

Evaluación de FeCl₃ y PAC para la potabilización de agua con alto contenido de color y baja turbiedad

Evaluation of FeCl₃ and PAC for the potabilization of water with high content of color and low turbidity

Jeffrey Yanza-López¹, Robert Rivera-Hernández²,
Luisa Gómez-Torres³ y Carlos Zafra-Mejía⁴

Recibido: 10 de octubre de 2018
Aceptado: 20 de marzo de 2019

Cómo citar / How to cite

J. Yanza-López, R. Rivera-Hernández, L. Gómez-Torres y C. Zafra-Mejía, "Evaluación de FeCl₃ y PAC para la potabilización de agua con alto contenido de color y baja turbiedad". *TecnoLógicas*, vol. 22, no. 45, pp. 9-21, 2019. <https://doi.org/10.22430/22565337.1085>



- ¹ Ingeniero Ambiental, Especialización en Agua y Saneamiento Ambiental, Escuela de Posgrados, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá-Colombia, jeffrey.yanza@estudiantes.umb.edu.co
- ² Ingeniero Civil, Especialización en Agua y Saneamiento Ambiental, Escuela de Posgrados, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá-Colombia, robert.rivera@estudiantes.umb.edu.co
- ³ PhD en Ingeniería Química, Grupo de Sistemas y Recursos Ambientales Sostenibles (Syras), Universidad Manuela Beltrán, Bogotá-Colombia, luisa.gomez@docentes.umb.edu.co
- ⁴ PhD en Ingeniería Ambiental, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá-Colombia, czafra@udistrital.edu.co

Resumen

La fuente de agua para abastecimiento proveniente del páramo se caracteriza por su alto contenido de color y baja turbiedad, lo que representa un inconveniente por considerar en la mayoría de plantas potabilizadoras. Internacionalmente se han realizado estudios al respecto, pero en general, las soluciones que se plantearon fueron costosas y no se adaptaron totalmente a este tipo de fuentes colombianas (país con escasas investigaciones). El propósito de este trabajo fue la evaluación de FeCl_3 como coagulante primario y PAC (Policloruro de aluminio) como auxiliar a escala de laboratorio para la potabilización de agua cruda con elevado color y baja turbiedad. Se realizó el ensayo de jarras con FeCl_3 , PAC, FeCl_3 + PAC como ayudante de coagulación, y FeCl_3 + PAC como ayudante de floculación. Los parámetros evaluados fueron pH, color y turbiedad, antes y después de los tratamientos; con un rango de dosis para FeCl_3 entre 36-42 mg/L y para PAC entre 0,2-0,5 mg/L. Los resultados revelaron que en términos de eliminación de color la combinación FeCl_3 + PAC como ayudante de coagulación presentó la mayor eficiencia entre los tratamientos estudiados (86,9 %), mientras que para remoción de turbiedad el rendimiento alcanzó 80,2 %. De igual manera, se demostró que dicha alternativa representó un ahorro en costos, si se compara con PAC como único coagulante (entre 25,5-34,2 %), dependiendo del caudal tratado. En cuanto al cumplimiento de la normatividad vigente colombiana, se cumplió con los valores máximos permisibles (Color = 15 UPC, Turbiedad = 2 UNT), con excepción del pH que debió estar entre 6,5-9,0, y que debió ser estabilizado antes de enviar el agua tratada por la red de distribución.

Palabras clave

Cloruro férrico (FeCl_3), Policloruro de aluminio (PAC), Sustancias húmicas (SH), Color, Turbiedad.

Abstract

The water source for supply from moorland is characterized by its high color and low turbidity, which represents an inconvenience to be considered in most water treatment plants. Internationally, studies have been carried out in this regard, but in general, the proposed solutions are costly and do not fully adapt to this type of Colombian water sources (a country in which no research is recorded). The purpose of this work was the evaluation of FeCl_3 as a primary coagulant and PAC (Poly Aluminium Chloride) as auxiliary on a laboratory scale for the water purification with high color and low turbidity. The jar test was performed with FeCl_3 , PAC, FeCl_3 + PAC as a coagulation aid and FeCl_3 + PAC as a flocculation aid. The parameters evaluated were pH, color, and turbidity, before and after the treatments; with a dose range for FeCl_3 between 36-42 mg/L and for PAC between 0.2-0.5 mg/L. The results displayed that in terms of color removal, the FeCl_3 + PAC combination as a coagulation aid showed the highest efficiency among the treatments studied (86.9%), while for turbidity removal the yield reached 80.2%. Likewise, it was demonstrated that this alternative represents a cost savings when compared to PAC as sole coagulant (between 25.5 - 34.2%), depending on the treated flow. Regarding compliance with Colombian regulations in force, the maximum permissible values are (Color = 15 UPC, Turbidity = 2 UNT), with the exception of pH that must be between 6.5-9.0, and that must be stabilized before to send the treated water through the distribution network.

Keywords

Ferric chloride (FeCl_3), Aluminum polychloride (PAC), Humic substances (SH), Color, Turbidity.

1. INTRODUCTION

El color amarillo o marrón que se observa en ciertos tipos de aguas superficiales y subsuperficiales se debe a que presentan elevadas concentraciones de Sustancias Húmicas (SH) constituidas por ácidos húmicos y fúlvicos [1], [2]. Estos compuestos representan un problema que va más allá de la razón estética, ya que niveles elevados de color en el agua potable pueden dar lugar a productos de desinfección potencialmente cancerígenos, tales como los trihalometanos que tienen consecuencias negativas para la salud humana [3], [4]. El proceso de eliminación del color en una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) es una tarea difícil que aumenta sustancialmente los costos de operación y que no garantiza una efectividad continua [5], [6]. Este problema se acentúa aún más si el agua proveniente de zonas de alta montaña presenta bajos valores de alcalinidad y turbiedad [7].

Investigaciones realizadas han demostrado que cuanto mayor es la masa molar de las SH en el agua, mayor es el número de grupos con oxígeno y menores son las eficiencias de remoción de color [8], [9]. En este mismo sentido, [10] y [11] establecieron que aguas con altos contenidos de color y bajas turbiedades conllevaron a inconvenientes en la sedimentación de partículas, ya que pese a ser desestabilizadas por la aplicación de coagulantes tradicionales (compuestos de aluminio o hierro), generaron flóculos livianos que con dificultad fueron removidos por acción de los decantadores.

La PTAP "Palacé" de la ciudad de Popayán en Colombia es de tipo convencional y, según sus registros, el agua de abastecimiento fue tomada de una fuente de páramo, la cual presentó elevado color y baja turbiedad. Lo anterior generó que las partículas floculadas durante el proceso de purificación se rompieran con facilidad. A este inconveniente, se sumó el hecho de que para tener eficiencias de por

del 80 % en los sedimentadores, estos debieron ser diseñados y construidos con una carga superficial de $14,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ [12] y no con $28,8 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$, como se encontraron en realidad [13]. Esto generó un menor tiempo de retención del floc para decantar.

A nivel mundial, se han realizado estudios enfocados al tratamiento de aguas con niveles de color elevados en cuencas de alta montaña. Sin embargo, en la mayoría de los casos estas soluciones son costosas y no se adaptan totalmente a la calidad del agua de una fuente de páramo, como las que existen en Colombia, que sirven de abastecimiento para un número importante de municipios y comunidades rurales. Al respecto, en el panorama nacional no se evidencian registros de esta clase de estudios y es un hecho que deben considerarse en aras del mejoramiento de los procesos unitarios de las PTAP, cuyas condiciones fisicoquímicas del agua cruda comprometen su eficiencia.

La coagulación es la desestabilización eléctrica de las partículas en fracciones de segundo, mientras que la floculación es el fenómeno en el cual las partículas colisionan entre sí para formar coágulos mayores que posteriormente tienden a sedimentar. Su fin específico es la remoción de turbiedad, color, microorganismos patógenos y sustancias productoras de olor y sabor [10], [14], [15]. En particular, el color en el agua resulta de la presencia en solución de sustancias húmicas y materia orgánica disuelta [1]. Las variables que influyen sobre la producción de color incluyen: el tipo de vegetación y suelo [15], el ángulo de pendiente y la orientación [16], la cantidad de precipitación y la intensidad [2], [17] y la forestación [18].

A lo largo de mucho tiempo se han desarrollado técnicas aplicando diversos coagulantes químicos, entre los que se encuentran los coagulantes a base de aluminio y de hierro, siendo ampliamente utilizado el sulfato de aluminio. Sin

embargo, algunas investigaciones reportan mejorías con compuestos férricos, puesto que al contar con una densidad de carga mayor que las sales de aluminio tienen mejores resultados en la eliminación de color [9], [19]; al igual que produce flóculos más grandes y numerosos, aumentando la probabilidad de colisiones y remoción de partículas [20], [21]. De igual manera, en la coagulación se ha usado la hidrotalcita Mg/Al así como Zr^{4+} , lo que se traduce en flóculos significativamente más grandes si se compara con Fe^{3+} ; pero su uso es aún motivo de estudio [22].

Además de las experiencias reportadas por algunos autores en la utilización de compuestos de hierro y aluminio, recientemente se han desarrollado alternativas, como los denominados coagulantes inorgánicos poliméricos (IPF, por sus siglas en inglés), dentro de los cuales se encuentran el cloruro de polihierro (PFC) y cloruro de polialuminio (PAC). Los IPF presentan ciertas ventajas en la remoción de color, además de una gama más amplia de pH de trabajo, menor sensibilidad a la temperatura del agua y las concentraciones de coagulantes residuales más bajas [23]. En [24] comprobaron a escala de laboratorio la efectiva eliminación sinérgica de SH mediante PAC por procesos secuenciales de tratamiento del agua que incluyeron pre-ionización, coagulación, flotación y filtración en arena, en muestras de agua del río Luan al norte de China.

El objetivo de esta investigación fue la evaluación de FeCl_3 como coagulante primario y PAC como auxiliar a escala de laboratorio para la potabilización de agua con alto contenido de color y baja turbiedad. Para lograrlo, se realizaron pruebas de jarras con combinaciones de FeCl_3 con PAC como ayudante de coagulación y floculación, y se compararon con las condiciones actuales de operación de la planta “Palacé”, es decir, utilizando PAC como única sustancia química de coagulación. Adicionalmente, se

determinaron los costos económicos que implicó cada alternativa de tratamiento. Es así como la presente investigación permite vislumbrar de manera particular una solución eficiente, apropiada y económica a la problemática de la PTAP “Palacé” y que a su vez pretende servir de referente para otras plantas potabilizadoras cuyo contexto es similar.

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la planta de tratamiento

La PTAP “Palacé” se abastece del río que lleva el mismo nombre. Está ubicada en la hacienda Río Blanco, en la vía que de Popayán (Colombia) conduce a la vereda El Cabuyo, sobre la cota 1.930 msnm ($2^{\circ}39'31''$ N, $76^{\circ}32'14''$ O). La PTAP cuenta con los procesos de mezcla rápida en vertedero rectangular, cuatro unidades de floculación hidráulica de tipo Cox, cuatro tanques de sedimentación laminar de alta tasa, cinco unidades de filtración de tasa declinante y desinfección con cloro en tanque de contacto [25]. La coagulación se hace con un sistema de dosificación en seco mediante una tolva en la que se utiliza PAC como coagulante (Ver Fig. 1). Los caudales mínimo y máximo de funcionamiento fueron 80 y 210 L/s, respectivamente, para el periodo comprendido entre el 1 de enero al 30 de septiembre de 2016.

2.2 Sistema de recolección de la información

Diariamente se recolectaron muestras puntuales de agua cruda, cuyo punto de muestra se localizó en la cámara de llegada al sistema que transporta el agua proveniente de la captación al vertedero (Fig. 1). Dichas muestras fueron recogidas y transportadas inmediatamente al laboratorio de la PTAP “Palacé” para hacer efectivo su análisis. La frecuencia de

recolección de agua fue tal, que garantizó 15 repeticiones para cada una de las combinaciones: FeCl_3 , PAC, FeCl_3 + PAC (ayudante de coagulación) y FeCl_3 + PAC (ayudante de floculación). Este análisis se realizó solo en la época seca del año, puesto que en ella se presentaron las condiciones más críticas para el tratamiento del agua (elevado color y baja turbiedad).

2.3 Análisis de laboratorio

Se tomaron registros de las mediciones hechas al agua cruda en cuanto a pH, alcalinidad, turbiedad y color. Los equipos utilizados para tal fin fueron: pHmetro Orion 720A, titulación con ácido sulfúrico (O,20256 N), turbidímetro Hach 2100Q y colorímetro Hydrochem, respectivamente. Posteriormente, se realizaron las diferentes pruebas de jarras con un equipo

EyQ (modelo F6-300-T), siguiendo la norma NTC 3903 [26].

En el equipo de jarras se analizaron 6 dosis de cloruro férrico (como coagulante primario), desde 34 mg/L hasta 47 mg/L tomadas de una solución de 1 % p/v de FeCl_3 . Después del proceso de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación, se seleccionó aquella que reportó las mayores eficiencias en eliminación de color y turbiedad.

Una vez conocida la dosis de FeCl_3 se varió la dosis de PAC como auxiliar de coagulación en las diferentes jarras cada 0,1 mg/L en un rango de 0,1 mg/L a 0,6 mg/L y se seleccionó aquella con la mayor eficiencia de remoción en color y turbiedad. De igual manera, se procedió con la combinación FeCl_3 + PAC, pero esta vez con PAC como ayudante de mezcla lenta.

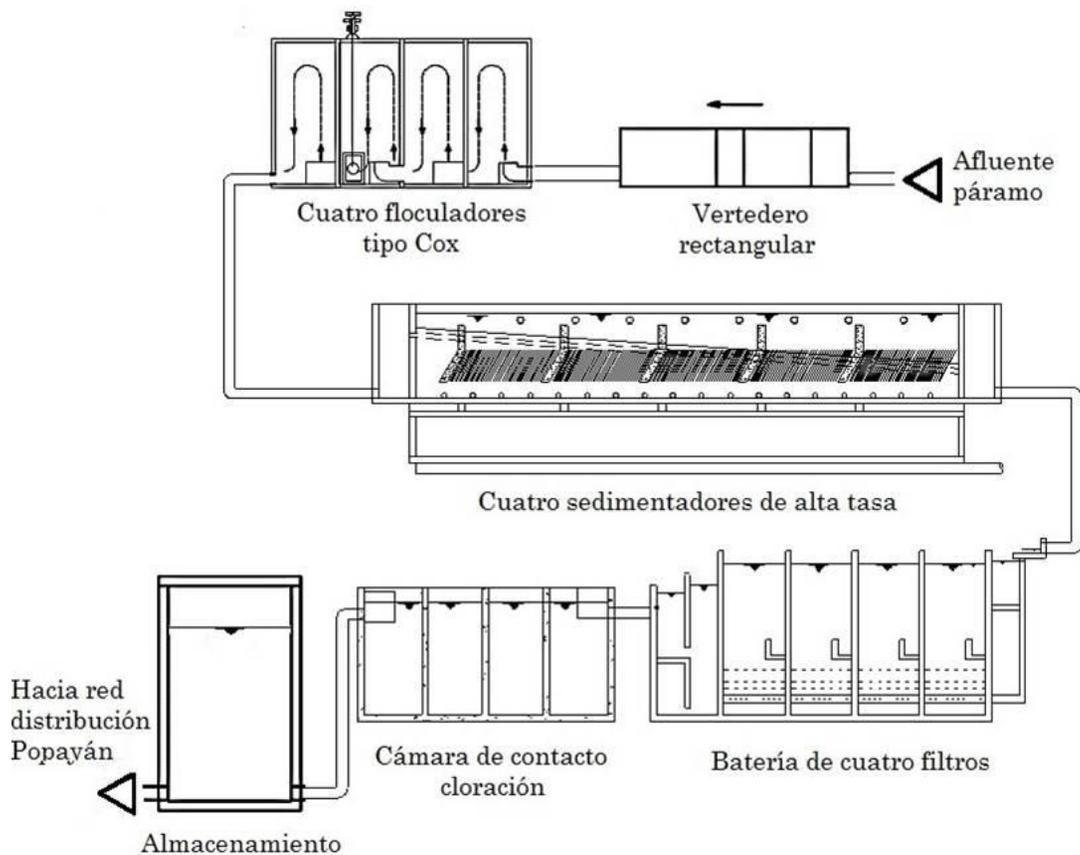


Fig. 1 Esquema de las fases de tratamiento de la PTAP. Fuente: autores.

Para la determinación de la dosis de PAC como coagulante primario, se analizaron dosis desde 32 mg/L hasta 42 mg/L, partiendo de una solución de PAC 0,336% p/v. De igual manera, se eligió aquella que presentó mayor remoción de color y turbiedad al final del proceso.

Los parámetros óptimos usados en las pruebas de jarras fueron los establecidos previamente por [12] en su estudio de tratabilidad de la fuente de abastecimiento de la PTAP “Palacé” (para un caudal de 216 L/s), los cuales fueron: tiempo de mezcla rápida de 1 min (300 rpm), tiempo de mezcla lenta de 23 min (39 rpm) y tiempo de sedimentación igual a 15 min. Según los mismos autores el agua cruda debe estar estabilizada a un pH de 8,5.

Finalmente, se utilizaron pruebas estadísticas (diagramas de cajas y bigotes, ANOVA, y prueba de Tukey), con el objeto de estudiar posibles relaciones y diferencias entre las variables de estudio. Todas las pruebas estadísticas contaron con un nivel de confianza del 95 %.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Remoción de color

Los resultados obtenidos durante las 15 series de las diferentes pruebas permitieron evidenciar que el color promedio del agua cruda fue 51,3 UPC y que la combinación de mayor impacto sobre la eliminación del mismo correspondió a FeCl_3 + PAC como ayudante de coagulación, con 86,9 % de eficiencia. A este resultado le siguieron FeCl_3 , FeCl_3 + PAC como ayudante de floculación y PAC con un 75,0%, 75,9% y 55,8% de eficiencia, respectivamente. El rango de dosis requerido para el tratamiento de mayor rendimiento estuvo entre 36-42 mg/L (FeCl_3) y 0,2-0,5 mg/L (PAC ayudante de mezcla rápida), mientras que para el PAC estuvo entre 32-46 mg/L.

En la Fig. 2 se aprecian los valores máximos y mínimos, así como el comportamiento de la distribución de los datos para color. Los resultados mostraron

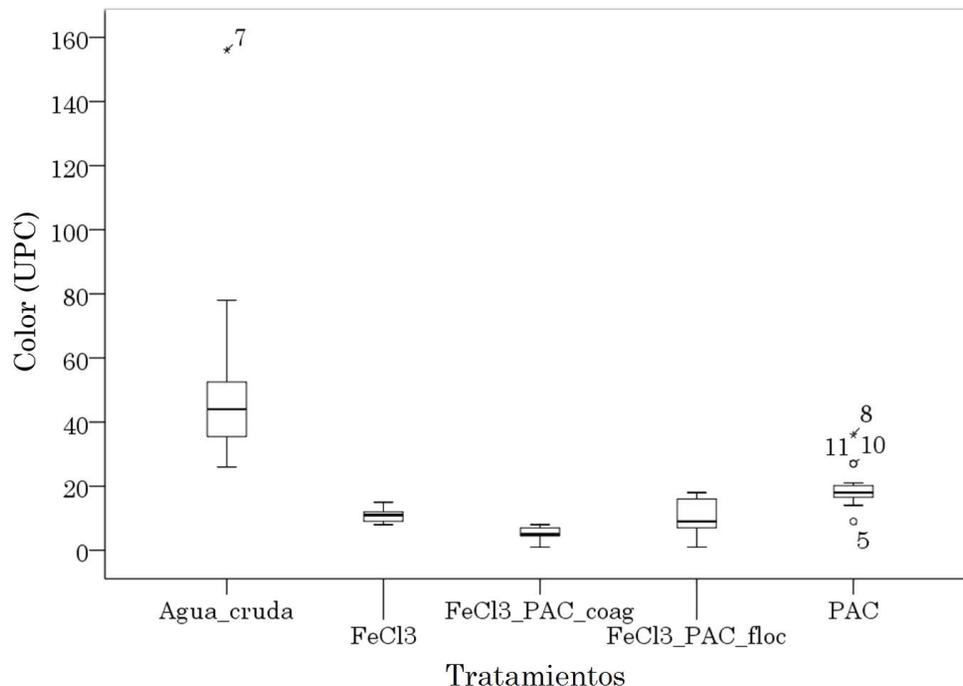


Fig. 2. Resultados obtenidos para remoción de color con los diferentes tratamientos utilizados. Asteriscos: casos extremos, valores alejados más de 3 longitudes de caja del percentil 75. Círculos: casos atípicos, valores alejados más de 1,5 longitudes de caja del percentil 75. Fuente: autores.

para el agua cruda que el valor más bajo de color registrado fue de 26 UPC y el máximo de 78 UPC. Adicionalmente, el 75 % de los datos se encontraron por debajo de 52 UPC, lo que significó una calidad deficiente de la fuente según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) [27]. En cuanto a los tratamientos de coagulantes se observó la tendencia hacia valores bajos, además de la distribución de los mismos de manera más concentrada. Particularmente, el FeCl₃ + PAC como auxiliar de coagulación presentó un rango de color entre 1-8 UPC, con una media de 5,47 UPC y una desviación estándar de 2,00; lo cual confirmó la mayor eficiencia de esta alternativa sobre las restantes.

De otro lado, el rango de pH residual de la combinación de FeCl₃ + PAC ayudante de coagulación estuvo entre 5,2-6,8, lo que coincidió con lo reportado por la literatura; la cual estableció intervalos óptimos de trabajo entre 5-11 [10], [28]. Esta situación propició un ambiente favorable, puesto que al haber una reducción significativa en el pH se generó mayor oxidación química de las SH causantes del color en el agua [29].

En la Fig. 2 también se hace visible el valor extremo para agua cruda (156 UPC), cuya situación probablemente se debió a la lluvia intensa presentada en la madrugada antes de iniciar los análisis de laboratorio. Al respecto, puede decirse que, tras propiciarse las condiciones más favorables para el buen funcionamiento de los coagulantes, fueron los tratamientos a base de FeCl₃ por encima del PAC los que reportaron las mejores remociones de color (aproximadamente 95 % sobre 90 %).

En referencia al análisis estadístico, el análisis de varianza (ANOVA, gl. = 56; p-valor < 0,050) demostró que entre los tratamientos existieron diferencias significativas. La prueba de Tukey ($\alpha=0,05$) comprobó que dichas diferencias se presentaron fundamentalmente entre los tratamientos compuestos por FeCl₃ y PAC. Principalmente, el FeCl₃ + PAC como

auxiliar de coagulación logró destacarse entre todos los tratamientos como aquel que no tuvo similitudes con ningún otro (Tabla 1).

Finalmente, en relación a la formación de subproductos de desinfección, estudios de tratamiento de agua cruda con PAC y FeCl₃ han revelado que ambos lograron una reducción significativa de trihalometanos (THMs), siendo para este último necesaria una dosis de trabajo superior a 16 mg/L para condiciones bajas de pH [30]–[33]. Lo anterior, lleva probablemente a pensar que teniendo en cuenta las condiciones de aplicación, la alternativa FeCl₃ + PAC no presentaría inconvenientes de esta índole.

Los resultados mostraron dos hechos importantes: 1) el bajo potencial de rendimiento para la eliminación de color por parte del PAC con el que trabaja actualmente la PTAP “Palacé”, y 2) el aumento del 31 % en la eficiencia de remoción de color utilizando la combinación de FeCl₃ + PAC como ayudante de mezcla rápida.

Tabla 1. Prueba HSD de Tukey para análisis de color en los diferentes tratamientos.

Fuente: autores.

Tratamiento	Subconjunto para $\alpha = 0,05$		
	1	2	3
FeCl ₃ + PAC coag.	54,667		
FeCl ₃ + PAC floc.		104,667	
FeCl ₃		106,667	
PAC			193,333

Nota: en negrilla la media de la alternativa que presentó diferencias significativas entre las medias de los tratamientos restantes.

3.2 Remoción de turbiedad

Los resultados mostraron que el valor promedio de turbiedad del agua cruda fue de 6,5 UNT. Según el RAS, este valor correspondió a una fuente de regular calidad [27]. En ese sentido, el tratamiento con la mejor eficiencia en remoción de turbiedad fue FeCl₃ (80,7 %), seguido en orden descendente por FeCl₃ + PAC

auxiliar de coagulación (80,2 %), FeCl₃ + PAC auxiliar de floculación (78,1 %) y PAC (47,1 %).

La Fig. 3 permite observar la distribución de datos de turbiedad para el agua cruda y de los distintos tratamientos con coagulantes. A diferencia de los anteriores resultados del color, pudo precisarse que el tratamiento con FeCl₃ presentó un rango de turbiedad residual menor en relación con los tratamientos que incluyeron PAC. Lo anterior posiblemente ocurrió porque este coagulante originó las mejores características de tiempo de aparición y sedimentación del floc.

Al igual que los análisis para color, solo se presentó un valor atípico de 43,6 UNT en el día de muestreo número siete. Nuevamente la prueba de jarras mostró como los tratamientos con compuestos férricos obtuvieron los mejores resultados (Fig. 3).

De otro lado, la prueba ANOVA (gl. = 56, p-valor < 0,050) evidenció la existencia de diferencias significativas entre los diferentes tratamientos. La prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) evidenció que entre los tratamientos a base de FeCl₃ no hubo diferencias significativas. Sin embargo, cada uno de ellos mostró diferencias con respecto al PAC (Tabla 2).

Por lo tanto, los tratamientos férricos (con eficiencias similares entre sí) superaron en rendimiento al PAC por aproximadamente un 30 %. Los resultados sugirieron que al existir una menor turbiedad del agua efluente en los sedimentadores se prolongarían las buenas condiciones del lecho filtrante. Esto probablemente generaría mayores carreras de filtración. No obstante, la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. [34] reportó que los tratamientos a base de FeCl₃ tendieron a generar mayores volúmenes de lodos (entre 15-20 %) en

relación con los tratamientos que emplearon PAC; adicionalmente, el lodo producido con PAC fue más fácilmente tratable.

Tabla 2. Prueba HSD de Tukey para análisis de turbiedad en los diferentes tratamientos.

Fuente: autores.

Tratamiento	Subconjunto para ($\alpha = 0,05$)	
	1	2
FeCl ₃	1,2133	
FeCl ₃ + PAC coag	1,2720	
FeCl ₃ + PAC floc	1,4000	
PAC		3,5600

Nota: en negrilla la media de la alternativa que presentó diferencias significativas entre las medias de los tratamientos restantes.

3.3 Evaluación económica del tratamiento actual y propuesto

Uno de los puntos fundamentales que se debe abordar en este tipo de investigaciones que pretende dar solución a un problema real, es considerar los costos en relación al beneficio que se obtendrá por la implementación de la nueva tecnología de tratamiento. En este sentido, se presentan en la Fig. 4 los costos (en COP) por alternativa, a partir del rango de caudales de tratamiento (mínimo = 80 L/s; máximo = 210 L/s) en la PTAP. Los tratamientos evaluados fueron: i) PAC, coagulante utilizado actualmente en la PTAP "Palacé"; y ii) FeCl₃ + PAC como ayudante de coagulación, tratamiento con los mejores resultados en la prueba de jarras. Los escenarios evaluados únicamente consideraron los costos asociados con la dosificación de PAC y FeCl₃. Es decir, no se consideraron por ejemplo los costos adicionales de ajustar el pH o los asociados con los procesos de floculación, sedimentación y filtración en la PTAP por el uso de FeCl₃.

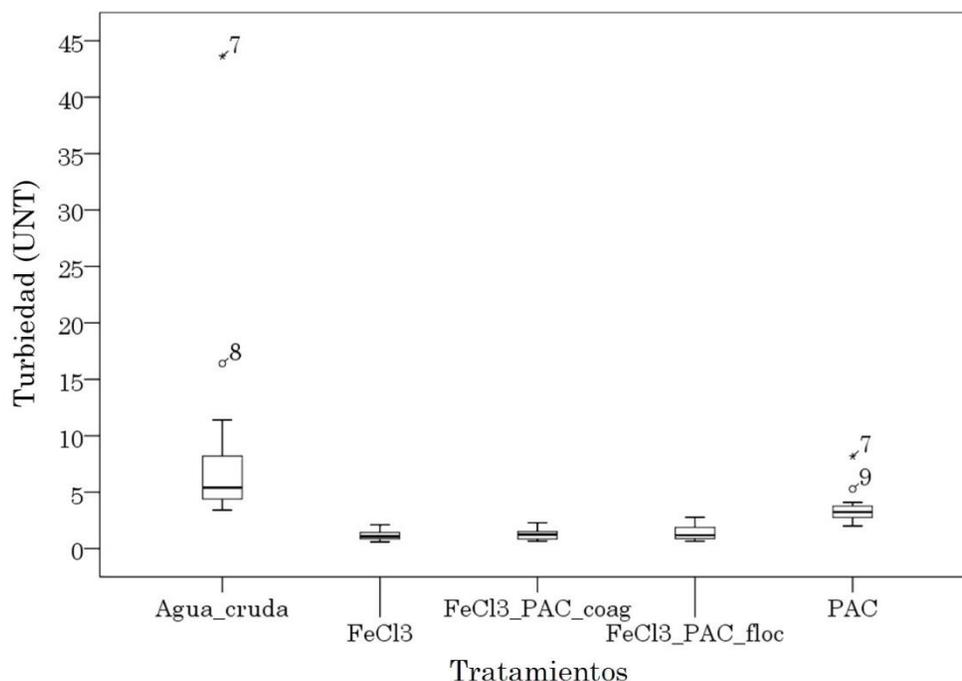


Fig. 3. Resultados obtenidos para remoción de turbiedad con los tratamientos utilizados. Asteriscos: casos extremos, valores alejados más de 3 longitudes de caja del percentil 75. Círculos: casos atípicos, valores alejados más de 1,5 longitudes de caja del percentil 75. Fuente: Autores.

En la Fig. 4 se observa cómo la combinación de FeCl_3 + PAC como auxiliar de coagulación es más económica en relación con el tratamiento con PAC. El modelo lineal de regresión para PAC muestra una pendiente mayor en relación con el tratamiento con FeCl_3 + PAC, lo que se refleja en el distanciamiento de las dos modelos lineales a medida que se incrementa el caudal. En promedio, a nivel mensual, puede pronosticarse que para tratar un caudal mínimo de 80 L/s la diferencia promedio entre los dos tratamientos es de tres millones de pesos; mientras que para un caudal máximo de 210 L/s esta diferencia aumenta a ocho millones de pesos. Dichas disminuciones de los costos de tratamiento a nivel mensual representan probablemente un ahorro significativo que puede ser destinado para atender otro tipo de requerimientos en la PTAP, bien sean operativos o administrativos. Es de relevancia aclarar, que los precios por kilogramo de cada coagulante fueron cotizados en el mercado

colombiano para noviembre de 2016 (PAC = 1290 pesos/kg; FeCl_3 = 900 pesos/kg).

3.4 Evaluación legislativa

En Colombia, la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establece en su artículo 2° que para agua de consumo humano los valores máximos permitidos de turbiedad, color aparente (antes de pasar por un filtro de 0,45 micras) y pH son de 2,0 UNT, 15 UPC y 6,5, respectivamente. Se puede observar en la Fig. 2 que en términos de color aparente solo los tratamientos a base de FeCl_3 cumplen con lo exigido por la legislación, mientras que el tratamiento con PAC se encuentra por encima del límite permitido.

En relación con la turbiedad residual, los tratamientos férricos muestran en promedio una concentración de 1,3 UNT; cumpliendo así con el valor límite establecido en la resolución colombiana, incluso sin haber pasado por un proceso de

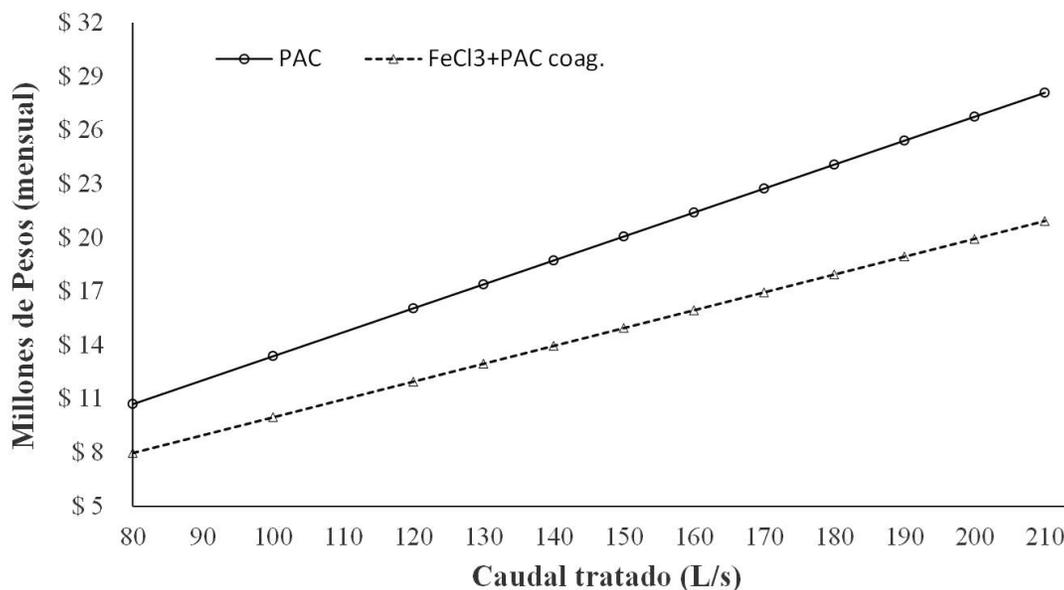


Fig. 4. Costos por alternativa en relación al caudal tratado. FeCl_3 + PAC como ayudante de coagulación, y PAC. Fuente: autores.

filtración. Por el contrario, los tratamientos con PAC muestran un valor promedio superior a 2 UNT (Fig. 3). Es importante destacar, que los registros de turbiedad en la PTAP “Palacé” después del proceso de filtración y cloración están por debajo del límite máximo permisible.

Finalmente, el rango de pH más bajo (5,2-6,05) está asociado con la alternativa de tratamiento que muestra los mejores resultados (FeCl_3 + PAC auxiliar de coagulación); motivo por el cual probablemente se hace necesario el control y estabilización del pH antes de enviar el agua a la red de distribución con destino final a los usuarios del sistema.

4. CONCLUSIONES

Para las características propias del agua cruda de la PTAP “Palacé” (agua de páramo con elevado color y baja turbiedad), los resultados en remoción de color evidencian que la combinación FeCl_3 + PAC como ayudante de coagulación es aquella que muestra el mayor rendimiento (86,9 %), con un rango de dosis para FeCl_3 entre 36-42 mg/L y para PAC entre 0,2 y 0,5

mg/L. En términos de eliminación de turbiedad, los resultados evidencian que los tratamientos a base de FeCl_3 tienen eficiencias superiores al 78 %; mientras que en el tratamiento con PAC el rendimiento disminuye al 47 %.

En promedio a nivel mensual, la evaluación económica evidencia que el tratamiento mediante FeCl_3 + PAC como ayudante de mezcla rápida para un caudal determinado es más barato (entre 25,5-34,2%) en relación con el tratamiento con PAC. Al respecto, se estima un ahorro mensual de ocho millones de pesos para un caudal máximo de tratamiento de 210 L/s. No obstante, en este estudio no se consideraron por ejemplo los costos adicionales de ajustar el pH o los asociados con los procesos de floculación, sedimentación y filtración en la PTAP a causa de una mayor producción de lodos por el uso de FeCl_3 .

Desde el punto de vista de la legislación colombiana, los resultados muestran en promedio que el color aparente cumple con límite máximo permisible (15 UPC) en todos los tratamientos mediante productos férricos; mientras que los tratamientos mediante PAC están en promedio

superando este límite máximo permisible (19,4 UPC). En este estudio la turbiedad muestra una tendencia similar en relación al color. Es decir, la turbiedad mediante tratamientos con PAC es de 3,53 UNT; superando el límite máximo permisible (2 UNT).

Este estudio se constituye en un punto de referencia para las empresas de servicios públicos y diseñadores bajo escenarios de potabilización de aguas de páramo con elevado color y baja turbiedad. Finalmente, se recomienda desarrollar en el futuro investigaciones a escala de laboratorio acerca de la sedimentación de partículas mediante FeCl₃ + PAC como ayudante de coagulación. La finalidad de estas investigaciones es profundizar el conocimiento acerca de las cargas superficiales óptimas que necesitan los sedimentadores para funcionar con la mayor eficiencia posible.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P., al Grupo de Investigación en Sistemas y Recursos Ambientales Sostenibles (SyraS) de la Universidad Manuela Beltrán (Colombia), y al Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental (GIIAUD) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia).

6. REFERENCIAS

- [1] T. Tuhkanen and A. Ignatev, "Humic and Fulvic Compounds," in *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, 3rd Editio., Finland: Elsevier, 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14413-0>, pp. 288–298.
- [2] M. Sillanpää, "Chapter 1 - General Introduction," in *Natural Organic Matter in Water*, Butterworth-Heinemann, Ed. Finland: Butterworth-Heinemann, 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801503-2.00001-X>, pp. 1–15.
- [3] G. A. Edwards and A. Amirtharajah, "Removing Color Caused by Humic Acids," *J. Am. Water Works Assoc.*, vol. 77, no. 3, pp. 50–57, Mar. 1985. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1985.tb05508.x>.
- [4] H. R. Mian, G. Hu, K. Hewage, M. J. Rodriguez, and R. Sadiq, "Prioritization of unregulated disinfection by-products in drinking water distribution systems for human health risk mitigation: A critical review," *Water Res.*, vol. 147, pp. 112–131, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.054>.
- [5] W. L. Ang, A. W. Mohammad, Y. H. Teow, A. Benamor, and N. Hilal, "Hybrid chitosan/FeCl₃ coagulation-membrane processes: Performance evaluation and membrane fouling study in removing natural organic matter," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 152, pp. 23–31, Sep. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.053>.
- [6] J. Holden, P. J. Chapman, S. M. Palmer, P. Kay, and R. Grayson, "The impacts of prescribed moorland burning on water colour and dissolved organic carbon: A critical synthesis," *J. Environ. Manage.*, vol. 101, pp. 92–103, Jun. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.02.002>.
- [7] F. Worrall and T. Burt, "Predicting the future DOC flux from upland peat catchments," *J. Hydrol.*, vol. 300, no. 1–4, pp. 126–139, Jan. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.007>.
- [8] M. C. Collivignarelli, A. Abbà, M. Carnevale Miino, and S. Damiani, "Treatments for color removal from wastewater: State of the art," *J. Environ. Manage.*, vol. 236, pp. 727–745, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.094>.
- [9] M. Sillanpää, M. C. Ncibi, A. Matilainen, and M. Vepsäläinen, "Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review," *Chemosphere*, vol. 190, pp. 54–71, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.113>.
- [10] J. Arboleda Valencia, *Teoría y práctica de la purificación del agua*, Tercera ed. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A., 2000.
- [11] A. Matilainen, M. Vepsäläinen, and M. Sillanpää, "Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 159, no. 2, pp. 189–197, Sep. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.007>.
- [12] A. M. Sánchez and V. V. Rengifo, "Estudio de los parámetros óptimos de tratabilidad para

- la fuente de abastecimiento de la planta Palacé en el municipio de Popayán, Departamento del Cauca,” Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2013.
- [13] A. P. López-Martínez and J. E. Ramírez-Palencia, “Estudio del comportamiento hidráulico de las unidades de floculación y sedimentación de la planta Palacé en la ciudad de Popayán, mediante el uso de trazadores,” Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2014.
- [14] J. Yu, D. Wang, M. Yan, C. Ye, M. Yang, and X. Ge, “Optimized Coagulation of High Alkalinity, Low Temperature and Particle Water: pH Adjustment and Polyelectrolytes as Coagulant Aids,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 131, no. 1–3, pp. 377–386, Jun. 2007. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9483-3>.
- [15] R. I. Méndez Novelo, E. R. Castillo Borges, M. R. Sauri Riancho, C. A. Quintal Franco, G. Giacomán Vallejos, and B. Jiménez Cisneros, “Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 25, no. 3, pp. 133–145, Aug. 2009.
- [16] L.-C. Lee *et al.*, “Unusual Roles of Discharge, Slope and SOC in DOC Transport in Small Mountainous Rivers, Taiwan,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 1574, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38276-x>.
- [17] G. Mitchell and A. T. McDonald, “Catchment Characterization as a Tool for Upland Water Quality Management,” *J. Environ. Manage.*, vol. 44, no. 1, pp. 83–95, May 1995. <https://doi.org/10.1006/jema.1995.0032>.
- [18] M. J. Scott, M. N. Jones, C. Woof, and E. Tipping, “Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in drainage water from an upland peat system,” *Environ. Int.*, vol. 24, no. 5–6, pp. 537–546, Jul. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(98\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(98)00043-9).
- [19] A. Baker, L. Bolton, M. Newson, and R. G. M. Spencer, “Spectrophotometric properties of surface water dissolved organic matter in an afforested upland peat catchment,” *Hydrol. Process.*, vol. 22, no. 13, pp. 2325–2336, Jun. 2008. <https://doi.org/10.1002/hyp.6827>.
- [20] H. H. Hermann, E. Hoffman, and H. Odegaard, *Chemical Water and Wastewater Treatment VIII*. Orlando: IWA Publishing, 2004.
- [21] P. Jarvis, B. Jefferson, and S. A. Parsons, “Breakage, Regrowth, and Fractal Nature of Natural Organic Matter Flocs,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 7, pp. 2307–2314, Apr. 2005. <https://doi.org/10.1021/es048854x>.
- [22] H. Ratnaweera, “Comparison of the coagulation behavior of different Norwegian aquatic NOM sources,” *Environ. Int.*, vol. 25, no. 2–3, pp. 347–355, Apr. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(98\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(98)00112-3).
- [23] E. Smith and Y. Kamal, “Optimizing treatment for reduction of disinfection by-product (DBP) formation,” *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 9, no. 2, pp. 191–198, Jun. 2009. <https://doi.org/10.2166/ws.2009.120>.
- [24] J. Tian, Z. Chen, J. Nan, H. Liang, and G. Li, “Integrative membrane coagulation adsorption bioreactor (MCABR) for enhanced organic matter removal in drinking water treatment,” *J. Memb. Sci.*, vol. 352, no. 1–2, pp. 205–212, Apr. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.02.018>.
- [25] M. Yan, D. Wang, J. Qu, J. Ni, and C. W. K. Chow, “Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: The third way through coagulant optimization,” *Water Res.*, vol. 42, no. 8–9, pp. 2278–2286, Apr. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.12.006>.
- [26] Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P., “Manual para la construcción de redes de acueducto y alcantarillado en el municipio de Popayan,” Popayán, Colombia, 2009.
- [27] Instituto Colombiano de Normas Técnicas, *Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras-NTC3903*. 2010, p. 9.
- [28] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS,” *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*, 2017. <http://www.minvivienda.gov.co/viceministerios/viceministerio-de-agua/reglamento-tecnico-del-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable>.
- [29] W. J. Weber, *Control de la calidad del agua: procesos fisicoquímicos*. Barcelona: Reverte, 1979.
- [30] D. Trujillo, L. F. Duque, J. S. Arcila, A. Rincón, S. Pacheco, and O. F. Herrera, “Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano,” *Rev. ION*, vol. 27, no. 1, pp. 17–34, Jun. 2014.
- [31] A. E. Childress, E. M. Vrijenhoek, M. Elimelech, T. S. Tanaka, and M. D. Beuhler, “Particulate and THM Precursor Removal with Ferric Chloride,” *J. Environ. Eng.*, vol. 125, no. 11, pp. 1054–1061, Nov. 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1999\)125:11\(1054\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:11(1054)).
- [20] TecnoLógicas, ISSN-p 0123-7799 / ISSN-e 2256-5337, Vol. 22, No. 45, mayo-agosto de 2019, pp. 9-21

- [32] R. Li *et al.*, “Effects of chlorination operating conditions on trihalomethane formation potential in polyaluminum chloride-polymer coagulated effluent,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 285, pp. 103–108, Mar. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.11.048>
- [33] A. M. Hansen, T. E. C. Kraus, S. M. Bachand, W. R. Horwath, and P. A. M. Bachand, “Wetlands receiving water treated with coagulants improve water quality by removing dissolved organic carbon and disinfection byproduct precursors,” *Sci. Total Environ.*, vol. 622–623, pp. 603–613, May 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.205>
- [34] D. A. Cornwell, D. K. Roth, and R. A. Brown, *Minimizing water treatment residual discharges to surface water*. Denver: Water Research Foundation, 2010.