

Evaluación de la eficiencia del extracto de *Vicia faba* L como coagulante natural en procesos de potabilización

Evaluation of the efficiency of *Vicia Faba* L extract as natural coagulant in purification processes

Gloria Stephanny Romo R.¹; Nicol Mateo Mejia R.²; James Rocero Carvajal.³

RESUMEN

En Colombia el agua potable debe cumplir con los valores máximos permitidos en características fisicoquímicas y microbiológicas señaladas en la resolución 2115 de 2007. Para lograr alcanzar estas características, se opta por la potabilización con métodos convencionales usando agentes químicos como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$. Este compuesto al disociarse en agua presenta ciertas desventajas para la salud humana, sus efectos se asocian con formas de cáncer, Alzheimer y enfermedades óseas. El desarrollo de esta investigación se divide en tres partes, la primera consiste en determinar la mejor metodología para utilizar el haba (*Vicia faba* L) como coagulante natural, la segunda en preparar agua sintética que simule las características del agua cruda; y por último realizar la prueba de tratabilidad evaluando la eficiencia del coagulante natural comparándolo mediante un ANOVA multifactorial con el coagulante convencional Sulfato de Aluminio. Según lo anterior se trabajó con parámetros iniciales en agua sintética de turbiedad 100 ± 5 NTU, color 850 ± 20 UPC, alcalinidad 22 ± 2 mg/l de $CaCO_3$, pH $6,8 \pm 0,3$, y temperatura $17 \pm 1^\circ C$. Para la cual se obtuvo una dosis de 40mg/L de extracto de semilla de haba (*Vicia faba* L), alcanzando un porcentaje de remoción en color de 94,7% y en turbiedad residual del 97,25%, y mientras que al Sulfato de Aluminio para alcanzar su máximo porcentaje de remoción se obtuvieron diferentes dosificaciones, ya que con 35 mg/l alcanza un 95,41% en remoción de color y con una dosis de 40mg/l alcanza un 96,68% en remoción de turbiedad.

Palabras clave: Potabilización del agua, turbiedad, color, coagulante natural, *Vicia faba* L

ABSTRACT

In Colombia, drinking-water must comply with the maximum values allowed in physicochemical and microbiological characteristics indicated in the resolution 2115 of 2007. To achieve these characteristics, it has been decided to use purification with conventional methods using chemical agents such as aluminum sulphate $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. This compound, when dissociated in water has certain disadvantages for human health, its effects are associated with forms of cancer, Alzheimer's and bone diseases. The development of this research is divided in three parts, firstly, the aim is to determine the best methodology to use the fava bean (*Vicia Faba L*) as a natural coagulant, secondly, it is intended to prepare synthetic water that simulates the characteristics of raw water, and thirdly, it is sought to perform the treatability test evaluating the efficiency of the natural coagulant, comparing it through a multifactorial ANOVA against the conventional Aluminum Sulphate coagulant. According to the previous statements, we worked with initial parameters in synthetic water, turbidity 100 ± 5 NTU, colour 850 ± 20 UPC, alkalinity 22 ± 2 mg/l of CaCO_3 , pH $6,8 \pm 0,3$, and temperature 17 ± 1 °C. For which it was obtained a dose of 40 mg/L of fava bean seed extract (*Vicia Faba L*), reaching a color removal percentage of 94.7%, and residual turbidity of 97.25%, meanwhile, different dosages were obtained in order for the Aluminum Sulphate to reach its maximum percentage of removal, since with 35 mg/l it reaches 95.41% in color removal and with a dose of 40 mg/l reaches 96.68% in turbidity removal.

Key words: Water purification, turbidity, color, natural coagulant, *Vicia faba L*

INTRODUCCIÓN

El agua es de vital importancia para el ser humano, ya que, al ser considerado el solvente universal, ayuda a eliminar las sustancias que resultan de los procesos bioquímicos producidos en el organismo. Sin embargo, también puede transportar sustancias nocivas al organismo, ocasionando daños en la salud de las personas (Camacho, 2011).

A nivel nacional e internacional se evidencia una terrible problemática relacionada al abastecimiento del agua de buena calidad, el cual es de gran preocupación por parte de los científicos, técnicos, políticos y por supuesto de muchas personas del mundo que han tomado conciencia del problema, a esto se le suma la distribución de manera sumamente desigual entre los países, además de las condiciones irregulares en las que se encuentran muchas de las fuentes abastecedoras a un sin número de poblaciones (Ortiz, 2011).

A nivel local, el agua de distintas fuentes hídricas se encuentra frecuentemente afectadas por descargas de desechos provenientes de la actividad doméstica, agrícola y pecuaria de forma directa a la fuente, estas contienen microorganismos causantes de graves enfermedades lo que vuelve el agua no apta para el consumo humano (Vidal, 2010).

Como resultado de la problemática de la calidad del agua, en las últimas décadas se ha optado por realizarle al agua cruda un tratamiento previo y así mejorar su calidad en cuanto a parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Para ello como primera opción se opta por los tratamientos convencionales, los cuales tienen etapas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Procesos en los cuales se hace necesario el uso de agentes químicos para la culminación de sus etapas. En la etapa de coagulación es frecuente usar sales metálicas, tales como, Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$, Cloruro Férrico ($FeCl_3$), Sulfato Ferroso ($FeSO_4$); y sales inorgánicas como el Policloruro de Aluminio $Al_2(OH)_3Cl$.

En la etapa de coagulación uno de los agentes químicos más frecuentemente usado es el Sulfato de Aluminio, el cual posee características que a través del tiempo ha presentado ciertas desventajas para la salud humana, ya que puede ser fácilmente asimilado por el hombre, con potenciales consecuencias negativas a largo plazo. Sus efectos se asocian con varias formas de cáncer, Alzheimer y enfermedades óseas (Gurdián y Coto, 2011).

Martínez, 2003 aclara que, desde el punto de vista ambiental se ha reportado resultados de gran preocupación, ya que, según análisis realizados a muestras de agua, se han encontrado trazas de Sulfato de Aluminio, lo que indica que el control de la adición de esta sustancia no es apropiado, representando así un riesgo potencial para la salud humana (Solís *et al.*, 2012)

Vargas y Romero, 2006 afirma que desde hace algún tiempo se ha buscado sustituir los coagulantes sintéticos con opciones limpias y económicas, algunas de ellas de origen vegetal. Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal, que actúan de forma similar a los coagulantes sintéticos en el proceso de clarificación del agua cruda que por lo general presentan una mínima o nula toxicidad (Contreras *et al.*, 2015)

Por lo anterior, la presente investigación tiene como objeto evaluar la eficiencia del extracto de haba (*Vicia faba L*) como coagulante natural para la potabilización del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de agua del programa de ingeniería ambiental de la Universidad de Nariño, sede Torobajo; localizada en la ciudad de San Juan de Pasto (Nariño, Colombia) a una altura de 2525 msnm, con una posición geográfica de 1°14' LN y 77°17' LO; las condiciones climáticas en la zona son las de clima frío, con una temperatura que oscila entre los 15 a 18°C y una humedad relativa entre 74 y 79%.

La investigación se dividió en tres partes, la primera consistió en determinar la metodología para la preparación del coagulante, teniendo como base tres metodologías propuestas por (Jiménez y Piscal, 2015); (Hernández *et al.*, 2013); y (Carrasquero *et al.*, 2015), de las que se adaptaron al trabajo propio con el coagulante de extracto de haba (*Vicia faba L*), trabajando con dos tipos de las semillas de haba (blanca y roja); la segunda parte consistió en preparar el agua sintética siguiendo la metodología descrita en el protocolo de laboratorio de prueba de jarras de (Bolaños, 2014); y por último se realizó las prueba de tratabilidad del agua sintética en el laboratorio mirando la eficiencia del coagulante de extracto de haba comparándolo mediante un análisis de varianza multifactorial con el

coagulante convencional Sulfato de Aluminio en cuanto a las respuestas en la remoción de color y turbiedad.

Para la adquisición del haba se optó por la compra de 5kg de cada tipo de semilla de buena calidad en la plaza de mercado, donde aquí llega directamente del sector rural del departamento, a un precio de \$2.400/kg de semilla roja y \$2.000/kg de semilla blanca.

Determinación de la metodología para la preparación del coagulante

Metodología 1. Extracción de almidón de haba. Para la extracción del almidón en polvo se aplicó el protocolo de Wang y Wang (2001) Citado por: (Jiménez y Piscal, 2015) iniciando con el proceso de lavado para eliminar residuos que estén adheridos a la cascarilla de las semillas, que podrían alterar el proceso; posteriormente se sometió a calor para tostar las mismas y continuar con su pelado, después se procedió a moler las habas en un molino convencional para continuar con su tamizaje por una malla de 100 (0,150mm), hasta obtener 500 gramos de harina; a dicha cantidad de harina de haba se agregó 1000 ml de NaOH al 0,1% durante 24 h para remover las impurezas que se tenga.

Después de este tiempo la harina húmeda se introdujo en una licuadora por 2 minutos. La suspensión se tamizo en mallas N°100 (0,150mm) y N°200 (0,075mm), los residuos se lavaron con agua destilada repetitivamente. La suspensión obtenida se centrifugó en tubos Falcon de 50ml a 7000rpm por 20 minutos en una centrifuga Thermo Scientific Sorvall™ ST 8 y se descartó el sobrenadante de cada tubo, en los cuales se diferenciaron dos fases sólidas, la superior compuesta por proteína y la inferior por Almidón, una vez separadas las dos fases, el almidón se re suspendió con agua destilada y se estabilizó el pH con HCl gota a gota y se lavó con agua destilada para volver a centrifugar. Por último, el Almidón se secó en un horno de secado con recirculación de aire marca JOUAN a 40-43°C por 24h para pesarlo y almacenarlo en un recipiente hermético.

Finalmente, para preparar la solución coagulante se pesó 2000mg de almidón, se lo envasó en un beaker con 10ml de agua destilada para diluir el almidón, luego se agregó 400 mg de soda caustica (NaOH) diluida en 8ml de agua destilada, posteriormente, se procedió al mezclado con una varilla de vidrio hasta que la mezcla este homogenizada. Esta solución se la agregó en un balón volumétrico aforado lavando el beaker con agua destila hasta completar sus 100ml, para así obtener la concentración de 20000ppm o 2% y finalmente se dejó reposar por una hora para poderla aplicar en las diferentes dosis.

Metodología 2. Hidratación semillas de haba. Con base en la metodología de (Hernández *et al.*, 2013) se dejó hidratando las semillas de haba durante 5 días, para después remover la cascara de las semillas y dejar únicamente los cotiledones. Posteriormente se dejaron secar y se trituraron en un procesador domestico hasta la obtención de harina de color blanco, seguido a esto, se pesaron 2 gramos y se agregaron a 100ml de agua destilada. Se colocó dicha mezcla en la plancha de agitación hasta alcanzar una temperatura de 65°C, obteniendo así una mezcla viscosa, seguido a esto se dejó reposar a temperatura ambiente y se observó la formación de dos fases, una acuosa y una viscosa, de la cual se tomó el sobrenadante (fase acuosa) y se aplicó en las diferentes dosis.

Metodología 3. Obtención de harina de haba. A través de la metodología de (Carrasquero *et al.*, 2015) adaptándola a las semillas de haba se tostaron en una estufa convencional hasta obtener un color café oscuro, luego se retiró la cascarilla tostada dejando únicamente los cotiledones de las semillas. Se molieron estos cotiledones en un molino convencional y se procedió a tamizar la harina obtenida de la molienda en un tamiz N°60 (0,250mm de diámetro), seguido a esto se pesaron 2g y se diluyen en 100 ml de agua destilada, finalmente, se pone esta preparación en la plancha de agitación hasta alcanzar una temperatura de 55°C para posteriormente aplicar las diferentes dosis.

Una vez realizadas las pruebas pertinentes con las tres metodologías, según su complejidad y los porcentajes de remoción obtenidos con los tres extractos de haba, se opta por continuar el trabajo de investigación con la metodología 3 la que obtuvo mejores resultados.

Preparación solución patrón agua sintética

La preparación del agua sintética se desarrolló siguiendo la metodología del protocolo para el funcionamiento, control y operación del nuevo equipo de prueba de jarras del laboratorio de hidráulica y saneamiento de la universidad de Nariño; preparando la muestra patrón con 15g de Bentonita diluidos en 1 litro de agua, posteriormente se mezcló con el dilusor de vidrio para desvanecer los grumos grandes y se procedió a poner la mezcla en una plancha de agitación hasta alcanzar una temperatura entre los 55 y 60°C, este procedimiento tuvo una duración de 1 hora para que se homogenice totalmente la muestra; finalmente se dejó reposar en un lugar seguro y cubierto por papel plástico para evitar contacto con residuos o insectos por un periodo de 24 horas para que las partículas se sedimenten, y posteriormente tomar el sobrenadante con una manguera para evitar arrastre de partículas del fondo.

Preparación agua sintética requerida para la prueba de jarras

Para obtener una turbiedad de 100 NTU aproximadamente se tuvo como referencia lo propuesto por (Bolaños, 2014), para preparar un litro de agua sintética con estas características se agregó 35ml de sobrenadante de la solución patrón así obteniendo un litro de agua con turbiedad de 100.08 NTU.

Según lo anterior, para obtener la cantidad de agua sintética para la realización de una corrida con la prueba de jarras, se debe multiplicar la dosis por los 13 litros que se necesitan para cada análisis. Por lo que para obtener una turbiedad aproximada de 100 NTU en 13 litros se añadieron 455ml de sobrenadante de la solución patrón, así con esta cantidad de agua sintética poder realizar las pruebas de tratabilidad del agua utilizando los 2 coagulantes. Cabe mencionar que el agua utilizada fue de grifo del laboratorio, pero se dejó reposar 24 horas con anticipación para que así se realice el proceso de decoloración, analizado bajo el test Kit cloro libre y total HI 38020 de HANNA Instruments.

Pruebas de tratabilidad comparando la eficiencia del coagulante natural de haba con el coagulante convencional sulfato de aluminio en agua sintética.

Para realizar la comparación del coagulante natural del extracto de haba y el Sulfato de Aluminio, se realizaron diferentes ensayos con la prueba de jarras (JAR - TEST), preparando agua sintética para realizar las pruebas de tratabilidad, en cuanto a las metodologías para las tres diferentes formas de extracción de haba, se seleccionó un rango de dosis según los resultados obtenidos, hasta obtener las dosis optimas, siguiendo el protocolo de (Bolaños, 2014) en su guía de determinación de dosis optima de coagulante, transformando las dosis en volumen según la siguiente ecuación (Jiménez y Piscal, 2015):

$$v_1 = \frac{c_2 * v_2}{c_1}$$

Donde:

v_1 = Volumen inicial correspondiente a la dosis a aplicar (mg/l)

v_2 = Volumen final que corresponde al volumen de la jarra donde se diluyen las dosis 2000ml

c_1 = Concentración inicial o de la muestra patrón 20000 (mg/l)

c_2 = concentración final o de las respectivas dosis a emplear (mg/l)

Para la aplicación y medición adecuadas de las dosis se utilizaron jeringas comerciales de distintas capacidades. Posteriormente se preparó el equipo Jar Test JF6 – 178 – 07 añadiendo 2 litros exactos de agua sintética en cada jarra con la ayuda de una probeta aforada, se ubicaron las varillas de agitación en el centro de la jarra para así garantizar que se mezcle de manera homogénea y finalmente se programó el equipo con las siguientes características:

Tabla 1. Parámetros mezcla rápida y lenta

	Mezcla rápida	Mezcla lenta	Sedimentación
Rpm	300	40	
Tiempo	60 (s)	20 (min)	20 (min)

Una vez realizadas las pruebas de jarras, se realizó la evaluación de la eficiencia del extracto de haba en cuanto a la remoción de parámetros de turbiedad y color, comparándolo con el Sulfato de Aluminio a través de un diseño experimental categórico realizado en el software Statgraphics Centurion Versión 16, compuesto por 2 factores los cuales son: Factor 1 corresponde a los tratamientos a emplear, del cual se divide por 2 niveles, el extracto de haba y el Sulfato de Aluminio. El factor 2, corresponde a las dosis de coagulante a emplear, del cual se divide por 6 niveles, ya que es la capacidad que tiene el Jar Test para realizar en una corrida la evaluación en 6 jarras, tomando diferentes dosificaciones en cada jarra, valores de 25, 30, 35, 40, 45 y 50mg/l. y finalmente como variable de respuestas, se tiene 8 tipos: Valor turbiedad residual (NTU), porcentaje remoción turbiedad residual (%), Valor turbiedad residual filtrada (NTU), porcentaje remoción turbiedad residual filtrada (%), valor color residual (UPC), porcentaje remoción color residual (%), valor color residual filtrado (UPC) y porcentaje remoción color residual filtrado (%). Así, con los resultados obtenidos se determinaron si existen diferencias estadísticamente significativas en los parámetros de respuestas de los dos coagulantes. Los datos obtenidos a partir de los tratamientos aplicados fueron sometidos a análisis de varianza aplicando la prueba de LSD de Fisher ($P \leq 0,05$) con unos niveles de confianza del 95%

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para escoger la mejor metodología de extracción de haba como coagulante natural, se realizó el primer ensayo de jarras con los parámetros de mezcla rápida y lenta observados en la tabla 1, y trabajando con una dosificación de 50mg/l de coagulante natural; ensayo con el cual fue suficiente para concluir que la metodología 1 y 2 con los 2 diferentes tipos de haba (roja y blanca) no obtuvieron un alto rendimiento en remoción de turbiedad y color para aguas sintéticas con parámetros similares a las aguas deficientes según lo expuesto por el reglamento colombiano de agua y saneamiento 2010 (RAS 2010) en su título B, puesto a que con la metodología 1 se alcanzó unos porcentajes de remoción de turbiedad de 52,13 % y 68,60%, con haba roja y blanca respectivamente y en cuanto a color con haba roja se alcanzó un 55,41% y con haba blanca un 67,55%. Con respecto a la metodología 2 se

obtuvieron porcentajes de remoción de turbiedad del 55,72% y 69,38% con haba roja y blanca respectivamente y en color se obtuvieron porcentajes de remoción del 60,33% con haba roja y un 68,48% con haba blanca. Mientras que con la metodología 3 se alcanzaron porcentajes de remoción tanto para turbiedad de 92,44% con haba roja y 93,60 % con haba blanca y color de 92,94% con haba roja y 93,75% con haba blanca. Según lo anterior, se optó por continuar la investigación con la metodología 3 de harina de haba, obteniendo una diferencia con respecto a los resultados de las metodologías 1 de almidón de haba de un 42,03% para turbiedad y 38% de color, y un 25,83% en turbiedad y 27,14% en color en comparación a la metodología 2 de la hidratación de las semillas de haba.

Según lo anterior se procedió a realizar la siguiente prueba únicamente con la metodología 3 de la harina de haba, variando las dosificaciones de coagulante natural entre sí. Cabe mencionar que, en los porcentajes de remoción en las tres metodologías, el tipo de haba blanca obtuvo porcentajes más elevado de remoción tanto para turbiedad como para color.

En el segundo ensayo se trabajó únicamente con la metodología tres con los dos tipos de haba blanca y roja donde se tomó como referencia las dosis de 50mg/l para observar su comportamiento en diferentes dosis, variándose entre 20, 30 y 40mg/l. Prueba en la cual se pudo observar que la harina de haba se comporta favorablemente en la remoción de los parámetros; A pesar de no alcanzar a cumplir con los valores máximos admisibles por la normatividad colombiana según la resolución 2115 de 2007 (MIN AMBIENTE, 2007), con la dosificación de 40mg/l del coagulante natural, se obtuvieron unos porcentajes de remoción del 96,4% y 96,9% para turbiedad 96%, y 96,3% para color con haba roja y haba blanca respectivamente. Ensayo con el cual se pudo determinar que con el haba blanca se alcanzan los mayores porcentajes de remoción tanto en turbiedad como en color, acercándose más a los valores admisibles por la normativa los cuales están por debajo $0,5 \pm 0,1$ NTU en turbiedad y 4 ± 1 UPC de color en comparación al haba roja. Por lo anterior, se decidió trabajar con la harina de haba blanca para los siguientes análisis.

Posteriormente en el ensayo 3 se variaron las dosis de harina de haba blanca de 30, 40, 50, 60, 70 y 80mg/l, donde se obtuvieron buenos resultados en remoción de parámetros de turbiedad y color, pero se alejaban de los valores máximos admisibles por la norma, por ende, se decide seguir trabajando con la dosis de 40mg/l que es como en las anteriores

pruebas la que más se acerca a los valores permisibles por la norma, valores que se podrían cumplir posteriormente por medio de la filtración, tomándose así esta dosis como la dosis óptima previa al análisis estadístico. Se continuó con los procedimientos de determinación de mezcla rápida y lenta, tiempos de sedimentación y gradientes de velocidad para esta dosis, para los cuales se prepararon 40 litros de agua sintética aplicando la ecuación de (Bolaños, 2014), obteniendo unos parámetros iniciales que se muestran en la Tabla 2, estos parámetros son los mismos para determinar la mezcla lenta y el tiempo de sedimentación para así no tener diferencias en los parámetros iniciales en la determinación de estas pruebas.

Tabla 2. Valores iniciales de agua sintética para ensayo 4, 5 y 6.

Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/L)		COLOR APARENTE (UPC)					pH	Temp °C	
	Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,471	0,474	0,474	0,473			0,473
99,4	0,13	26	Promedio ABS	0,473						
			Color resultante	868,7					6,81	17,4

Con estos parámetros iniciales, se procedió a realizar la prueba de mezcla rápida, colocando en las jeringas una dosificación de 40mg/l c/u de extracto de harina de haba blanca, se empezó a variar las revoluciones por minuto de la mezcla rápida, tomando valores de 150, 200, 250, 300, 350, y 400 RPM. Una vez finalizada la corrida y según los resultados de remoción se obtuvo que, para mezcla rápida con 300 RPM es la que cuenta con los mejores porcentajes de remoción, reportando valores de 3,1 NTU de turbiedad y 41,59 UPC de color. Esto indica que con estas revoluciones se producen mejores reacciones de adsorción en los coloides, estos resultados se los indica más claramente en las Gráficas 1 y 2 que indican los valores que alcanza en remoción de turbiedad y color respectivamente.

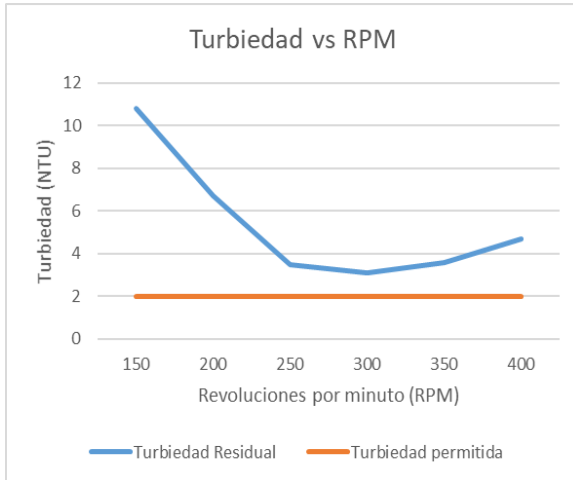


Grafico 1. Valores de turbiedad residual con respecto a RPM en mezcla rápida con extracto de harina de haba blanca

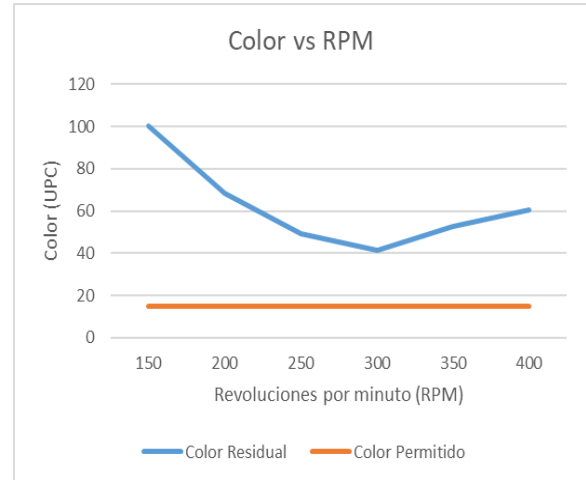


Grafico 2. Valores de color residual con respecto a RPM en mezcla rápida con extracto de harina de haba blanca

Para la mezcla lenta se procedió a realizar el mismo procedimiento con la dosis optima de extracto de harina de haba blanca de 40mg/l c/u de las jarras, variando sus revoluciones entre 30, 35, 40, 45, 50 y 55 RPM , obteniendo como resultado que con 40 RPM se alcanzan los valores mínimos de remoción en color, y con 45 RPM se obtiene la mejor remoción en turbiedad; teniendo en cuenta que las aguas crudas de Nariño, en especial las aguas de San Juan de Pasto son de valores altos en color y por ende se hace más difícil su tratabilidad (R. García, comunicación personal, 23 de agosto de 2018), se decidió trabajar con 40 RPM para mezcla lenta. En las Gráficas 3 y 4 se indican los valores obtenidos tanto en turbiedad y color respectivamente.

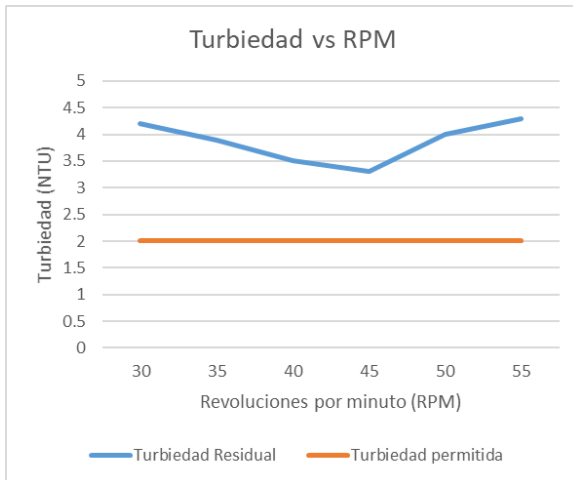


Grafico 3. Valores de turbiedad residual con respecto a RPM mezcla lenta con extracto de harina de haba blanca

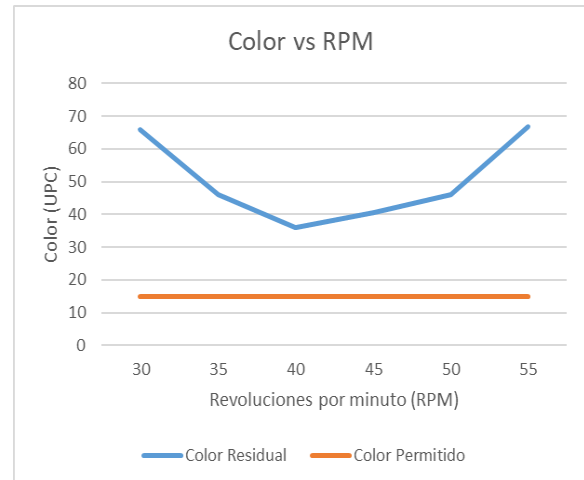


Grafico 4. Valores de turbiedad residual con respecto a RPM mezcla lenta con extracto de harina de haba blanca

Finalmente, para la determinación de tiempo óptimo de sedimentación, se procedió a realizar la prueba de jarras con la dosis óptima de 40mg/l de extracto de harina de haba blanca, mezcla rápida 300 RPM y lenta 40 RPM. Para esta prueba se recogieron muestras en tiempos de cinco, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos, una vez finalizado este procedimiento se obtuvo como resultados que con un tiempo de sedimentación de 30 minutos se sedimenta mejor el floc formado; puesto a que en las primeras jarras se observó que es escaso el tiempo para poder sedimentar ya que aún se encontraban flocs en la superficie, según lo anterior se concuerda con lo establecido por (Bolaños, 2014), donde manifiesta que 30 minutos es el valor máximo recomendado para que se dé la fase de sedimentación. Se pueden observar en las Gráfica 5 y 6 los valores alcanzados de turbiedad y color respectivamente, teniendo una diferencia aproximada del 19,9% en comparación de la jarra uno a la jarra seis.

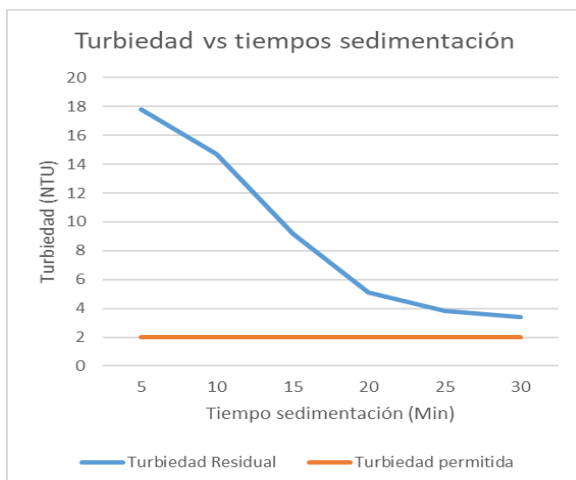


Grafico 5. Valores de turbiedad residual con respecto a tiempos de sedimentación con extracto de harina de Haba blanca

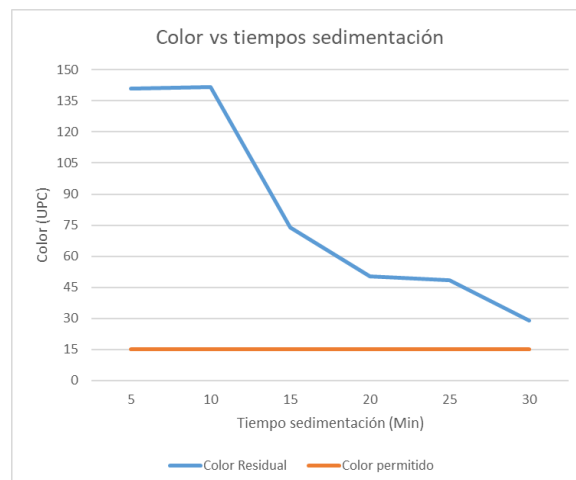


Grafico 6 Valores de color residual con respecto a tiempos de sedimentación con extracto de harina de Haba blanca

Por lo anterior se realiza las pruebas finales con los parámetros obtenidos que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros finales para ensayos 7 y 8 prueba de jarras con extracto de haba blanca y Sulfato de Aluminio.

Mezcla Rápida			Mezcla Lenta			Sedimentación
G(S ⁻¹)	Rpm	Tiempo (s)	G(S ⁻¹)	Rpm	Tiempo (min)	Tiempo (min)
360	300	60	20	40	20	30

Finalmente, para las pruebas del análisis estadístico se variaron las dosis con un menor rango, incluyendo la dosis optima predeterminada, valores entre 25, 30, 35, 40, 45 y 50mg/l con sus equivalencias en volumen presentados en la Tabla 4. Dosis con las cuales se observó el comportamiento de los dos coagulantes por medio de tres réplicas de cada coagulante con iguales condiciones iniciales del agua cruda, parámetros que se observan en la Tabla 5.

Tabla 4. Equivalencia en ml de las dosis a aplicar ensayos 7 y 8.

Dosis (mg/L)	Equivalencia en mililitros (ml)
25	2,5
30	3
35	3,5
40	4
45	4,5

Para los parámetros iniciales se prepara agua sintética, teniendo como resultados los mencionados en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros iniciales ensayo 7.

Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total		Color Aparente (UPC)					pH	Temperatura °C
	Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,461	0,465	0,466	0,464		
97,2	0,12	24	Promedio ABS		0,4644				
			Color resultante:		852,9			7,13	17,6

En los resultados que se muestran en la Tabla 6 con el uso del coagulante natural, se puede observar que la dosis optima continúa en 40 mg/l, aumentando significativamente su remoción alcanzando un valor de 2,6 NTU de turbiedad y 39,39 UPC de color, en cuanto a la eficiencia tuvo unos porcentajes de remoción del 97,33% y 94,97% respectivamente, valores similares a los ensayos anteriores, donde se había establecido que la dosis optima en 40mg/l.

Cabe resaltar que, aunque llegando a porcentajes superiores del 90% no se alcanza a cumplir con los valores permitidos de la resolución 2115 de 2007 (MIN AMB, 2007), después de la etapa de filtración llegó a valores de 0,64 NTU y 6,72 UPC para turbiedad y color respectivamente, valores que cumplen con la norma de agua para consumo humano. Por otro lado, los valores de pH en todas las dosis aplicadas estuvieron dentro del rango de la normatividad, donde el valor más bajo de 6,94 (25mg/l) y el más alto fue de 7,16 (50mg/l). Por último, la alcalinidad estuvo en un rango de 24 mg/L de CaCO₃, lo que se presenta como una ventaja porque el coagulante natural estabiliza este parámetro, al contrario que con Sulfato de Aluminio ya que este lo varía notablemente.

Se repite dos veces más con las mismas condiciones y dosis para que se tenga una relevancia en los datos obtenidos y así realizar el análisis estadístico de manera adecuada.

Tabla 6. Resultados obtenidos en parámetros y porcentajes de remoción ensayo 7 extracto de haba

Jarra	Dosis (Mg/L)	Observación					Parámetros					% Remoción turbiedad		% Remoción color	
		Formación floc (min)	Calidad del proceso		Turbiedad residual (NTU)	Turbiedad residual filtrada (NTU)	Color residual (UPC)	Color residual filtrado (UPC)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Ph	Temperatura (°C)	Residual	Residual filtrada	Residual	Residual filtrada
			Floc y tamaño aproximado	Sobrenadante											
1	25	1:4	2 B	4	5	1,2	50,0	11,12	24	6,9	17,5	94,03	98,71	93,6	98,5
2	30	1:4	2 B	4	4	1,1	44,1	10,02	24	6,9	17,5	95,16	98,78	94,3	98,7
3	35	1:4	2 B	4	3	0,9	42,3	7,08	24	6,9	17,6	96,30	98,99	94,5	99,0
4	40	1:3	4 B	4	2	0,6	39,3	6,72	24	7,0	17,6	97,33	99,33	94,9	99,1
5	45	1:3	4 B	4	4	0,9	52,9	8,92	24	7,0	17,6	95,78	99,03	93,2	98,8
6	50	1:3	4 B	4	6	1,3	50,4	11,86	24	7,1	17,6	93,52	98,59	93,5	98,4

blanca.

Observaciones. Se puede observar que al minuto y 30 segundos aproximadamente se empezó a formar los floc en las jarras 4, 5 y 6 de un tamaño entre 0,5 – 0,75mm, clasificados como floc tipo B según el comparador para estimar el tamaño del floculo, a los 10 segundos después, en las 3 primeras jarras se dio la formación del floc con las mismas dimensiones de tipo B, pero entre estas jarras la diferencia se presenta según el índice de floculación de Willcomb, donde las jarras 1,2 y 3 según el tamaño del floc al ser muy pequeño fue casi imperceptible en comparación a las jarras 4, 5 y 6 en donde su floc fue bien formado uniformemente distribuido con una sedimentación muy lenta; esto debido al movimiento de las paletas, pues son las encargadas de la aparición de los flocs en la mezcla lenta. En cuanto a la sedimentación según los resultados de la tabla 6, pasados los 30 minutos se pudo observar que la parte superior de las jarras se tornaba muy clara y presentaba algunos pequeños flóculos, por ende, se le asignó un número 4 según la descripción del sobrenadante.

Una vez realizadas las corridas con el coagulante natural, se procedió a realizar las pruebas con los mismos parámetros y dosis con el Sulfato de Aluminio, con valores iniciales del agua sintética que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Valores iniciales de agua sintética para ensayo 8.

Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/L)		Color Aparente (UPC)					pH	Temperatura °C
	Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS						
			0,458	0,458	0,456	0,459	0,455		
100,1	0,12	24	Promedio ABS		0,456				
			Color resultante:		839,7			6,89	17,7

Por los resultados se determinó que con la dosis de 40mg/l alcanzó los valores más bajos en turbiedad residual obteniendo 3,4NTU, valor mayor al obtenido con el extracto de harina de haba, al contrario, sucedió con los valores de color residual que se encuentran por debajo de la dosis optima del extracto de haba, con una dosis de 35mg/l de Sulfato de Aluminio, se obtuvo unos porcentajes de remoción en color de 95,8%, mucho más altos que los obtenidos con el extracto de haba. Parámetro que en tratamiento de aguas de alta montaña de Nariño es de mayor importancia debido a sus condiciones.

Aunque el Sulfato de Aluminio al igual que el extracto de haba con sus valores de remoción no alcanza a los valores permitidos de la resolución 2115 de 2007, después de la etapa de filtración alcanza valores de 0,71 NTU y 5,25 UPC para turbiedad y color respectivamente, cumpliendo los valores permitidos para agua de consumo humano. Por otro lado, los valores de pH entre mayor sea la dosis de Sulfato de Aluminio el agua se torna más acida, llegando a valores fuera de los permitidos, por lo que se tendría que estabilizar el pH, aumentando los costos de tratabilidad. Finalmente, la alcalinidad se comportó igual que el pH, mientras mayor sea la dosis, menor la alcalinidad, llegando a una alcalinidad de 2mg/L de CaCO₃, por lo cual se debería aumentar con cal viva para que así cumpla con lo reglamentado, estos resultados se muestran en la Tabla 8, este procedimiento con Sulfato de Aluminio al igual que con el extracto de haba se repite 2 veces más con las mismas condiciones y dosis para realizar el análisis estadístico de manera adecuada.

Tabla 8. Resultados obtenidos en valores y porcentajes de remoción con Sulfato de Aluminio ensayo 8.

Jarra	Observación				Parámetros							% Remoción Turbiedad		% Remoción Color	
	Dosis (Mg/L)	Formación Floc (Min)	Calidad del		Turbiedad Residual (NTU)	Turbiedad Residual Filtrada (NTU)	Color Residual (UPC)	Color Residual Filtrado (UPC)	Alcalinidad (Mg CaCO ₃ /L)	pH	Temperatura (°C)	Residual	Residual Filtrada	Residual	Residual Filtrada
			Floc Y Tamaño Aproximado	Sobrenadante											
1	25	2:00	2 B	4	4,3	1,23	47,10	6,72	18	6,4	17,7	95,7	98,77	94	99,20
2	30	2:00	2 B	4	4,1	1,1	34,62	6,72	14	6,3	17,8	95,9	98,90	95	99,20
3	35	2:00	4 B	4	3,8	0,92	28,74	5,98	10	6,3	17,7	96,2	99,08	96	99,29
4	40	2:00	4 D	4	3,4	0,71	34,62	5,25	6	6,3	17,7	96,6	99,29	95	99,38
5	45	2:00	4 D	4	3,9	0,83	39,39	6,35	4	6,2	17,7	96,1	99,17	95	99,24
6	50	2:00	2 D	4	4,5	1,34	61,79	7,45	2	6,2	17,8	95,5	98,66	92	99,11

Observaciones. Se pudo observar que el Sulfato de Aluminio hizo efecto coagulante a los dos minutos aproximadamente en las seis jarras, donde en las tres primeras jarras con dosis más pequeñas forman un floc de tamaño 0,5 – 0,75mm (tipo B), en comparación a los floc de las jarras 4, 5 y 6, en las cuales tienen un tamaño entre 1- 1,5mm (tipo D) según el comparador para estimar el tamaño del floculo producido en la coagulación. En cuanto al índice de Willcomb varió entre el 2 y 4, los cuales en turbiedades residuales mayores a 4 tienen un índice de dos, puesto a que el floc es muy pequeño y las menores a este valor con un índice tipo cuatro donde el floc es disperso pero bien formado y uniformemente distribuido. Para la sedimentación según los resultados de la tabla 8, se pudo observar que el Sulfato de Aluminio se comportó similar al extracto de harina de haba, puesto a que en la parte superior el agua se tornó clara con algunos pequeños flóculos en las seis jarras después de completar los tiempos de sedimentación, por lo que se asigna un número cuatro de descripción del sobrenadante.

Según el análisis estadístico con el software Statgraphics 16, muestra que la interacción entre el extracto de haba y Sulfato de Aluminio tiene una relación frente a la remoción de turbiedad residual y las dosis en mg/l aplicadas, ya que según los valores obtenidos en las tres repeticiones con cada coagulante, siempre se formó un pico con 40mg/L de dosis de extracto de haba, reafirmando por medio del método estadístico que la dosis optima es de 40mg/l para el coagulante natural, alcanzando una remoción total de 97,25%, porcentaje mayor al alcanzado con el Sulfato de Aluminio, en cuanto a las otras dosis de extracto de haba alcanzaron valores más bajos en comparación a la remoción con Sulfato de Aluminio.

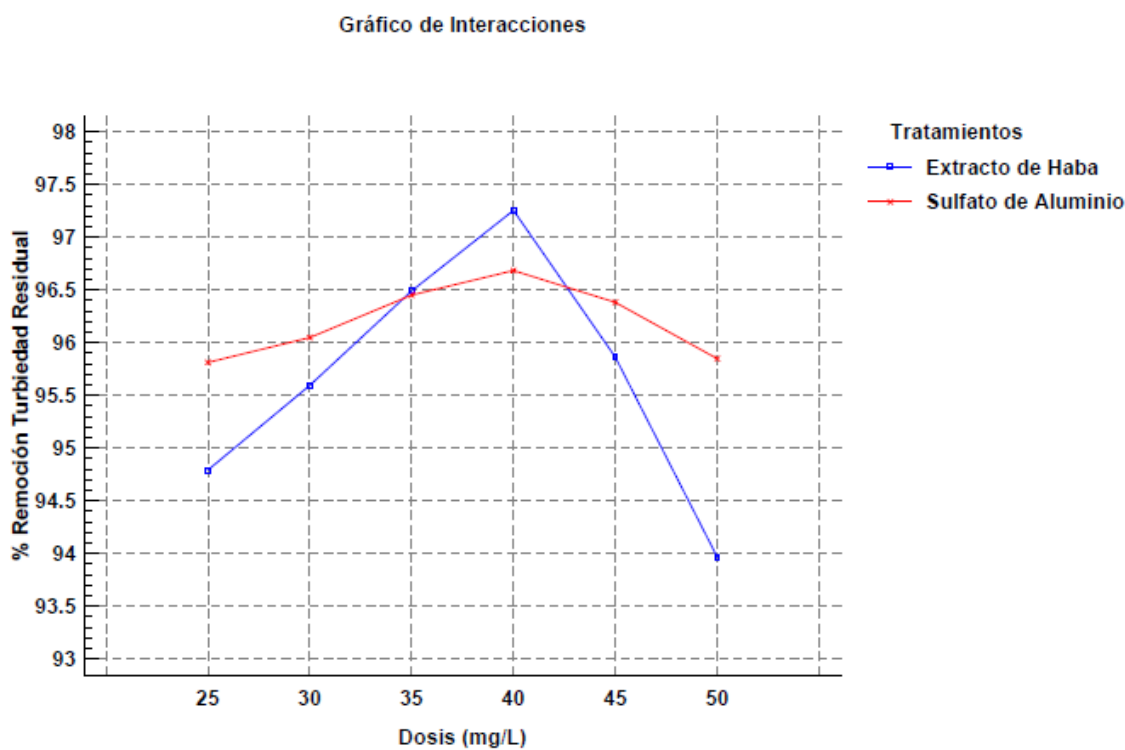


Gráfico 7. Porcentaje de remoción de turbiedad residual en función de las dosis con extracto de harina de haba y Sulfato de Aluminio.

Para la prueba de múltiples rangos en la remoción de turbiedad residual las medias de cada coagulante están en 95,66% para el extracto de haba y 96,2 para el Sulfato de Aluminio, teniendo una diferencia significativa según el procedimiento de Fisher de -0,54 con un nivel del 95% de confianza, lo cual a pesar de tener un alto porcentaje de remoción ninguno de los dos tratamientos llega al valor máximo permitido según la resolución 2115 de 2007 lo

que indica que se debe continuar con el análisis estadístico después del proceso de filtración (MIN AMB, 2007).

Para el color residual, el análisis estadístico mostró que por medio de la interacción entre el extracto de haba y Sulfato de Aluminio existe una relación de los dos coagulantes frente a la eficiencia de remoción de color residual y las dosis en mg/l aplicadas, se observó que la dosis optima de extracto de haba continuó siendo de 40 mg/l alcanzando un porcentaje de remoción del 94,70%, aunque esté por debajo 0,71% del porcentaje de remoción de la dosis óptima del Sulfato de Aluminio, puesto a que el Sulfato de Aluminio llega a un porcentaje de 95,41%, este es un resultado significativo como para considerarse como una alternativa eficiente en el proceso de potabilización del agua.

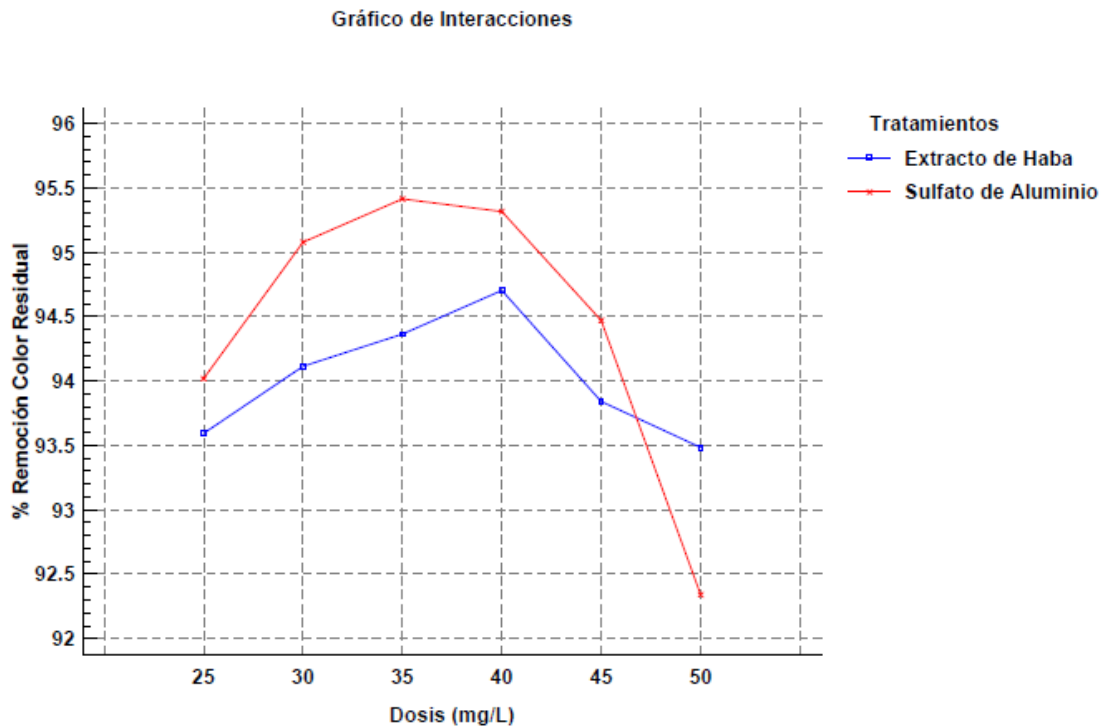


Gráfico 8. Porcentaje de remoción de color residual en función de las dosis con extracto de harina de haba y Sulfato de Aluminio.

Para la prueba de múltiples rangos en la eficiencia de remoción de color residual las medias de cada coagulante están en 94,02% para el extracto de haba y 94,43 para el Sulfato de

Aluminio, lo que según el procedimiento de Fisher No se presenta una diferencia significativa, ya que este valor es de -0,42 con un nivel del 95% de confianza.

Es importante resaltar que con el extracto de haba blanca la dosis optima siempre fue de 40mg/l, alcanzando valores de color residual de 44,29UPC, con un porcentaje de 94,7% y turbiedad residual de 2,77 NTU con un porcentaje 97,25%. Caso contrario ocurrió con el Sulfato de Aluminio, para el cual la dosis en remoción de turbiedad fue de 40 mg/l alcanzando un valor de 3,3 NTU (96,68%) y 38,53 UPC (95,32%) de color; pero para remoción de color la dosis optima fue de 35 mg/l, puesto a que llegó a un valor de 37,68 UPC (95,41%) y 3,5 NTU (96,45%) de turbiedad.

Con los resultados obtenidos en la investigación, se puede ratificar que los coagulantes naturales pueden ser igual de eficientes que los agentes químicos, tal como el estudio realizado por Hernández *et al.*, 2013 que evaluaron el *Tamarindus Indica* en aguas sintéticas con valores de turbidez de 100 y 350 NTU obteniendo resultados de remoción entre 72,45% y 89,09% antes del proceso de filtración y posteriormente a la filtración obteniendo unos valores de 98,7% y 99,71% respectivamente.

Por otra parte, Carrasquero *et al.* 2015 en su investigación del uso de semillas de durazno como coagulante en aguas sintéticas, obtuvo porcentajes de remoción superiores al 90% en turbiedad y de color de 75%, con una variación ligera en el pH con rangos de 6,5 y 7 unidades; valores semejantes a los obtenidos en el presente estudio. Además (Ndabigengesere y Subba, 1998) y (Mendoza, Fernández, Ettiene y Díaz 2000) también encontraron valores similares ya que reportaron variaciones mínimas significativas entre el pH y la alcalinidad en coagulantes naturales.

Según el análisis estadístico con dosis de 25, 30, 35, 40, 45 y 50mg/l en los resultados de color residual y en la turbiedad residual filtrada no hay diferencias significativas entre el extracto de haba (*Vicia Faba* L) y el Sulfato de Aluminio, mientras que para los resultados de turbiedad y color filtrado se pueden apreciar diferencias significativas entre estos valores de remoción, teniendo como ventaja la del extracto de haba el cual con 40mg/l tiene el mejor comportamiento de remoción para ambos parámetros.

Por otra parte, los resultados obtenidos por el Sulfato de Aluminio fueron los esperados ya que se conoce su comportamiento de alta remoción en turbiedad y color en el proceso de potabilización de agua, así como también la variación de pH con el uso de coagulante químicos, variando entre 6.24 y 6,48 los cuales están por debajo de los valores permitidos en la resolución 2115 de 2007, por lo que se debe aplicar algún otro químico para estabilizar su pH para que el agua sea apta para el consumo humano, reafirmando lo expuesto por (Rojas, 2002) donde expone que los coagulantes químicos son muy sensibles a alterar el pH y la alcalinidad.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la investigación, lograron demostrar que el uso de alternativas naturales en los procesos de coagulación del agua, pueden alcanzar altos porcentajes de remoción, suficientes para sustituir el uso de agentes químicos tales como el Sulfato de Aluminio, puesto a que se trabajó con similares concentraciones de los coagulantes convencionales de 2000mg/L (2%) y con una dosificación de 40 mg/L, se logró un porcentaje de remoción del 97,2% en turbiedad con el coagulante natural y un 96,68% en turbiedad con el coagulante químico convencional. Con lo cual se puede concluir que el coagulante natural a base del extracto de *Vicia faba* L. posee mejor eficiencia de remoción para turbiedad que el coagulante convencional Sulfato de Aluminio.

En cuestión de la eficiencia de remoción de color, se pudo observar que, para alcanzar los valores máximos de remoción, con el coagulante natural estudiado a base del extracto de *Vicia faba* L. concuerda con la misma dosificación para la máxima remoción de turbiedad y con el valor arrojado en el análisis estadístico; pero por el contrario, para alcanzar los valores máximos de remoción de color, con el coagulante convencional Sulfato de Aluminio, se necesita un cambio de dosis a 35 mg/L para alcanzar su máximo porcentaje de remoción de hasta el 95,4%, puesto a que con la dosis arrojada por el análisis estadístico, el Sulfato de Aluminio remueve un 95.3%, valores que en términos de Unidades Platino Cobalto se refieren a 37,6 UPC con 35 mg/l y 38.5 UPC con 40 mg/L.

Según los valores reportados, el coagulante natural estudiado a base de extracto de *Vicia Faba* L, posee la ventaja de no alterar la alcalinidad del agua a tratar, puesto a que según las características del agua sintética de laboratorio evaluada, en una turbiedad de 100 ± 5 NTU,

color 850 ± 20 UPC, alcalinidad 22 ± 2 mg/l de CaCO_3 , pH $6,8 \pm 0,3$, y temperatura 17 ± 1 °C, después de la aplicación del coagulante natural los valores de alcalinidad oscilan entre ± 2 unidades, mientras que después de agregar el coagulante químico Sulfato de Aluminio su alcalinidad con la dosis mayor llega hasta valores de 2mg/l de CaCO_3 , fenómeno por el cual las plantas de tratamiento deberán aplicar Cal viva comercial al 90%, aumentando sus costos de operación.

La metodología de preparación del extracto de haba *Vicia faba L* para utilizarlo como coagulante donde se obtuvieron mejores resultados fue la de Carrasquero *et al.* (2015) la cual es de una forma muy sencilla y practica por lo que la comunidad rural puede realizarla de manera directa con la ayuda de un molino casero obteniendo así la harina de haba para preparar la solución con 100 ml de agua a cierta temperatura donde así se obtendrá los mejores resultados en remoción de turbiedad y color.

Según los costos de producción en condición de laboratorio son relativamente bajos ya que para preparar 100 ml de coagulante natural tiene un valor de \$9.012 COL y para sulfato de aluminio tiene un valor de \$ 8.011,5 valor que en ventaja tiene el sulfato de aluminio, pero este aumenta a la hora del cumplimiento de la normatividad colombiana ya que se debe añadir químicos para estabilizar parámetros de alcalinidad y pH pero al realizarse en procesos industrializados su valor podrá reducirse entre un 30% y 40% (Quiñones y Riascos, 2017)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bolaños, D. (2014). Protocolo para el funcionamiento, control y operación del nuevo equipo de prueba de jarras del laboratorio de hidráulica y saneamiento. (Tesis de pregrado). Universidad de Nariño. Pasto. Colombia
- Camacho, N., (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. Redalyc (29), pp. 153-170. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/3374/337428495008.pdf>
- Carrasquero, S., Lozano, Y., Garcíá, M., Camacho, M., Rincón., A., Mas & Rubí, M. (2015). Eficiencia de las semillas de durazno (*Prunus pérsica*) como coagulante en la potabilización de aguas. Venezuela: Universidad del Zulia Maracaibo.
- Contreras, K., Mendoza, Y., Salcedo, G., Olivero, R. & Mendoza, G. (2015). El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Producción + Limpia*, 10 (1), pp. 40-50. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v10n1/v10n1a04.pdf>
- Gurdián, R., Coto J., (2011) Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación floculación de aguas residuales. *Tecnología en Marcha*. 24(2): 18-26. Recuperado de http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/138/137
- Hernández, B., Mendoza, T., Salamanca, M., Fuentes, L. & Caldera, Y., (2013). Semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante en aguas con alta turbiedad. *Redieluz*. 3 (1 y 2): 91-96.
- Jiménez, D. & Piscal, B., (2015). Estudio y evaluación del almidón de maíz como alternativa natural en el proceso de coagulación de agua para consumo humano. (Tesis de pregrado). Universidad de Nariño. Pasto. Colombia
- Mendoza, I., Fernandez, N., Ettiene, G. & Diaz, G. (2000). Uso de la Moringa oleífera como coagulante en la potabilización de las aguas. *Ciencia*. (8): 243-254.
- Ndabigengesere, A., y Subba, N. (1998). Quality of wáter treated by coagulation using Moringa oleífera seeds. *Wat. Res*. 32(3): 781-791.

Ortiz, A., (2011). Colombia. Problemática de agua a nivel nacional e internacional. (Mensaje en un blog). *Blog Quimical Cch Vallejo*. Recuperado de <http://quimical-cchvallejo.blogspot.com.co/2011/09/problematika-de-agua-nivel-nacional-e.html>)

Quiñones, F. & Riascos, E, (2017). Evaluación y validación de la acción de semillas de moringa oleífera como coagulante natural para la remoción de color, en la planta de tratamiento centenario del municipio de Pasto. (Tesis de pregrado). Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. 84 p.

RAS - Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2010). TÍTULO B. Sistemas de acueducto. 2 ed. Bogotá, D.C.: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico (Ed.); Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA. 480 p.

MIN AMBIENTE - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Resolución 2115, Por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano y se dictan otras disposiciones. Bogotá, Colombia: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

Rojas, R., & Alberto, J., (2002). *Acuiquímica*. Primera Edición. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. 226 p.

Solís, R., Laines, J. & Hernández, J. (2012) Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28 (3). Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992012000300005&script=sci_arttext&tlng=en.

Vidal, S., (2010). Evaluación de la efectividad del filtro a base de arcilla y plata coloidal en la potabilización de agua, medida por pruebas fisicoquímicas y microbiológicas. (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. 76 p.

Wang, L., & Wang, Y. J. (2001). Comparison of protease digestion at neutral pH with alkaline steeping method for rice starch isolation. *Cereal Chemistry*, 78(6): 690-692.