la prueba de jarras se realizó la curva de sedimentación que se muestra en la figura 11. Se determinó una velocidad de sedimentación crítica con la cual se logró llegar a una eficiencia de remoción teórica del 89 %, lo que indica que la turbiedad final se disminuyó a un valor menor o igual a 1 NTU al final del proceso de sedimentación. La velocidad de sedimentación que se determinó fue de 0.5 cm/min para una fracción remanente de 0.126. Se consideró una altura de 10 cm para la toma de la muestra determinándose así el tiempo de sedimentación óptimo que fue de 20 minutos. Las pruebas realizadas, las condiciones iniciales de las mismas y los cálculos correspondientes se presentan en el Anexo 23.

6.2 DESARROLLO DEL OBJETIVO 1. DETERMINACIÓN DEL EXTRACTO DE FIQUE COMO COAGULANTE PRIMARIO EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA.

Para estudiar comparativamente el extracto de fique como coagulante primario en el tratamiento de agua para consumo humano, se realizaron una serie de pruebas de jarra para determinar la viabilidad del extracto de fique como posible coagulante primario. Las condiciones iniciales con las cuales se trabajó en el equipo de prueba de jarras fueron: velocidad de mezcla rápida: 300 RPM, tiempo de mezcla rápida: 30 segundos, velocidad de mezcla lenta: 40 RPM, tiempo de mezcla lenta: 20 min y tiempo de sedimentación: 25 minutos. Las condiciones iniciales promedio del agua preparada para probar el extracto de fique como coagulante primario fueron: turbiedad: 7.49NTU, color: 11.11 Pt/Co, pH: 7.29 unidades.

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos promedio de seis pruebas de jarras efectuadas con diferentes dosis de extracto de fique adicionadas a las muestras de agua preparada para los parámetros de turbiedad, color y pH.

Tabla 3. Resultados promedio obtenidos para los parámetros de calidad de agua usando el extracto de fique como coagulante primario.

Dosis fique (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH
15	5.31	11.27	7.17
17.5	5.18	11.07	7.16
20	4.79	11.08	7.14
22.5	5.08	11.18	7.16
25	5.02	11.22	7.16
35	5.48	11.10	7.32

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5 se evidencia que los parámetros de turbiedad y color presentaron eficiencias de remoción bajas, se observa que para el parámetro de turbiedad se presenta una remoción promedio de 31 %, esta remoción posiblemente se debió

al proceso de sedimentación de las partículas y no al proceso de coagulación-floculación. En cuanto a los valores de color no se presentó una remoción por el contrario se evidencia un aumento en los valores del parámetro respecto al inicial. Según los resultados se puede deducir que el extracto de fique no presenta un efecto coagulante en el agua ya que en las pruebas realizadas no se presentó el proceso de coagulación-floculación, por ende no hubo formación de floc. Por lo anterior, no se prosiguió al resto de pruebas de optimización para el extracto de fique a las condiciones iniciales del agua preparada y dosis empleadas de extracto de fique, puesto que éste no concretó su potencial como coagulante primario para la potabilización del agua. Los resultados específicos de las pruebas realizadas para este objetivo se muestran en el anexo 24.

6.3 DESARROLLO OBJETIVO 2: DETERMINACIÓN DEL EXTRACTO DE FIQUE COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN USANDO DOS COAGULANTES PRIMARIOS.

Para el desarrollo de este objetivo se empleó como posible ayudante de coagulación el extracto de fique para probar su efecto sobre los parámetros estudiados (turbiedad, color, pH, materia orgánica) usando sulfato de aluminio y cloruro férrico como coagulantes primarios. Para el desarrollo de esta etapa se empleó la prueba de jarras y se tuvo en cuenta los parámetros óptimos establecidos y seleccionados en el apartado anterior.

Se realizaron nueve pruebas de jarras en el laboratorio para las diferentes dosis de extracto de fique empleadas incluyendo una muestra control a la cual solo se le adicionó el coagulante químico, este procedimiento se realizó para el coagulante sulfato de aluminio y cloruro férrico que fueron utilizados como coagulantes primarios. En total se realizaron 18 pruebas de jarras, nueve pruebas para cada coagulante químico, en tres de las pruebas se realizó la medición de absorbancia UV empleando celdas de cuarzo a una longitud de onda de 254 nm, como una medida indirecta de la materia orgánica.

6.3.1 Condiciones operacionales para la realización de las pruebas.

En la tabla 4 se presentan los datos operacionales utilizados para cada coagulante (sulfato de aluminio y cloruro férrico) y en la tabla 5 las dosis de extracto de fique establecidas para adicionar.

Tabla 4. Datos operacionales para los coagulantes primarios.

Coagulante	Dosis optima (mg/L)	Mezcla rápida		Mezcla lenta		pH optimo	Sedimentación	
		Gradiente (rpm)	Tiempo (seg)	Gradiente (rpm)	Tiempo (min)		Vsc (cm/min)	Tiempo sed (min)
Sulfato de aluminio	15	300	30	40	40	7.9	0.4	25
Cloruro férrico	12.5	300	30	30	20	8	0.5	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Dosis de extracto de fique establecidas

Dosis extracto de fique como auxiliar de coagulación mg/L					
control	5	10	15	18	20

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Resultados con el sulfato de aluminio usando extracto de fique como ayudante de coagulación.

Para realizar las pruebas de jarras con el sulfato de aluminio al 1 % v/v usando el extracto de fique como ayudante de coagulación, las condiciones iniciales promedio del agua preparada fueron: turbiedad: 7.26 NTU, color: 11.29 Pt/Co, pH: 7.97 unidades.

En la tabla 6, se muestra un resumen de los resultados obtenidos para los parámetros de calidad (turbiedad, color, pH, absorbancia), donde se empleó el extracto de fique como ayudante de coagulación usando el sulfato de aluminio como coagulante primario a una concentración fija de 15 mg/L. Los resultados específicos obtenidos en las pruebas realizadas se muestran en el anexo 25.

Tabla 6. Resumen de los resultados obtenidos para los parámetros de calidad.

Parámetro	Datos	Dosis mg/L					
		0	5	10	15	18	20
Turbiedad (NTU)	Promedio	1.48	1.01	0.85	0.85	0.79	0.89
	Mínimo	0.91	0.71	0.56	0.54	0.46	0.63
	Máximo	2.33	1.69	1.01	1.05	1.04	1.28
	N° datos	9	8	9	9	9	9
Color (UPC)	Promedio	4.39	4.12	4.37	4.58	4.2	4.31
	Mínimo	3.4	2.9	2.9	4.1	3.3	2.9
	Máximo	5.3	4.9	5.3	5.3	5	4.9
	N° datos	9	8	9	9	9	9
pH	Promedio	7.08	7.06	7.09	7.05	7.04	7.04
	Mínimo	6.85	6.89	6.93	6.83	6.87	6.87
	Máximo	7.32	7.22	7.23	7.22	7.17	7.16
	N° datos	9	8	9	9	9	9
Absorbancia 254nm	Promedio	0.006	0.008	0.008	0.011	0.01	0.008
	Mínimo	0.004	0.005	0.005	0.004	0.005	0.004
	Máximo	0.008	0.075	0.01	0.022	0.016	0.015
	N° datos	3	3	3	3	3	3

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6 se logra observar que la muestra control, presenta el mayor valor de turbiedad en comparación con las muestras a las cuales se les adicionó las

diferentes dosis de fique, se presentó una alta disminución de la turbiedad obteniendo remociones medias de 88 % (se logra una remoción del 80 % usando coagulante químico y un 8 % más si emplea el extracto de fique como auxiliar de coagulación). La dosis que presentó una mejor remoción (89 %) en el parámetro de turbiedad corresponde a 18 mg/L. También, se observa una disminución del color inicial al adicionar una dosis de fique, sin embargo la remoción promedio obtenida (61.6 %) no representa una gran mejora respecto a la remoción obtenida por la muestra control (61 %). En cuanto al parámetro de pH se evidencia que de igual forma disminuyó, pero al observar los valores de pH final estos no tienen mayor variación. Los resultados obtenidos para absorbancia muestran que al adicionar dosis de fique se aumentan los valores respecto al valor registrado en el blanco lo que puede suponer un incremento en la materia orgánica.

6.3.3 Resultados con el cloruro férrico usando extracto de fique como ayudante de coagulación.

Para realizar las pruebas de jarras con el sulfato cloruro férrico al 1 % v/v usando el extracto de fique como ayudante de coagulación, las condiciones iniciales promedio del agua preparada fueron: turbiedad: 7.16 NTU, color: 12.9 Pt/Co, pH: 7.98 unidades.

En la tabla 7, se muestra un resumen de los resultados obtenidos para los parámetros de calidad de agua (turbiedad, color, pH y absorbancia), donde se empleó el extracto de fique como ayudante de coagulación usando el cloruro férrico como coagulante primario a una dosis fija de 12.5 mg/L. En el anexo 26 se muestran los resultados específicos obtenidos en las pruebas realizadas.

Tabla 7. Resumen de los resultados obtenidos para los parámetros de calidad de agua.

Parámetro	Datos	Dosis mg/L					
		0	5	10	15	18	20
Turbiedad (NTU)	Promedio	1.41	0.9	0.69	0.89	0.76	0.9
	Mínimo	1.17	0.59	0.49	0.7	0.52	0.72
	Máximo	1.82	1.17	0.94	1.15	1.03	1.26
	N° datos	9	9	9	9	9	9
Color (UPC)	Promedio	10.11	10.04	10.34	10.65	10.67	10.21
	Mínimo	9.3	9.5	9.2	9.8	9.7	9.4
	Máximo	12.2	12.6	13	13	12.9	12.3
	N° datos	9	9	9	9	9	9
pH	Promedio	6.73	6.74	6.71	6.67	6.69	6.69
	Mínimo	6.58	6.6	6.82	6.76	6.76	6.77
	Máximo	6.83	6.85	7.23	7.22	7.17	7.16
	N° datos	9	9	9	9	9	9
Absorbancia 254nm	Promedio	0.022	0.028	0.021	0.023	0.025	0.022
	Mínimo	0.011	0.007	0.008	0.013	0.011	0.01
	Máximo	0.028	0.047	0.031	0.028	0.034	0.028
	N° datos	3	3	3	3	3	3

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7 se observa al igual que en los resultados obtenidos de las pruebas con el sulfato de aluminio más el extracto de fique que la muestra control, presenta el mayor valor de turbiedad en comparación con las muestras a las cuales se les adicionó las diferentes dosis de fique en donde se presentó una alta disminución de la turbiedad obteniendo remociones medias de 88.2 % (se logra una remoción del 80 % utilizando el coagulante químico y se incrementa en un 8.2 % más si se usa el extracto de fique como ayudante de coagulación) siendo la concentración de 10 mg/L la dosis que presentó los mejores resultados en la remoción de turbiedad (90 %). Además, se puede observar que para el color hubo una remoción media mínima (19.4 %) en las muestras a las cuales se les adicionó una dosis de extracto de fique respecto al color inicial de la muestra de agua, se puede notar que los valores de color aumentaron para dosis superiores a 5 mg/l en comparación con la muestra control la cual obtuvo una remoción media de 22 %. En los resultados de pH se observa que disminuyó aproximadamente 1 unidad en todas las pruebas respecto al pH inicial pero al observar los valores de pH final estos no tienen mayor variación comparado con la muestra control. También, en la tabla 7 se observa que los valores de absorbancia obtenidos al adicionar una dosis de fique aumentaron en comparación al valor obtenido en la muestra control, sin embargo no se presentan variaciones mayores.

6.3.4 Procesamiento de datos y análisis de resultados.

Se realizaron pruebas estadísticas de Kruskal-Wallis efectuadas mediante el programa estadístico Statgraphics con el fin de establecer si la dosis de fique genera un efecto sobre los parámetros de calidad de agua (turbiedad, color y absorbancia). Previamente a los datos se les verificó su normalidad, la cual no cumplió tal como se muestran en los resultados de curtosis presentes en los anexos 27, 28, 29 y 30.

6.3.4.1 Análisis estadístico para sulfato de aluminio con y sin extracto de fique como ayudante.

6.3.4.1.1 Análisis de los resultados de turbiedad.

En la tabla 8 se presentan los resultados de las comparaciones que se realizaron probando el efecto del extracto de fique como ayudante (dosis establecidas) y verificando su efecto sobre la turbiedad del agua bajo dos condiciones: con y sin el blanco.

Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis para turbiedad usando sulfato de aluminio con y sin el blanco.

Dosis Fique mg/L	No datos	Rango Promedio	
		Con el blanco	Sin el Blanco
0	9	46.0	---
5	8	29.12	27.68
10	9	23.83	23.28
15	9	22.0	21.55
18	9	17.61	17.39
20	9	23.67	23.17
Valor-P		0.0020	0.58

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 8 se indica, con una significancia del 95 %, que cuando en los datos se incluye el blanco, se presentan diferencias significativas entre los resultados ($P=0.0020$), sin embargo al comparar los datos sin el blanco, la prueba estadística mostró que no existen diferencias entre las turbiedades remanentes ($P= 0.58$). Estos hallazgos permiten concluir que hay un efecto de la dosis de fique aplicada, no obstante también señala que el uso de diferentes dosis no tiene un gran efecto sobre la turbiedad remanente.

El resumen estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro de turbiedad se presentan en el anexo 27.

6.3.4.1.2 Análisis de los resultados de color

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la prueba de Kruskal-wallis para los parámetros de color utilizando sulfato de aluminio con extracto de fique como ayudante de coagulación.

Tabla 9. Prueba de Kruskal-Wallis para sulfato de aluminio con extracto de fique como ayudante.

Dosis Fique mg/L	No Datos	Rango Promedio
0	9	27.83
5	8	21.31
10	9	28.67
15	9	33.17
18	9	22.55
20	9	27.83

Valor P = 0.63

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 9 se observa que el uso del extracto de fique como ayudante de coagulación no presenta un efecto significativo en la remoción de color puesto que el valor P es mayor que 0.05, mostrando que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de color, con un nivel de

significancia del 95.0 %. Este resultado indica que la dosis de fique no genera cambios en el color al finalizar el proceso de tratamiento.

El resumen estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro de color se presentan en el anexo 28.

6.3.4.1.3 Análisis de los resultados de pH.

En la tabla 10 se presentan los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para los parámetros de pH utilizando sulfato de aluminio como coagulante primario y extracto de fique como ayudante de coagulación.

Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis para pH usando sulfato de aluminio y extracto de fique como ayudante.

Dosis Fique mg/L	No Datos	Rango Promedio
0	9	28.28
5	8	28.25
10	9	31.72
15	9	26.67
18	9	24.0
20	9	23.22

Valor P = 0.87

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 10 se observa que el valor P es mayor que 0.05, lo que indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de pH con un nivel del 95.0 % de confianza. Esto demuestra que el uso del extracto de fique como ayudante de coagulación no altera significativamente el pH final de las muestras tratadas. Estos resultados de color y pH son similares a los obtenidos por Lozano (2012) al evaluar el extracto de fique como ayudante de coagulación en el tratamiento de lixiviados donde no se apreciaron diferencias significativas en los valores de remoción de color, usando el extracto de hojas de fique como coadyuvante de coagulación en lixiviados parcialmente tratados, ni tampoco cambios significativos sobre el pH, para ninguna de las muestras analizadas.

El resumen estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro de pH se presentan en el anexo 29.

6.3.4.1.4 Análisis para los resultados de absorbancia.

En la tabla 11 se presentan los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para los datos de absorbancia, prueba realizada para observar el posible aporte de materia orgánica por el uso del extracto de fique en las muestras de agua preparada.

Tabla 11. Prueba de Kruskal-Wallis para absorbancia utilizando sulfato de aluminio y extracto de fique como ayudante.

Dosis Fique mg/L	No datos	Rango Promedio
0	3	6.67
5	3	12.33
10	3	9.33
15	3	9.33
18	3	11.17
20	3	8.17

Valor-P = 0.82

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11 se muestra que el valor P es mayor que 0.05, lo que indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de absorbancia con un nivel del 95.0 % de confianza, lo cual muestra que el uso de extracto de fique no tiene un aporte significativo de materia orgánica al agua tratada al ser usado como ayudante de coagulación en conjunto con el sulfato de aluminio como coagulante primario.

El resumen estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro de absorbancia se presentan en el anexo 30.

6.3.4.2 Análisis estadístico utilizando cloruro férrico con y sin extracto de fique como ayudante.

Al igual que con las pruebas anteriores, se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis efectuadas mediante el programa estadístico Statgraphics para comparar el resultado obtenido en términos de los parámetros de calidad de agua: turbiedad, color, pH y absorbancia.

6.3.4.2.1 Análisis de los resultados de turbiedad.

En la tabla 12 se presentan los resultados obtenidos de las comparaciones que se realizaron probando el efecto del extracto de fique como ayudante (dosis establecidas) y verificando su efecto sobre la turbiedad del agua bajo dos condiciones: con y sin el blanco.

Tabla 12. Prueba de Kruskal-Wallis para turbiedad usando Cloruro férrico con y sin extracto de fique como ayudante.

Dosis Fique mg/L	No datos	Rango Promedio	
		Con el blanco	Sin el Blanco
0	9	49.72	---
5	9	27.94	27.89
10	9	13.0	13.0
15	9	27.28	27.28
18	9	18.72	18.72
20	9	28.33	28.11
Valor-P		0.000029	0.045

Fuente: Elaboración propia.

Acorde con los resultados presentados en la tabla 12, se indica con una significancia del 95 %, que cuando los datos incluyen el blanco, se presentan diferencias significativas entre los resultados ($P=0.000029$), al igual que al comparar los datos sin el blanco, la prueba estadística señala que también existen diferencias entre las turbiedades remanentes ($P=0.045$), lo cual muestra que la dosis de fique tiene un efecto sobre la turbiedad. Lo anterior, se discutirá más adelante.

El resumen estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro de turbiedad se presenta en el anexo 31.

6.3.4.2.1 Determinación de la dosis con mayor efecto sobre la calidad del agua por medio del grafico de cajas y bigotes con muescas de mediana.

Para complementar el análisis anterior y presentar cuales dosis de extracto de fique son significativamente diferentes y cual genera la mejor calidad de agua, se realizó el gráfico de cajas y bigotes con muescas de mediana como se muestra en la figura 12.

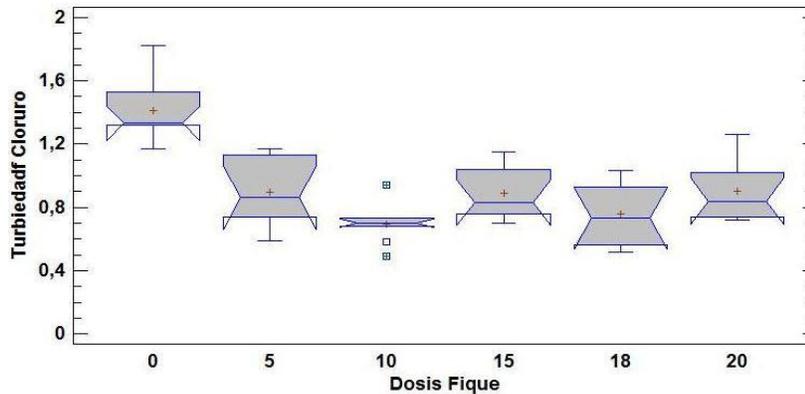


Figura 12. Gráfico de cajas y bigotes con muescas de mediana.

En la figura 12 se presentan 6 cajas esquemáticas con muescas de mediana, cada una corresponde a una dosis diferente de extracto de figue y una muestra control. De acuerdo al manual de usuario del programa estadístico Statgraphics (2005), cada una de las muescas se encuentran escaladas de tal manera que si las muescas de mediana se superponen una sobre otra, no existe diferencia significativa entre las dosis de extracto de figue comparadas, esto para muestras de igual tamaño y con un nivel de confianza del 95 %. En la figura se observa que las dosis de figue son significativamente diferentes para concentraciones de 5 y 10 mg/L, de igual manera para 10 y 15 mg/L y entre 10 y 20 mg/L. La dosis de 18 mg/L no presenta diferencias significativas con ninguna de las dosis de extracto de figue empleadas. Además, se observa que se presentan diferencias significativas entre el blanco y todas las dosis utilizadas. Cabe resaltar con lo anterior, que a pesar que se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes dosis sin incluir la muestra control, al comparar los porcentajes de remoción de cada una de las concentraciones se observa que las variaciones en realidad son mínimas.

6.3.4.2.1.2 Eficiencias de remoción para turbiedad con diferentes dosis de extracto de figue.

En la figura 13 se presentan los porcentajes de remoción obtenidos en la prueba para el parámetro de turbiedad empleando cloruro férrico con y sin extracto de figue como ayudante de coagulación.

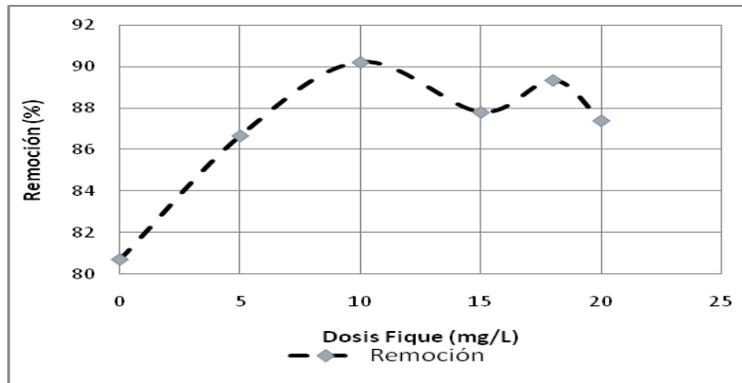


Figura 13. Porcentajes de remoción para turbiedad usando cloruro férrico y extracto de fique como ayudante.

En la figura 13 se observa que se presentan mejoras notorias en la remoción de la turbiedad en las muestras a las cuales se les suministró el extracto de fique en comparación con las muestras a las cuales solo se les trató con cloruro férrico donde la mayor remoción se presentó con una dosis de 10 mg/L de extracto de fique como ayudante de coagulación, para este caso las dosis empleadas permiten una mejora en la remoción media de turbiedad que va desde 87 % a 90 %, respecto del blanco (80 %).

6.3.4.2.2 Análisis para los resultados de color.

En la tabla 13 se presenta la prueba de Kruskal – Wallis para los resultados de color empleando cloruro férrico como coagulante primario y extracto de fique como ayudante de coagulación.

Tabla 13. Prueba de Kruskal-Wallis para color usando cloruro férrico y extracto de fique como ayudante.

Dosis Figue mg/L	No datos	Rango Promedio
0	9	21.67
5	9	19.33
10	9	27.05
15	9	36.28
18	9	35.28
20	9	25.39

Valor-P = 0.11

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 13 se observa que al igual que con el sulfato de aluminio, puesto que el valor P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0 % de confianza, indicando que el uso del extracto de fique como ayudante de coagulación no presenta un

efecto significativo en el parámetro de color, siendo similar a los resultados obtenidos por Lozano (2012).

El resumen estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro de color se presenta en el anexo 32.

6.3.4.2.3 Análisis para los resultados de pH.

En la tabla 14 se presenta la prueba de Kruskal – Wallis para los resultados de pH empleando cloruro férrico como coagulante primario y extracto de fique como ayudante de coagulación.

Tabla 14. Prueba de Kruskal-Wallis para pH utilizando cloruro férrico y extracto de fique como ayudante.

Dosis Fique mg/L	No datos	Rango Promedio
0	9	31.72
5	9	33.72
10	9	28.94
15	9	20.78
18	9	24.67
20	9	25.17

Valor P = 0.51

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 14 puesto que el valor P es mayor que 0.05 al igual que con los resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas utilizando sulfato de aluminio, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de pH con un nivel del 95.0 % de confianza lo cual indica que el uso del extracto de fique como ayudante de coagulación no altera el pH final de las muestras tratadas. El resumen estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro de pH se presenta en el anexo 33.

6.3.4.2.4 Análisis de los resultados de absorbancia.

En la tabla 15 se presenta la prueba de Kruskal – Wallis para los resultados de absorbancia empleando cloruro férrico como coagulante primario y extracto de fique como ayudante de coagulación.

Tabla 15. Prueba de Kruskal-Wallis para absorbancia utilizando cloruro férrico y extracto de fique como ayudante.

Dosis Fique mg/L	No datos	Rango Promedio
0	3	8.5
5	3	11.33
10	3	8.33
15	3	9.0
18	3	11.83
20	3	8.0

Valor-P = 0.92

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 15 puesto que el valor P es mayor que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de absorbancia con un nivel del 95.0 % de confianza, lo cual indica al igual que con los resultados de las pruebas utilizando sulfato de aluminio que el uso de extracto de fique no tiene un aporte significativo de materia orgánica al agua tratada al ser usado como ayudante de coagulación en conjunto con el sulfato de aluminio como coagulante primario. El resumen estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro de absorbancia se presenta en el anexo 34.

6.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE TURBIEDAD PARA LOS DOS COAGULANTES PRIMARIOS CON EL EXTRACTO DE FIQUE COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN

En la tabla 16 se muestran los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para los dos coagulantes utilizados en conjunto con el extracto de fique como ayudante de coagulación para los datos de turbiedad obtenidos.

Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para turbiedad utilizando cloruro férrico y sulfato de aluminio con extracto de fique como ayudante.

Coagulante primario	Dosis fique mg/L	No datos	Rango Promedio
Cloruro férrico	5	9	51.44
Cloruro férrico	10	9	22.11
Cloruro férrico	15	9	49.78
Cloruro férrico	18	9	33.83
Cloruro férrico	20	9	50.22
Sulfato de aluminio	5	8	59.75
Sulfato de aluminio	10	9	47.67
Sulfato de aluminio	15	9	47.22
Sulfato de aluminio	18	9	39.39
Sulfato de aluminio	20	9	50.22

Valor-P = 0.14

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 16 el valor P es mayor que 0.05, por lo cual no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0 % de confianza. Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se obtuvo que el cloruro férrico más el extracto de fique como ayudante de coagulación permite una remoción media que va desde 87 % al 90 %, lo que significa un incremento en la remoción de turbiedad, respecto del blanco, equivalente entre el 7 % y el 10 %. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Lozano (2012), quien obtuvo mejoras en las remociones de turbiedad cercanos al 15 % utilizando el cloruro férrico más el extracto de fique como ayudante de coagulación para el tratamiento de lixiviados. Estas remociones medias obtenidas al utilizar el extracto de fique pueden deberse a las sustancias químicas presentes en el extracto las cuales tienen la capacidad de ser usadas como coadyuvante de coagulación en el tratamiento de aguas, en la medida en que permiten la formación de micelas que encapsulan compuestos, gracias a la actuación de los grupos hidrófilo e hidrófobo característico de las sustancias surfactantes como lo son las sapogeninas, no obstante, se requieren mayores estudios a nivel molecular para evidenciar, con claridad, los mecanismos de actuación de estas sustancias, incluyendo las sapogeninas (Lozano, 2012).

7 CONCLUSIONES

- El uso de extracto de fique como coagulante primario no presentó un efecto sobre los parámetros de calidad de agua (turbiedad, color y pH), en las pruebas realizadas no se presentó el proceso de coagulación-floculación por lo cual el extracto de fique no cumple las condiciones como coagulante primario en la potabilización del agua a las condiciones iniciales que se usaron para preparar el agua sintética.
- Se determinó que el sulfato de aluminio y el cloruro férrico en conjunto con el extracto de fique como ayudante de coagulación tiene un efecto significativo sobre el parámetro de turbiedad puesto que se obtuvieron mejoras en la disminución de estos valores.
- Se estableció que el extracto de fique como ayudante de coagulación en la potabilización del agua en adición con los coagulantes químicos empleados (sulfato de aluminio y cloruro férrico) no generó un efecto significativo sobre los parámetros de color y pH.
- El extracto de fique no tiene un aporte significativo de materia orgánica en las muestras del agua preparada ya que en los análisis de absorbancia a una longitud de 254nm no se evidenciaron diferencias significativas entre la muestra control y las muestras a las cuales se les agregó diferentes dosis de extracto de fique.
- Se estableció que el extracto de fique incrementa la remoción de turbiedad entre el 7% y 10% cuando se usa como auxiliar de coagulación respecto a la máxima remoción alcanzada por el sulfato de aluminio y el cloruro férrico.

8 RECOMENDACIONES

- Se recomienda para posteriores investigaciones utilizar muestras de agua cruda bajo condiciones reales y a diferentes calidades de agua.
- Evaluar el impacto en materia orgánica generado por el jugo de fique en la calidad del agua tratada.
- Proponer un estudio de caracterización de las sapogeninas del fique, que se produce en la zona de influencia del Rio Piedras.

9 BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, Y. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Cuba. 2006.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, Agua su calidad y tratamiento. 1968. p 148-155.

ARAGONES, P. MENDOZA, J. BESPIA, A. GARCIA, M. PARRA, E. Application of multicriteria decision analysis to jar-test results for chemicals selection in the physical-chemical treatment of textile wastewater. Journal of Hazardous Materials. 2009. p 288.

ARBOLEDA VALENCIA JORGE, Teoría y práctica de la purificación del agua Tomo 1, Acodal 2000

BEDOYA, D. GIRALDO, M. 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. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Escuela de química. 2012.

BENAVIDES, O. ARANGO, O. HURTADO, A. ROJAS, M. Cuantificación de Sapogeninas del Jugo Fresco y Fermentado de Fique (*Furcraea gigantea*) mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC-PDA). Universidad de Nariño. Grupo de Investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA). Facultad de Ingeniería Agroindustrial. 2011.

CARDENAS, Y. Tratamiento de agua coagulación y floculación. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico. SEDAPAL. 2000.

CEPIS .Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. . Manual I: Teoría tomo II. Lima. 2004. Páginas 249-250.

COGOLLO, J. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 2010. P 03.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Calidad del agua del río Cauca y sus tributarios. 2008.

DAGUA, C., DAGUA, D., MORALES, S. Evaluación de los efluentes provenientes de la agroindustria del fique en el municipio de Totoró - Cauca. Facultad de ciencias agropecuarias. 2008.

ELIZALDE, G. GUERRA, F. STRUCK, A. Floculación. Universidad Iberoamericana. Ciudad de México. 2008. 5p.

FAO. Fique, oportunidad de progreso [en línea]. Año internacional de las fibras naturales. 2009. [citado 09 FEB 2014]. Disponible en internet http://www.fao.org/co/boletin_%20fique.pdf

GÓMEZ, N. Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Facultad de ingeniería y arquitectura. Departamento de ingeniería química. 2005. 113p.

GUTIERREZ, M. TORRES, M. RAMIREZ, E. VELEZ, Y. CARDONA, M. VASCO, O. Fermentación Alcohólica De Jugo De Fique Con Candida Lusitaniae. Revista Investigaciones Aplicadas No. 10. 2011. p 01.

LOZANO, R. Uso del extracto de fique (Furcraeasp.) como coadyuvante de coagulación en tratamiento de efluentes de pastelería. Producción + Limpia. 2012.

LOZANO, R. Uso del extracto de fique (furcraea sp.) como coadyuvante de coagulación en tratamiento de lixiviados. Laboratorio de Biotecnología Ambiental Aplicada, Grupo de Investigación GRESIA, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Antonio Nariño. 2012.

MAVDT. Guía ambiental del subsector figuero. 2ª ed. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial y Cadena Productiva Nacional del Fique. Bogotá D.C.2006. 122 p.

MEIER, P. SALEHI, F. KAZNER, C. WINTGENS, T. MELIN, T. Ultra filtration with pre-coagulation in drinking water production – Literature review. Techneau. 2006. 84p.

OSORIO, M. (2010, 10 de octubre). Fique, un recurso subutilizado [en línea]. El Mundo. COM [citado 09 FEB 2014]. Disponible en internet <http://www.elmundo.com/portal/resultados/detalles/?idx=16186>

PEREZ, F. URREA, M. Coagulación y floculación, Tema 6. Universidad Politecnica de Cartagena. 2011.

RAMÍREZ, M. Empresa Acueducto y alcantarillado de Popayán. Entrevista personal, Abril 5 de 2013.

RATNAYAKA, D. BRANDT, M. JOHNSON, K. CHAPTER 6 - Chemistry, Microbiology and Biology of Water. En: Water Supply (Sixth Edition) [en línea]. Boston: Butterworth-Heinemann, 2009. [Citado 11 NOV 2013] p 2195-2266. Disponible en internet <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750668439000147>.

RODRIGUEZ, S., LOZANO, R. Disminución del poder contaminante del zumo extraído de la hoja del fique (furcraea sp.) Mediante procesos fermentativos. Revista de Didáctica Ambiental nº 11. Junio 2012. Páginas 17-21.

SOLARTE, R. OSORIO, O. HURTADO, A. MEJIA, D. Evaluación del Bioinsumo de Fique Pulverizado (*Furcraea* sp) para el Control in vitro de Phyto phthorain festans en papa (*Solanum tuberosum* L). Universidad de Nariño, Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Grupo de Investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria. 2011.

Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater. Part 2000 Physical & Aggregate Properties. 20th edition. 1998.

Universidad Politécnica de Cartagena. Abastecimiento de Aguas: Coagulación – Floculación. 2011.

ZAPATA, J. Evaluación del jugo de fique como aditivo oclisor de aire y su influencia en la durabilidad y resistencia del concreto. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, facultad de minas, escuela de ingeniería de materiales Medellín. 2009.