



**OPTIMIZACIÓN DEL USO DE AYUDANTES DE COAGULACIÓN PARA LA
TRATABILIDAD DEL AGUA EN EL MUNICIPIO DE APARTADÓ**

Laura María Santana Cardona

Informe de Práctica académica presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera Sanitaria

Asesora Interna:

Diana Catalina Rodríguez Loaiza, PhD, Msc. Ingeniera Sanitaria

Asesor Externo:

Neider Montoya Urango, Ingeniero Agroforestal, Esp. Evaluación Ambiental de
proyectos

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2022

Cita	(Santana Cardona, 2022)
Referencia	Santana Cardona, L. (2022). Optimización del uso de ayudantes de coagulación para la tratabilidad del agua en el municipio de Apartadó [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me ha permitido alcanzar una de mis más grandes victorias, formarme profesionalmente.

A mi familia, quienes velaron por mi bienestar y me brindaron su apoyo incondicional.

Al cuerpo docente del programa de Ingeniería Sanitaria, de quienes recibí conocimientos y sabiduría para mi crecimiento y desarrollo profesional y humano.

A mis asesores Diana Catalina Rodríguez y Neider Montoya Urango por su acompañamiento, enseñanzas y paciencia en el transcurso de la etapa práctica.

A la compañía Aguas Regionales EPM por esta gran oportunidad de crecimiento profesional y por proveer todo lo necesario para la ejecución de este informe final.

A los Operadores de Planta de Aguas Regionales EPM, por su compañía, disposición y apoyo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. MARCO TEÓRICO	12
3.1 NORMATIVA.....	12
3.2 GENERALIDADES DE LA PLANTA DE APARTADÓ.....	12
3.3 AYUDANTES DE COAGULACIÓN	13
3.3.1 POLÍMERO.....	14
3.3.2 POLÍMERO SINTÉTICO	15
3.3.3 POLÍMERO CATIÓNICO	15
3.3.4 POLÍMERO ANIÓNICO.....	16
4.1 PREPARACIÓN Y SUSTANCIAS QUÍMICAS.....	18
4.2 PROCESO EXPERIMENTAL	18
5. RESULTADOS	21
6. ANÁLISIS.....	33
7. CONCLUSIONES.....	41
REFERENCIAS	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 1, agua del Rio Apartadó.	23
Tabla 2. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 2, agua del Rio Apartadó.	24
Tabla 3. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 3, agua del Rio Apartadó.	25
Tabla 4. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 4, agua del Rio Apartadó.	26
Tabla 5. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 5, agua del Rio Apartadó.	28
Tabla 6. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 6, agua del Pozo profundo Apartadó.	29
Tabla 7. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 7, agua del Rio Apartadó y Pozo profundo.	30
Tabla 8. Remoción de Turbiedad con Polímero Catiónico y Aniónico	35
Tabla 9. Remoción de Color con Polímero Catiónico y Aniónico.	36
Tabla 10. Descargas para la Coagulación con Polímero y sin Polímero.	39
Tabla 11. Costos de las descargas por horas de coagulante y ayudante para cada ensayo.	39
Tabla 12. Comparación de costos diarios con polímero catiónico y sin polímero catiónico	40

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Polímero con mejores dosis de acuerdo con el tipo de polímero.	34
Grafica 2. Eficiencia en remoción de Turbiedad con Ayudantes de Coagulación.	36
Grafica 3. Eficiencia en remoción de Color con Ayudantes de Coagulación.	37

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Fuente superficial, Rio Apartadó (Bocatoma).	13
Ilustración 2. Fuente subterránea, Pozo profundo Apartadó (PPAP)	13
Ilustración 3. Montaje del ensayo de jarras con dosificación de coagulante y ayudante.	19
Ilustración 4. Formación del Floc con ayudante y sin ayudante	31
Ilustración 5. Precipitación del floc con ayudante y sin ayudante.	32

RESUMEN

En la tratabilidad del agua para consumo humano, juega un papel fundamental en la aplicación de sustancias químicas que permiten la eliminación de impurezas que en fuentes naturales en su mayoría suelen ser materia orgánica disuelta en el agua, dicha característica de las aguas que se captan para potabilización, crean la necesidad de emplear coagulantes y ayudantes de coagulación que mitiguen todo el material particulado que se encuentra en suspensión, convirtiéndolo en pequeñas masas de material previamente desestabilizado física y químicamente y que buscarán la unión para que por su consistencia y peso sean removidos a través de toda la trayectoria hidráulica que recorren en una planta potabilizadora. La conjugación entre coagulantes y ayudantes de coagulación tiene la intención de optimizar los procesos en planta a nivel operativo, de calidad y económico.

En el presente informe se quiere reflejar las mejoras que se tendrían en el proceso de potabilización del municipio de Apartadó por el uso combinado de estas dos sustancias, además, se evaluó la eficiencia de dos tipos de polímeros (Catiónico y Aniónico) a nivel de remoción, a partir de ensayos de laboratorio, evaluando los parámetros de turbiedad, color y pH y cuál de los dos significaría mejoras y un ahorro en el consumo de insumos químicos que se traduce a un ahorro económico en la operatividad de la planta Apartadó de la empresa Aguas Regionales EPM.

Palabras clave: Potabilización, Coagulación, Polímeros, Remoción, Turbiedad, Color.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la labor de producir agua para consumo humano es sometida a múltiples exigencias en cuanto a cantidad y calidad, para poder servir y saciar la necesidad del recurso en las comunidades, cada día los sistemas que operan para transformar el agua se ven más forzados a trabajar con grandes diferencias en las calidades de agua que entran a la planta y la que por norma se requiere. Uno de estos parámetros de control y vigilancia que se le mide al agua tanto cruda como tratada es la turbiedad, quien da una expresión de la cantidad de partícula en suspensión que hay en una muestra de agua, esta cantidad de partículas se ve alterada por factores naturales en las fuentes hídricas, que provocan que el agua que se capta para tratamiento pueda llegar con mucha o pocas partículas que en esa misma proporción aportarán impurezas al agua. Las sustancias responsables de la turbiedad del agua son las partículas en suspensión, tales como arcilla, minerales, sedimentos, materia orgánica e inorgánica (Barrenechea, s.f.). Este material flotante tiene la característica de no tener el peso suficiente para precipitar por acción de la gravedad si no que una vez entra el agua a las plantas de tratamiento se debe someter a una aplicación de la sustancia química conocida como coagulante, este permite eliminar gran cantidad de estas y de forma rápida.

La coagulación es el proceso mediante el cual, se añaden compuestos químicos al agua para reducir las fuerzas que separan a los coloides y, puedan formar aglomerados que se sean fáciles de remover del agua por sedimentación (Arreola, 2015). Existen sistemas de tratamiento donde constantemente se tiene la presencia de altas turbiedades y demandan una mayor cantidad de coagulante para que se puedan formar los deseados flocs, sin embargo, la dosificación en gran cantidad de coagulante acarrea consecuencias poco factibles para la operación de las plantas productoras de agua, dado que, el precio del coagulante químico es elevado.

En la región de Urabá, en el departamento de Antioquia, la principal y mayor

fuentes de abastecimiento de agua para potabilizar son las fuentes superficiales, los ríos de esta zona se han caracterizado por poseer turbiedades en rangos muy altos; una de las plantas productoras de agua de la región, ubicada en el municipio de Apartadó y operada por la empresa Aguas Regionales EPM, suele emplear el agua subterránea como fuente alternativa no solo para abastecerse en temporadas de sequías, donde los ríos pierden una cantidad significativa de sus caudales si no que aprovechan las bajas turbiedades de estas fuentes, para que junto con el agua del río ingresen al tratamiento valores moderados y que no representen un consumo exagerado en el coagulante. El agua subterránea es la segunda fuente hídrica más importante en la región y también se debe tener en cuenta al momento de definir y aplicar procesos para tratar las aguas.

Por lo anteriormente descrito, se hace necesario optimizar el proceso de coagulación y se propone realizar pruebas empleando ayudantes de coagulación, que pueden ser polímeros aniónicos, catiónicos (de polaridad muy variable) o neutros, los cuales pueden presentar forma sólida (polvo) o líquida. Son sustancias de un alto peso molecular, de origen natural o sintético (Barrenechea, s.f.). Diversos estudios han atribuido al polímero la cualidad de coagulante y no de ayudante cuando las características del agua lo permiten, el efecto de aplicar el polímero en aguas con materia en suspensión depende de la cantidad del polímero en relación con la cantidad de turbiedad presente en el agua, puesto que esta sustancia puede desestabilizar como estabilizar las cargas del medio en que se encuentre (Arreola, 2015). Al igual que el coagulante químico que comúnmente se adiciona, ambos dependerán de la cantidad de turbiedad que llegue a planta y si se trabajan ambos se deberá conservar una proporción en la dosificación para cada uno según ensayos previos.

La intención de este estudio es determinar la aplicación adecuada de dos tipos de ayudantes de coagulación, conocidos como polímeros catiónicos y aniónicos para optimizar el proceso fisicoquímico de coagulación y floculación en la planta potabilizadora de Apartadó. Para ello se dispondrá de material informativo sobre

esta alternativa; Se tendrá un espacio para ensayos de laboratorio donde se hagan las pruebas y verificaciones necesarias simulando en una escala menor una etapa esencial de la tratabilidad del agua para consumo humano. La factibilidad económica de la aplicación del polímero se identificará por medio de una comparación entre el ensayo al que se le aplicará polímero y al que no, con lo anterior se tendrá un valor aproximado del ahorro en coagulante que tendría la empresa si aplica el adecuado ayudante.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Optimizar el uso de ayudantes de coagulación para la tratabilidad del agua en el municipio de Apartadó

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el tipo de polímero a emplear según las aguas de las dos fuentes abastecedoras (superficial y subterránea).
- Determinar las dosis óptimas de coagulante y ayudante de coagulación, para la disminución de la turbiedad y color.
- Estimar el ahorro que se podría obtener en la dosis de coagulante aplicando las cantidades adecuadas de ayudante

3. MARCO TEÓRICO

3.1 *NORMATIVA*

En el contexto de la norma colombiana para el sector de agua y saneamiento básico se tiene presente la potabilización de agua, como un proceso acogido por la ley 142 de 1994, como un servicio público esencial que está dispuesto a los usuarios para saciar sus necesidades básicas y brindarles un mejoramiento en la calidad de vida, Asegurando la eficiencia y eficacia de los servicios públicos domiciliarios operados por las empresas prestadoras de servicios (Ley 142 de 1994). En los proyectos de sistemas de potabilización de aguas se cuenta con una fase de selección para implementar las tecnologías y procesos unitarios de tratamiento, donde previamente se tuvo que seguir un protocolo de caracterización de agua cruda de la fuente abastecedora así lo establece y detalla la resolución 0330 del 2017 del decreto, quien define la turbiedad, el color y pH como algunos de esos parámetros mínimos de estudio para la caracterización del agua (Resolución 0330, 2017). Otra norma que ejerce control sobre la calidad del servicio público prestado es la Resolución 2115 de 2007 del decreto 1575 de 2007, quien establece las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano (Resolución 2115 de 2007). Esta define la turbiedad, el color y pH como unas características físicas que posee el agua, esta norma propone unos valores máximos permisibles considerando que por encima de estos rangos se estarían generando consecuencias negativas sobre la salud y la economía de los usuarios.

3.2 *GENERALIDADES DE LA PLANTA DE APARTADÓ*

La Planta de producción de agua potable del municipio de Apartadó es un sistema con un diseño convencional de alta tasa, con una capacidad hidráulica máxima de 400 L/s y con un caudal promedio de tratamiento de 315 L/s, este sistema cuenta con dos alternativas de abastecimiento, posee fuente subterránea que es el pozo profundo Apartadó y una fuente superficial llamada Rio Apartadó (Ilustración 1 y 2). Una vez el agua es conducida por las tuberías a las instalaciones de tratamiento, se llevan a cabo

secuencialmente los procesos de aquietamiento, pre-coagulación, pre-sedimentación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección después de esto se conduce el agua tratada a los tanques de almacenamiento.



Ilustración 1. Fuente superficial, Rio Apartadó (Bocatoma).



Ilustración 2. Fuente subterránea, Pozo profundo Apartadó (PPAP)

3.3 AYUDANTES DE COAGULACIÓN

En aguas donde se presentan bajas o altas turbiedades, donde la hidráulica del sistema se ve alterada y no se cumplen con los criterios de diseño y operación de la

planta, es difícil obtener una buena coagulación; es por ello que se requiere de sustancias que complementen al coagulante a cumplir su función y generar más beneficios en el proceso, estas sustancias son llamadas auxiliares de coagulación, generalmente estos compuestos pueden ser coagulantes o sustancias que no son coagulantes, pero modifican las características iniciales del agua cruda para optimizar los procesos de coagulación, floculación y sedimentación (Arreola, 2015).

3.3.1 POLÍMERO

Un polímero puede definirse como una sustancia química compuesta de una cierta cantidad de unidades básicas que se repiten llamadas monómeros, unidas consecutivamente por enlaces covalentes (Kirchmer, et al., 1975). Los polímeros de importancia en el tratamiento del agua pueden clasificarse, según su carga, en polímeros iónicos que son los aniónicos, catiónicos o no iónicos; y, según su origen, en naturales o sintéticos, los polímeros iónicos son comúnmente llamados Polielectrolitos por ser compuestos con gran cantidad de cargas en su estructura (Bolto y Gregory, 2007).

Por las propiedades antes mencionadas, y al ser la coagulación la desestabilización eléctrica de partículas y la floculación su aglomeración, se puede afirmar que el modo de acción de los polímeros en el agua es eficaz para trabajar como coagulante, en el caso de que las características del agua lo permitan, o como ayudante de coagulación y floculación, para nuestro caso de interés, se desea emplear el polímero como ayudante, adicionándolo de 30 a 50 segundos después del coagulante (generalmente una sal de aluminio), cuando las partículas se encuentran en la fase de desestabilización y se ha formado un micro-floculo inicial, en esta forma se evita que parte de las partículas producidas por los coagulantes metálicos sean adsorbidas por los sitios disponibles en las cadenas poliméricas y pierdan así su capacidad de desestabilización de los coloides causantes de la turbiedad (Kirchmer et al., 1975). Estudios han relacionado con el uso de los polímeros la buena remoción de material suspendido y se lo atribuyen a las características más importantes de los polímeros con respecto a sus efectos como coagulantes que son

el peso molecular y, en el caso de los polielectrolitos (iónicos) la densidad de carga (Bolto y Gregory, 2007). Lo anterior mencionado son propiedades destacables de los polímeros ya que lo que se desea es obtener un floc bien formado, estable y que por su peso precipite.

3.3.2 POLÍMERO SINTÉTICO

Los polímeros sintéticos son los compuestos orgánicos producidos mediante la transformación química del carbón y del petróleo, muchos se encuentran en forma de polvo seco, emulsiones o solución y su toxicidad debe ser evaluada, pues no todos los polímeros sintéticos están avalados para usarse en el tratamiento del agua (Kirchmer et al., 1975; Arreola, 2015). Unas de las características más destacables de los polímeros sintéticos son el número y tipo de unidades cargadas y el peso molecular, Al ser sintéticos cuentan con modificaciones en sus estructuras y se puede encontrar una gran variedad y con características más amplias y específicas, Además, se les atribuye cortos tiempos de biodegradabilidad lo que favorece un uso y eficacia prolongado.

3.3.3 POLÍMERO CATIONICO

Son conocidos por poseer una estructura molecular con carga positiva; Las aguas con altas turbiedades se caracterizan por tener en su mayoría partículas cargadas negativamente, este polímero al tener partículas positivas, es más eficiente para neutralizar las cargas en aguas turbias. Según Martínez Arreola la presencia de mucha turbiedad necesitaría grandes dosis de aluminio para neutralizar la gran cantidad de carga coloidal presente en el agua (Arreola, 2015). Esto indicaría que, para los eventos de alta turbiedad en agua cruda, se necesitaría la dosificación de un coagulante que tenga una composición importante en aluminio y un ayudante como un compuesto polimérico rico en cationes metálicos como el aluminio. El comportamiento de este polímero se explica bajo el modelo físico de la compresión de la doble capa que origina la desestabilización de carga y también por el principio físico de neutralización de cargas (Kirchmer et al., s.f.). La interacción de adsorción que es más común en estos casos es la electrostática, como lo mencionan Bolto y

Gregory en su trabajo, los polielectrolitos con una carga opuesta a la de la superficie de la partícula casi siempre se adsorben fuertemente, simplemente debido a la atracción entre grupos iónicos de carga opuesta (Bolto y Gregory, 2007).

3.3.4 POLÍMERO ANIÓNICO

Estos polímeros se caracterizan por tener cargas negativas y al presentar sitios ionizables negativos pueden ser efectivos para coagular coloides con carga negativa según observaciones realizadas por diversos estudios (citado en Barrenechea Martel, s.f.). El comportamiento de este polímero se explica bajo el modelo químico que afirma que la desestabilización de las partículas se debe a una interacción química de ionización entre los grupos químicos que contiene el agua cruda con los iones metálicos que se presentan en los coagulantes (Aldaco G, Hiram J. s.f.). Por lo anterior, Los autores destacan el trabajo de La Mer quien propuso la teoría del puente químico, que explica cualitativamente la serie de reacciones que se desarrollan para coagular coloides de igual carga.

Para la autora del capítulo de coagulación, Adda Barrenechea, basándose en la teoría del químico La Mer, las reacciones del puente químico funcionan de la siguiente manera, “Se tiene un polímero con ciertos grupos que interaccionan con la superficie de las partículas coloidales y se deja que el resto de la molécula se extienda hacia la solución, Si una segunda partícula con algunos sitios de adsorción vacíos entra en contacto con los segmentos extendidos, puede realizarse una unión. El polímero sirve de puente en el complejo partícula-polímero-partícula, si no se dispone de una segunda partícula, los segmentos dispersos del polímero pueden eventualmente adsorberse en otros lados de la partícula original, lo que hace imposible que el polímero sirva de puente y se produce la estabilización de las partículas” (Barrenechea Martel A, s.f.; Aldaco G, Hiram J. s.f.).

Este modelo también confirma la relación que existe entre las cantidades de coloides y la cantidad de coagulante y la importancia de obtener la cantidad optima del químico para dosificar, dado que un exceso de polímero podría estar saturando

todas las superficies ionizables de una misma partícula reestabilizando la suspensión y dificultando las fases y mecanismo de transporte que se pretenden alcanzar en las etapas del tratamiento de agua.

4. METODOLOGÍA

4.1 PREPARACIÓN Y SUSTANCIAS QUÍMICAS

Para el desarrollo de todo el trabajo fue importante contar con las suficientes fuentes de información como documentos, informes de investigación, artículos, libros y la normativa, con el propósito de conocer más sobre los estudios y experiencias en el uso del polímero, sus aplicaciones en la tratabilidad del agua y los resultados que se pueden esperar. Para el trabajo experimental contamos con los siguientes químicos:

Coagulante:

Policloruro de Aluminio al 19%

Densidad: 1,32 Kg/L

Ayudantes:

- Polímero Catiónico: Praestol 851TR, basado en Acrilamida
Viscosidad: 0,5 Pa*s
Efectivos en el rango de pH: 1 – 14.
- Polímero Aniónico: MagnaFloc LT27, basado en Acrilamida y Acrilato de Sodio.
Viscosidad: 1,5 Pa*s
Efectivos en el rango de pH: 1 – 14.

4.2 PROCESO EXPERIMENTAL

Para iniciar la fase experimental, se escogió uno de los tres tipos de agua que se presentan en planta, el agua proveniente de la fuente superficial, el río Apartadó, el agua Subterránea, y el agua producto de la mezcla del río y del pozo. se tomó una cantidad suficiente de la muestra con que se iniciarán las pruebas, realizando una caracterización inicial donde se miden los parámetros básicos de calidad, Turbiedad, Color y pH. Para el caso del agua superficial se realizaron ensayos con cinco caracterizaciones de agua cruda diferentes, debido a las fluctuaciones que generalmente se presentan y ampliar el panorama de acción de los dos tipos de

polímero. Para el agua de pozo y mezcla se realizaron ensayos con una muestra de cada una, puesto que sus características no presentan variaciones significativas.

Una vez se obtenidos los valores de la caracterización de agua cruda, se hizo el montaje del ensayo de jarras (Ilustración 3) para determinar dosis optima de coagulante (Policloruro de Aluminio), para cada ensayo que se realizó se evaluaron los clarificados obtenidos en cada jarra y las mediciones de Turbiedad, Color y pH, se determinó la jarra con mejores resultados en cuanto a la remoción de turbiedad y color y se estableció una dosis optima del proceso de solo coagulante. Hallado el valor de dosificación de PAC al 19%, se procede con un segundo ensayo de jarras donde la cantidad de coagulante es fija (la óptima hallada) y se adiciona en cada jarra una dosis variable de Polímero, se inició dosificando el aniónico y con esto se logró obtener un valor de dosificación que favorezca la desestabilización de partículas. Se deberá repetir el paso anterior para el segundo tipo de polímero a evaluar el catiónico.



Ilustración 3. Montaje del ensayo de jarras con dosificación de coagulante y ayudante

Habiendo encontrado los dos valores deseados de coagulante y ayudante, se procedió con el ajuste en las cantidades de estas dos sustancias, con el objetivo de que disminuya la demanda de coagulante y aumente el consumo de polímero. Se inició con un tercer test de jarra donde se disminuirá proporcionalmente la dosis de coagulante, mientras se aumenta la del polímero; de este tercer ensayo se definirá para cada tipo

de agua los valores de dosificación del coagulante y del ayudante en los que se obtuvo remociones altas de turbiedad con bajo consumo de coagulante. El procedimiento anterior se repitió para cada tipo de agua y con cada clase de Polímero con el fin de hallar compatibilidad entre el agua y el ayudante.

Nota: *Se realizan los dos últimos ensayos (6 y 7) con una concentración de preparación de los polímeros a 2000 ppm, debido a la alta viscosidad que posee el polímero aniónico y así proporcionar una mejor manipulación para dosificar.*

5. RESULTADOS

Para presentar la información recopilada en todos los ensayos realizados, se emplearon tablas donde se muestra la caracterización inicial hecha al agua cruda. Se diferencia la aplicación de cada polímero con cantidades y concentraciones, adicionalmente, se resaltaron las mejores Jarras que arrojaron los valores más bajos en cuanto a turbiedad y color de cada montaje, hasta llegar a concluir cual fue la mejor dosificación y con que polímero, también se tuvo en cuenta cual fue la jarra que menos producto necesitó para arrojar valores aceptable en la remoción.

Como consideraciones para cada ensayo, tenemos que la cantidad de producto coagulante PAC 19% utilizada esta expresada en microlitros (μL) y es equivalente a la concentración en la que se dosifica el coagulante debido a que el químico lo empelamos puro y sin dilución alguna. También, se asume como una turbiedad y color adecuados a los clarificados en los que no se supere las 2 UNT y los 15 UPC. Adicionalmente, para seleccionar las mejores jarras se tuvo en cuenta aquellos clarificados que menos cantidad de coagulante primeramente y ayudante necesitaron para coagular, flocular y sedimentar exitosamente.

A continuación, la fórmula para hallar los volúmenes de dosificación para los ensayos de jarras:

$$\mu\text{L Polimero} = \frac{[\text{Polimero en jarra}] * V_{\text{jarra}}}{[\text{Polimero}]} * 1000$$

Donde:

[*Polimero*]: Concentración de preparación del producto, para este caso se trabajaron dos concentraciones 4000 ppm y 2000 ppm.

Vjarra: Volumen de jarra, las jarras que se utilizaron fueron de 1000 mL.

[*Polimero en jarra*]: Concentración del polímero en la jarra.

Se realizaron ensayos con la primera muestra agua cruda obtenida de la cámara de aquietamiento de la planta de tratamiento proveniente del río Apartadó, mostrados en la (Tabla 1) la caracterización inicial arrojó una turbiedad de 97 UNT, Color de 661 UPC y un pH de 8,34. Se escoge como dosis optima de coagulante sin ayudante unas 8 ppm de PAC y con el objetivo de mejorar el clarificado y bajar la dosis de coagulante se dosifican los dos tipos de polímeros por aparte, llegado al resultado de que se podría bajar 1 ppm (1 μ L) de coagulante adicionando cualquiera de los polímeros, con la diferencia de que con uno obtengo un buen clarificado con menos dosis de ayudante que con otro. Para este caso se escoge como la mejor jarra la dosis de 7 ppm de coagulante (7 μ L de PAC) y 0,03 ppm de polímero Aniónico (7,5 μ L MagnaFloc LT27).

Tabla 1. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 1, agua del Rio Apartadó.

ENSAYO 1													
Caracterización inicial, Agua de Rio Apartadó.			Turbiedad	97									
			Color	661									
			Ph	8,34									
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6							
Dosis Coagulante (ppm)	6	8	10	12	14	16							
Turbiedad	3,04	1,67	1,19	1,08	0,76	0,68							
Color	23	14	9	8	5	4							
pH	8,42	8,33	8,32	8,3	8,27	8,24							
Polimero Cationico 0,4%							Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6		Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	8	8	8	8	8	8	Dosis Coagulante (ppm)	8	8	8	8	8	8
Dosis Polimero (ppm)	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	Dosis Polimero (ppm)	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Dosis Polimero (µL)	7,5	10	12,5	15	17,5	20	Dosis Polimero (µL)	7,5	10	12,5	15	17,5	20
Turbiedad	2,18	1,40	1,49	1,37	1,41	1,50	Turbiedad	2,05	2,0	2,11	2,42	2,67	2,41
Color	10	8	9	12	13	12	Color	21	11	12	14	18	14
pH	8,56	8,51	8,48	8,44	8,42	8,42	pH	8,56	8,46	8,43	8,44	8,46	8,46
Polimero Cationico 0,4%							Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6		Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	7	7	7	7	7	7	Dosis Coagulante (ppm)	7	7	7	7	7	7
Dosis Polimero (ppm)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	Dosis Polimero (ppm)	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Dosis Polimero (µL)	12,5	15	17,5	20	22,5	25	Dosis Polimero (µL)	7,5	10	12,5	15	17,5	20
Turbiedad	2,29	2,69	2,32	1,75	1,85	2,52	Turbiedad	1,89	1,95	2,25	2,66	2,01	2,06
Color	24	18	18	15	15	18	Color	12	13	19	20	17,5	20
pH	8,6	8,48	8,5	8,47	8,47	8,46	pH	8,5	8,42	8,40	8,39	8,39	8,43

A continuación, en la (Tabla 2) se presentan los ensayos realizados con el segundo tipo de agua cruda, donde se tiene una caracterización inicial con 459 UNT de turbiedad, un color de 2375 y 8,49 de pH. La dosis optima de coagulante sin ayudante serian 14 ppm de PAC, y si se aplica ayudante se puede ver como se obtienen clarificados muy por debajo del rango de turbiedades y colores que toleramos para el agua sedimentada, lo que conlleva a disminuir la dosis de coagulante y se dosificó cada polímero en ensayos independientes, con lo que se pudo lograr bajar la cantidad de coagulante de 14 µL a

11 µL con polímero aniónico y 10 µL con polímero catiónico, siendo este último el que actuó mejor.

Tabla 2. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 2, agua del Rio Apartadó.

ENSAYO 2						
Caracterización inicial, Agua de Rio Apartadó.			Turbiedad	459		
			Color	2.375		
			Ph	8,49		
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	12	14	16	18	20	22
Turbiedad	2,61	1,89	1,91	1,17	1,08	0,87
Color	16	10	8	5	5	4
pH	8,24	8,17	8,10	8,06	8,01	7,97
Polimero Cationico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	14	14	14	14	14	14
Dosis Polimero (ppm)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Dosis Polimero (µL)	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Turbiedad	1,06	0,99	1,36	1,05	0,92	1,12
Color	9	7	8	7	5	7
pH	8,45	8,39	8,33	8,31	8,31	8,33
Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	14	14	14	14	14	14
Dosis Polimero (ppm)	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Dosis Polimero (µL)	7,5	10	12,5	15	17,5	20
Turbiedad	1,09	1,07	1,41	1,51	1,32	1,43
Color	6	6	9	8	8	9
pH	8,12	8,05	8,02	8,0	7,98	7,95
Polimero Cationico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	10	10	10	10	10	10
Dosis Polimero (ppm)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Dosis Polimero (µL)	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Turbiedad	1,37	1,51	1,13	1,75	2,03	1,89
Color	9	11	9	15	11	14
pH	8,5	8,41	8,39	8,38	8,36	8,35
Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	11	11	11	11	11	11
Dosis Polimero (ppm)	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Dosis Polimero (µL)	7,5	10	12,5	15	17,5	20
Turbiedad	1,82	1,53	1,54	1,37	1,52	2,28
Color	11	9	10	9	11	14
pH	8,40	8,34	8,29	8,26	8,26	8,27

The diagram illustrates the chemical process. On the left, two circles represent the initial components: a blue circle labeled 'PAC: 10 PPM' and a green circle labeled 'Pol. Cationico: 0,05 PPM'. A plus sign (+) and an arrow (→) point to a larger green circle on the right, which represents the final result: 'Turbiedad : 1,37 UNT color: 9 UPC'.

Para nuestra tercera muestra de agua cruda (tabla 3) que consta de una turbiedad de 1354 UNT, un color de 6771 UPC y un pH de 8,34 se obtuvo una buena remoción aplicando 14 ppm de coagulante y al dosificar los polímeros se observó la viabilidad de

disminuir la cantidad de coagulante, al agregar los ayudantes se destacó el polímero aniónico al necesitar una dosis de 0,04 ppm para reducir el coagulante a 10 ppm, siendo este el mejor resultado en remoción de turbiedad y color.

Tabla 3. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 3, agua del Rio Apartadó.

ENSAYO 3						
Caracterización inicial, Agua de Rio Apartadó.				Turbiedad	1.354	
				Color	6.771	
				Ph	8,34	
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	14	16	18	20	22	24
Turbiedad	1,01	1,14	1,32	0,82	0,87	0,57
Color	11	12	13	10	11	10
pH	8,38	8,29	8,26	8,19	8,15	8,11
Polimero Cationico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	14	14	14	14	14	14
Dosis Polimero (ppm)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Dosis Polimero (µL)	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Turbiedad	0,26	1,64	1,65	1,06	0,97	0,82
Color	8	16	14	9	8	11
pH	8,35	8,24	8,17	8,16	8,19	8,17
Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	14	14	14	14	14	14
Dosis Polimero (ppm)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Dosis Polimero (µL)	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Turbiedad	1,26	1,05	1,53	1,69	1,35	2,71
Color	14	14	17	19	13	26
pH	8,35	8,27	8,22	8,23	8,30	8,25
Polimero Cationico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	12	12	12	12	12	12
Dosis Polimero (ppm)	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Dosis Polimero (µL)	10	12,5	15	17,5	20	22,5
Turbiedad	2,08	1,95	1,68	2,0	1,73	1,54
Color	19	19	18	21	17	14
pH	8,06	8	7,98	8,03	7,94	7,91
Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	12	12	12	10	10	10
Dosis Polimero (ppm)	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04
Dosis Polimero (µL)	10	7,5	5	5	7,5	10
Turbiedad	1,35	1,46	1,58	1,14	1,05	1,16
Color	10	15	18	16	14	10
pH	8,20	8,20	8,23	8,16	8,26	8,23

Se sigue con la cuarta caracterización al agua cruda (tabla 4), esta agua presenta una turbiedad de 2062 UNT, color en 8860 UPC y el pH de 8,34. Para esta calidad se dosificó únicamente el coagulante a 30 ppm donde mostro buena eficiencia y al agregar

los polímeros se demostró que continuaría la factibilidad en el proceso si se reduce la dosis de coagulante, la que se pudo bajar hasta las 16 ppm y con una dosis de 0,09 ppm para ambos polímeros, pero se analizó cuál de los dos arrojó los mejores clarificados de manera general en las seis jarras, siendo el catiónico el que muestra un poco más de remoción en comparación al aniónico que también actuó bien bajo la misma dosis.

Tabla 4. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 4, agua del Rio Apartadó.

ENSAYO 4						
Caracterización inicial, Agua de Rio Apartadó.			Turbiedad	2.062		
			Color	8.860		
			Ph	8,34		
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	20	22	24	26	28	30
Turbiedad	3,04	2,82	2,43	2,84	2,35	1,53
Color	22	20	16	18	15	12
pH	8,13	8,07	8,03	7,98	7,95	7,94
Polimero Cationico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	30	30	30	30	30	30
Dosis Polimero (ppm)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Dosis Polimero (µL)	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Turbiedad	1,55	1,02	0,87	1,02	0,84	0,92
Color	13	9	8	8	9	9
pH	8,09	8,01	7,99	8,04	7,94	7,92
Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	30	30	30	30	30	30
Dosis Polimero (ppm)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Dosis Polimero (µL)	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Turbiedad	1,16	0,74	0,72	0,84	0,61	0,63
Color	10	13	13	13	11	7
pH	8,17	8,12	8,11	8,05	8,05	8,03
Polimero Cationico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	16	16	16	16	16	16
Dosis Polimero (ppm)	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
Dosis Polimero (µL)	22,5	25	27,5	30	32,5	35
Turbiedad	1,17	1,31	1,24	1,48	1,20	1,24
Color	9	10	11	12	10	11
pH	8,10	8,07	8,05	8,09	8,12	8,10
Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	16	16	16	16	16	16
Dosis Polimero (ppm)	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
Dosis Polimero (µL)	22,5	25	27,5	30	32,5	35
Turbiedad	1,49	1,34	1,28	1,14	1,05	1,16
Color	13	14	16	17	14	16
pH	8,3	8,19	8,15	8,18	8,13	8,11

Por último, en la matriz de agua del Rio Apartadó, se logró realizar un ensayo con la calidad máxima permisible para el tratamiento de potabilización en planta que es la de 10000 UNT, con un color de 59500 UPC, y 8,34 de pH. Se pudo demostrar (tabla 5) que

se necesita más de 95 ppm de solo coagulante para poder obtener aceptables valores de remoción de la turbiedad del agua cruda. Al adicionar los polímeros se identifica que con el catiónico se obtienen unas turbiedades muy bajas lo que me indicaría que podría bajar la dosis de coagulante y con el aniónico se obtienen turbiedades por encima del rango que definimos como aceptable en el agua clarificada, lo que me señalaría que debo aumentar ya sea la dosis de coagulante o del ayudante aniónico. Con el ayudante aniónico se logra reducir la dosis de PAC hasta 60 ppm acompañándola con 0,17 ppm de polímero; mientras que con el catiónico se logra establecer una dosis de 50 ppm y 0,12 ppm de polímero siendo esta la dosis con los mejores resultados.

Tabla 5. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 5, agua del Rio Apartadó.

ENSAYO 5						
Caracterización inicial, Agua de Rio Apartadó.			Turbiedad	9.890		
			Color	59.500		
			Ph	8,34		
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	80	83	86	89	92	95
Trubiedad	6,85	7,98	6,82	5,59	4,39	3,03
Color	37	47	35	28	22	15
pH	8,24	8,12	8,02	7,98	7,91	7,85
Polimero Cationico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	95	95	95	95	95	95
Dosis Polimero (ppm)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Dosis Polimero (µL)	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Turbiedad	1,54	1,72	1,11	0,85	0,88	0,75
Color	3	5	3	5	2	1
pH	8,3	8	7,91	7,78	7,69	7,65
Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	95	95	95	95	95	95
Dosis Polimero (ppm)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Dosis Polimero (µL)	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Turbiedad	7,91	4,78	4,39	4,78	3,29	3,04
Color	36	23	21	21	15	14
pH	8,04	8,02	7,91	7,42	7,84	7,81
Polimero Cationico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	50	50	50	50	50	50
Dosis Polimero (ppm)	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
Dosis Polimero (µL)	30	32,5	35	37,7	40	42,5
Turbiedad	1,86	1,89	1,26	1,11	1,06	0,94
Color	10	12	9	7	7	7
pH	8,17	8,10	7,9	7,81	7,75	7,71
Polimero Anionico 0,4%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	60	60	60	60	60	60
Dosis Polimero (ppm)	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
Dosis Polimero (µL)	30	32,5	35	37,5	40	42,5
Turbiedad	2,9	3	2,43	1,84	2,02	1,72
Color	17	19	17	13	14	12
pH	8,19	8,12	8,04	8	8,04	7,98

Con el agua del Pozo profundo, también se inició con una caracterización inicial de la calidad, mostrándonos la turbiedad más baja de todo el trabajo 9 UNT, un color de 65 UPC y el pH en 7,68. La coagulación para esta agua ajustó en la dosis de 6 ppm de PAC 19 y al adicionar los polímeros en sus respectivos ensayos se evidenció remociones altas en turbiedad, lo que permitiría reducir la dosis de polímero y

complementar con el ayudante. Para ambos casos con aplicación de polímeros se pudo bajar la cantidad de coagulante a 4 ppm y ajustar con 0,12 ppm de ayudante, pero se notó que la calidad del agua sedimentada era mejor con polímero catiónico como se puede apreciar en la (Tabla 6).

Tabla 6. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 6, agua del Pozo profundo Apartadó.

ENSAYO 6						
Caracterización inicial, Agua de Pozo			Turbiedad	9		
			Color	65		
			Ph	7,68		
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	4	5	6	7	8	9
Trubiedad	3,33	2,45	1,67	1,42	1,0	0,69
Color	24	17	9	8	5	7
pH	7,78	7,79	7,82	7,84	7,81	7,84
Polimero Cationico 0,2%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	6	6	6	6	6	6
Dosis Polimero (ppm)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Dosis Polimero (µL)	5	10	15	20	25	30
Turbiedad	1,34	1,60	1,06	1,26	2	1,5
Color	8	14	9	10	16	11
pH	8,06	8,47	8,06	7,99	8,44	8,53
Polimero Anionico 0,2%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	6	6	6	6	6	6
Dosis Polimero (ppm)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Dosis Polimero (µL)	5	10	15	20	25	30
Turbiedad	1,33	1,79	1,41	1,27	1,17	1,38
Color	10	12	10	9	7	8
pH	7,88	7,82	7,79	7,79	7,76	7,75
Polimero Cationico 0,2%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	5	5	5	4	4	4
Dosis Polimero (ppm)	0,04	0,05	0,06	0,10	0,11	0,12
Dosis Polimero (µL)	20	25	30	50	55	60
Turbiedad	0,62	0,50	0,70	2,26	2,14	1,12
Color	1	1	1	12	11	7
pH	8,25	8,27	8,27	8,18	8,25	8,26
Polimero Anionico 0,2%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	5	5	5	4	4	4
Dosis Polimero (ppm)	0,04	0,05	0,06	0,10	0,11	0,12
Dosis Polimero (µL)	20	25	30	50	55	60
Turbiedad	1,55	1,48	0,97	2,95	1,41	1,23
Color	12	10	9	23	12	10
pH	7,96	7,9	7,92	7,89	7,89	7,89

PAC: 4 PPM
 +
 Pol. Cationico: 0,12 PPM
 →
 Turbiedad : 1,12 UNT
 Color: 7 UPC

Se finaliza la fase de ensayos (Tabla 7) con el agua cruda proveniente de la mezcla del agua del Rio Apartadó y el pozo profundo, con una turbiedad de 12 UNT, 94 UPC de

color y el pH de 8,45. Se dosifican los coagulantes junto con los dos tipos de ayudantes y se encontró que los mejores clarificados de turbiedad y color los arrojó el polímero catiónico.

Tabla 7. Datos y resultados de los ensayos a la caracterización 7, agua del Rio Apartadó y Pozo profundo.

ENSAYO 7													
Caracterización inicial, Agua de Mezcla Rio Pozo			Turbiedad	12									
			Color	94									
			Ph	8,45									
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6							
Dosis Coagulante (ppm)	8	9	10	11	12	13							
Turbiedad	1,02	1,07	0,81	0,74	0,48	0,54							
Color	7	9	7	6	4	4							
pH	8,52	8,38	8,34	8,31	8,28	8,26							
Polimero Cat ionico 0,2%							Polimero An ionico 0,2%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6		Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	8	8	8	8	8	8	Dosis Coagulante (ppm)	8	8	8	8	8	8
Dosis Polimero (ppm)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	Dosis Polimero (ppm)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Dosis Polimero (µL)	10	15	20	25	30	35	Dosis Polimero (µL)	10	15	20	25	30	35
Turbiedad	0,94	1,26	1,62	1,11	0,91	0,85	Turbiedad	1,04	1,54	1,23	1,43	0,95	0,91
Color	7	9	10	9	7	7	Color	12	9	5	12	9	8
pH	8,55	8,47	8,46	8,5	8,46	8,44	pH	8,51	8,42	8,44	8,43	8,36	8,35
Polimero Cat ionico 0,2%							Polimero An ionico 0,2%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6		Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis Coagulante (ppm)	6	6	6	6	6	6	Dosis Coagulante (ppm)	6	6	6	6	6	6
Dosis Polimero (ppm)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	Dosis Polimero (ppm)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Dosis Polimero (µL)	10	15	20	25	30	35	Dosis Polimero (µL)	10	15	20	25	30	35
Turbiedad	1,31	1,37	2,05	1,51	1,03	1,08	Turbiedad	1,24	2,25	2,92	1,95	1,35	1,22
Color	6	10	17	10	8	8	Color	9	14	20	13	9	5
pH	8,56	8,5	8,49	8,47	8,48	8,51	pH	8,54	8,44	8,43	8,42	8,42	8,40

The diagram illustrates the combination of two substances: PAC (6 PPM) and Pol. Catiónico (0,02 PPM). These are combined (indicated by a plus sign) to produce a result with a Turbiedad of 1,31 UNT and a Color of 6 UPC.

Otra de las observaciones que se realizaron en el momento de las simulaciones en el equipo de cada ensayo fue las apreciaciones visuales que dejan las jarras a las que se aplicó polímero y las que solo cuentan con coagulante PAC al 19, se muestra una

comparación de estos dos casos mencionados en la siguiente ilustración (ilustración 4). La deseada formación del floc destaca más en los ensayos en los que se dosificó el ayudante (Jarra izquierda), lográndose pequeñas masas voluminosas y de mayor peso.

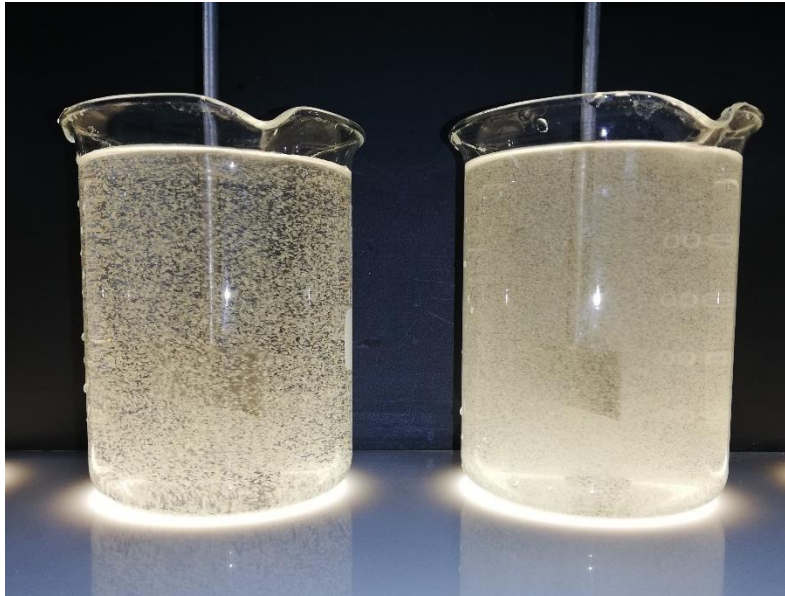


Ilustración 4. *Formación del Floc con ayudante y sin ayudante*

Alcanzando una mayor calidad en el floc, es decir, más grande y con mayor peso se favorecen los procesos de clarificación del agua que continúan como en el caso de la sedimentación, quien se ve afectada por la ausencia del polímero en (ilustración 5) se expone una imagen del proceso de sedimentación en los ensayos, observándose que la jara que contiene el ayudante (jara izquierda) presenta una mejor precipitación, eliminando la resuspensión del floc, realizando un barrido del material grueso hacia el fondo de la jara y obteniendo un mejor clarificado, cabe destacar que ambos ayudantes tanto aniónico como catiónico revelaron el mismo comportamiento frente a la formación de floc, con ambos se puede lograr una aglomeración de micropartículas consistente y de mayor peso y volumen.



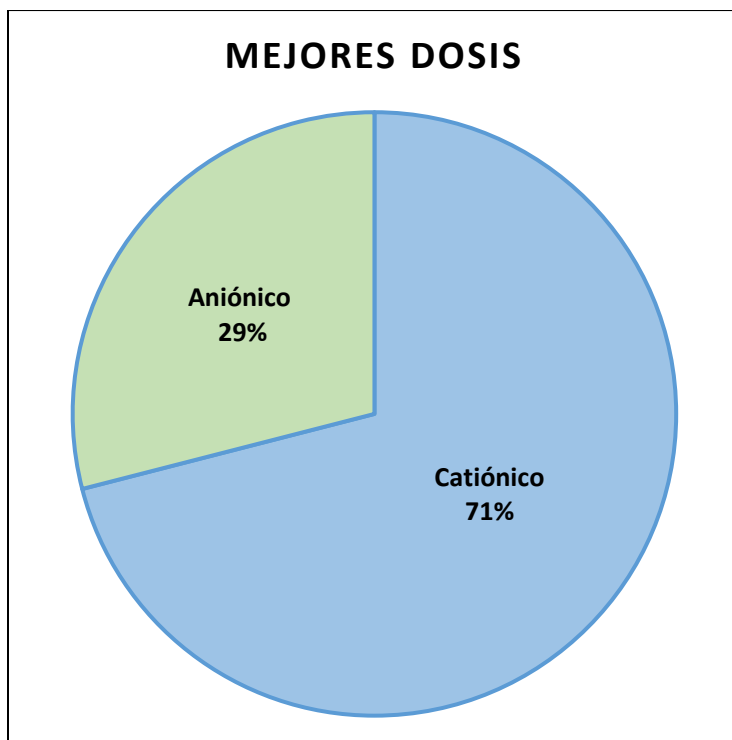
Ilustración 5. *Precipitación del floc con ayudante y sin ayudante.*

6. ANÁLISIS

Dados los anteriores resultados, se tendría que realizar un análisis del comportamiento de la remoción de los dos polímeros utilizados, se requiere determinar cuál de los dos es más eficiente en su función de ayudante de coagulación para complementar la eliminación de turbiedad y color, adicionalmente se podría escoger cual fue el ayudante que más pudo significar un ahorro en coagulante permitiendo obtener unos buenos clarificados.

En cuanto a la manipulación de los productos, se tiene en cuenta la viscosidad de ambos polímeros, siendo el aniónico tres veces más viscoso que el catiónico, esto implica mayor complejidad en su preparación y aplicación. En el presente trabajo se quiso comparar los dos polímeros a diferentes concentraciones en su preparación (4000 ppm y 2000 ppm) y se observó que al momento de dosificar a una concentración de 4000 ppm el aniónico presentaba mucha dificultad, lo que demoraba el proceso experimental, el catiónico no presentó ninguna novedad; se decide reducir la concentración a 2000 ppm buscando agilizar las dosificaciones en los ensayos y se prueba que el aniónico ya no representa obstáculo alguno para una rápida aplicación de los químicos.

Para escoger el mejor polímero según la clasificación de mejores dosis que se estableció en las tablas expuestas en los resultados, se utilizará un gráfico en donde se indique el mejor polímero en cuanto al ahorro de coagulante y la obtención de clarificados. A continuación, se evidencia en (Grafica 1) que el polímero catiónico fue el que tuvo un mayor número de jarras clasificadas como las mejores en dosificación y calidad en las muestras clarificadas para el tipo de agua que proveen las dos fuentes abastecedoras.



Grafica 1. Polímero con mejores dosis de acuerdo con el tipo de polímero.

Para establecer cuál es el polímero que más eficiencia en la remoción de turbiedad y color podría beneficiar el sistema de potabilización de Apartadó, se procede con el cálculo de la eficiencia de remoción de turbiedad y color, empleando la siguiente formulación:

$$E_{Turbiedad} = \frac{Turbiedad\ inicial - Turbiedad\ final}{Turbiedad\ final} * 100$$

Donde:

$E_{Turbiedad}$: Eficiencia en remoción de turbiedad

Turbiedad inicial: Turbiedad del agua cruda

Turbiedad Final: Turbiedad del agua sedimentada

$$E_{Color} = \frac{Color\ inicial - Color\ final}{Color\ final} * 100$$

Donde:

E_{Color} : Eficiencia en remoción de Color

Color inicial: Color del agua cruda

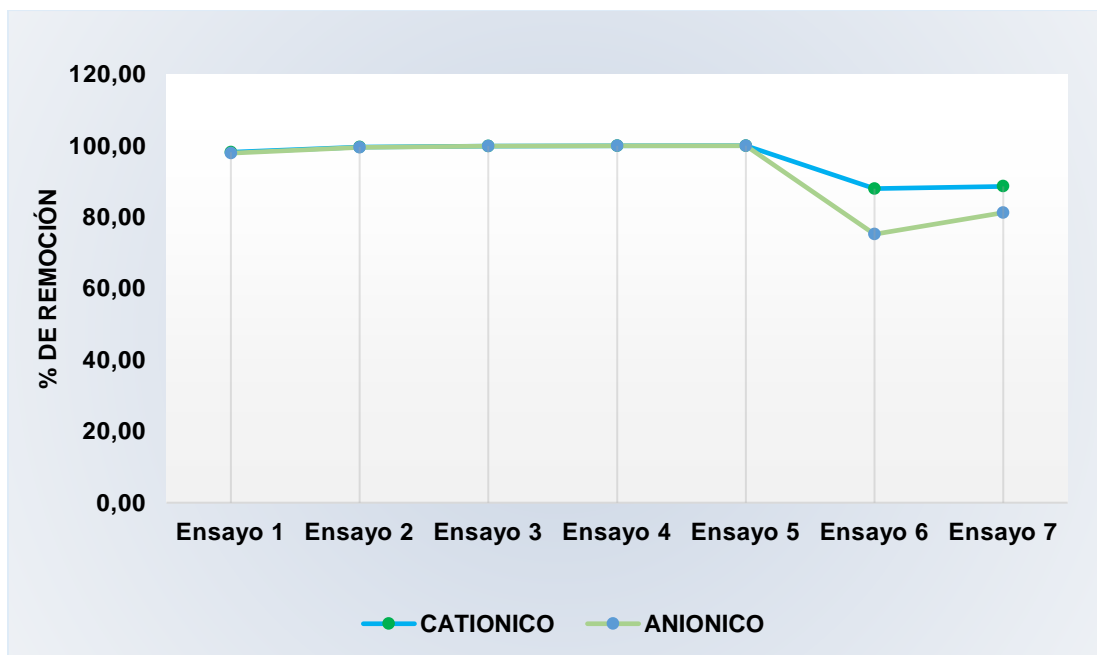
Color Final: Color del agua sedimentada

Los resultados de los cálculos efectuados con la anterior formulación se muestran en las siguientes tablas (Tablas 8 y 9) y gráficas (Gráficas 2 y 3). Se tiene en cuenta para el siguiente análisis fijar la misma dosificación para ambos casos y así apreciar cual es polímero con mejores resultados.

Ambos polímeros muestran eficiencias sobresalientes; sin embargo, en la (tabla 8) es el catiónico quien destaca con sus resultados altos de remoción sobre todo en las muestras del agua de río con turbiedades altas, el aniónico logra superar al catiónico en dos muestras del agua de río con turbiedades bajas, el aniónico mostró mejores remociones en estas condiciones que se caracterizan por poseer dificultad para flocular en comparación a las situaciones de turbiedades altas donde el proceso de formación de floc es favorecido. En el caso de las muestras que contienen agua de pozo indicaron un comportamiento contundente como se logra observar en la gráfica (gráfica 2) frente a los dos polímeros, siendo el catiónico quien obtuvo un mejor desarrollo de la remoción para este tipo de aguas.

Tabla 8. Remoción de Turbiedad con Polímero Catiónico y Aniónico

	Turbiedad inicial (UNT)	CATIONICO				ANIONICO			
		Coagulante [ppm]	Polímero [ppm]	Turbiedad final (UNT)	REMOCIÓN DE TURBIEDAD %	Coagulante [ppm]	Polímero [ppm]	Turbiedad final (UNT)	REMOCIÓN DE TURBIEDAD %
Ensayo 1	96,7	7	0,07	2,32	97,60	7	0,07	2	97,93
Ensayo 2	459	9	0,07	1,9	99,59	9	0,07	2,26	99,51
Ensayo 3	1.354	12	0,04	2,08	99,85	12	0,04	1,35	99,90
Ensayo 4	2.062	16	0,09	1,17	99,94	16	0,09	1,49	99,93
Ensayo 5	9.890	60	0,13	1,63	99,98	60	0,13	3	99,97
Ensayo 6	9,31	4	0,12	1,12	87,97	4	0,12	2,31	75,19
Ensayo 7	12	6	0,03	1,37	88,58	6	0,03	2,25	81,25

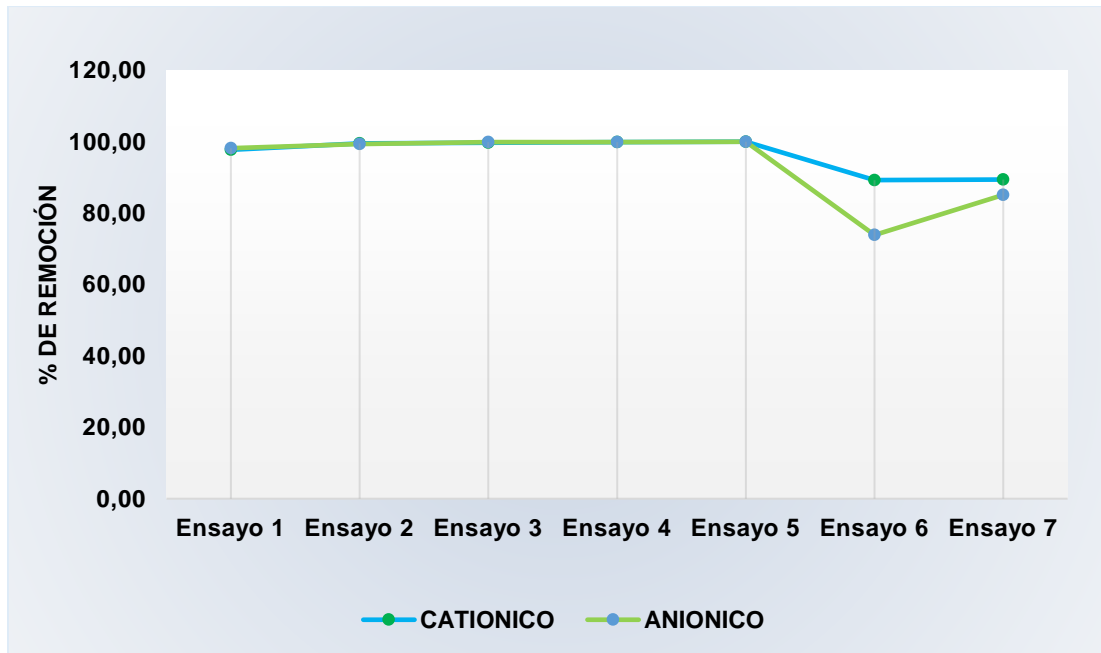


Grafica 2. Eficiencia en remoción de Turbiedad con Ayudantes de Coagulación.

En la eliminación de color de las aguas naturales, ambos polímeros adquieren el mismo comportamiento que en la remoción de turbiedad como se evidencia en la (tabla 9) y (grafica 3), se sigue apreciando una afinidad del polímero catiónico en las situaciones de colores altos en las aguas y por su parte el polímero aniónico también mostró relevancia en dos muestras de colores bajos en las muestras de agua del Pozo profundo.

Tabla 9. Remoción de Color con Polímero Catiónico y Aniónico.

	Color inicial (UPC)	CATIONICO				ANIONICO			
		Coagulante [ppm]	Polímero [ppm]	Color final (UPC)	REMOCIÓN DE COLOR %	Coagulante [ppm]	Polímero [ppm]	Color final (UPC)	REMOCIÓN DE COLOR %
Ensayo 1	661	7	0,08	15	97,73	7	0,08	12	98,18
Ensayo 2	2375	9	0,07	12	99,49	9	0,07	16	99,33
Ensayo 3	6.771	12	0,04	19	99,72	12	0,04	10	99,85
Ensayo 4	8.860	16	0,09	9	99,90	16	0,09	13	99,85
Ensayo 5	59.500	60	0,13	9	99,98	60	0,13	18	99,97
Ensayo 6	65	4	0,12	7	89,23	4	0,12	17	73,85
Ensayo 7	94	6	0,03	10	89,36	6	0,03	14	85,11



Grafica 3. Eficiencia en remoción de Color con Ayudantes de Coagulación.

Habiendo determinado que el polímero catiónico fue el ayudante que junto al coagulante alcanzó las mejores remociones de turbiedad y color y a su vez mostraron volúmenes de dosificación en los dos químicos, favorable para las características del agua que se presentan en agua Apartadó, se procede con los cálculos de descarga de cada uno, para realizar un comparativo de los dos escenarios, con polímero y sin polímero. Se consideran las dosis de los ensayos realizados en las que se tuvo las mejores jarras con el polímero catiónico por ser este el que mejores resultados obtuvo, Las expresiones para calcular la descarga de coagulante y polímero que se tendrían para cada dosis según los ensayos realizados son las siguientes:

$$Dc = \frac{Q * Cc * 60}{1000}$$

Donde:

Dc: Descarga de coagulante (mL/min)

Q: Caudal de tratamiento (L/s)

Cc: Concentración de coagulante (ppm = mL/m³)

$$Dp = \frac{Q * Cvp * 60 * 1000}{Cpp}$$

Donde:

Dp: Descarga de polímero (mL/min)

Q: Caudal de tratamiento

Cvp: Dosis de polímero (ppm = mL/m³)

Cpp: Concentración de preparación del polímero (ppm)

Nota: Para expresar la descarga en unidades de L/h se multiplica el resultado de Descarga de coagulante y la Descarga de polímero, que está en mL/min, por 0,06.

Una vez calculadas las descargas en L/h con cada dosis y en los dos casos de evaluación (con polímero y sin polímero, se calculan los kilogramos que se gastan de cada producto, para el caso del coagulante se tiene en cuenta la densidad del producto y para el polímero se recurre a la concentración de su preparación, que para el presente trabajo se prepararon a dos concentraciones (4000 ppm y 2000 ppm).

*γ*coagulante PAC 19%: 1,32 Kg/L

Nota: Para expresar la descarga de Polímero en Kg/h se multiplica por la concentración de preparación del producto, teniendo en cuenta que *Cpp* para el ensayo 1,2,3,4 y 5 fue de 4000 ppm y para los ensayos 6 y 7 de 2000 ppm.

ppm = mg/L

$$Dp \left(\frac{kg}{h} \right) = Dp \left(\frac{L}{h} \right) * \frac{Cpp \left(\frac{mg}{L} \right)}{1'000.000}$$

Donde:

$Dp \left(\frac{kg}{h} \right)$ = Descarga de Polímero en kilogramo por hora

$Dp \left(\frac{L}{h} \right)$: Descarga de Plímero en litros por hora

Cpp: Concetración de preparación del Polímero $\left(\frac{mg}{L} \right)$

Ejecutado todos los caculos anteriormente explicados se tiene la siguiente tabla (tabla 10), se seleccionan los ensayos en los cuales el ayudante catiónico tuvo ventaja en los clarificados con mejores dosificaciones, se trabaja escoge hacer la simulación adoptando un caudal promedio de 300 L/s y se calculan las descargas de estos insumos químicos en litros por hora y también se expresa en kilogramos por hora. En los valores de descarga de coagulante se aprecia una menor cantidad de PAC19 requerida cuando se aplica una pequeña cantidad de ayudante catiónico.

Tabla 10. Descargas para la Coagulación con Polímero y sin Polímero.

Ensayo	Caudales Q (L/s)	Sin Polímero			Con Polímero					
		Dosis Coagulante [ppm]	Descarga Coagulante (L/h)	Descarga Coagulante (kg/h)	Dosis Coagulante [ppm]	Descarga Coagulante (L/h)	Descarga Coagulante (kg/h)	Dosis Polímero [ppm]	Descarga Polímero (L/h)	Descarga Polímero (Kg/h)
Ensayo 2	300	14	15,12	20	10	10,8	14	0,05	13,5	0,054
Ensayo 4	300	30	32,4	43	16	17,28	23	0,09	24,3	0,0972
Ensayo 5	300	95	102,6	135	50	54	71	0,12	32,4	0,1296
Ensayo 6	300	6	6,48	9	4	4,32	6	0,12	64,8	0,1296
Ensayo 7	300	8	8,64	11	6	6,48	9	0,02	10,8	0,0216

Habiendo Determinado los kilogramos por hora de coagulante y ayudante que requiere cada característica del agua cruda analizada y conociendo los precios de cada insumo al que la empresa compra a su proveedor autorizado se puede estimar el valor de la inversión que se debe hacer para adquirir los químicos y dosificar con las cantidades ya halladas como dosis optimas para cada muestra evaluada. En la siguiente tabla (tabla 11) se exponen los resultados, se observa que el gasto de dosificación por hora es más elevado cuando no se aplica el ayudante, es decir, se comprueba que la conjugación de coagulante y ayudante catiónico es eficaz no solo para mejorar los procesos de tratabilidad del agua si no para disminuir costos operativos.

Tabla 11. Costos de las descargas por horas de coagulante y ayudante para cada ensayo.

Ensayo	Valor unitario Coagulante (\$/kg)	Sin Polímero		Con Polímero					
		Descarga Coagulante (kg/h)	Valor total con IVA (\$/h)	Descarga Coagulante (kg/h)	Valor total con IVA (\$/h)	Valor unitario Polímero (\$/kg)	Descarga Polímero (kg/h)	Valor total con IVA (\$/h)	Valor total con ambos Químico (\$/h)
Ensayo 2	\$ 1.671	20	\$ 39.687	14	\$ 28.348	\$ 13.500	0,054	\$ 868	\$ 29.215

Ensayo 4	43	\$ 85.044	23	\$ 45.357	0,0972	\$ 1.562	\$ 46.918
Ensayo 5	126	\$ 251.351	67	\$ 132.290	0,1296	\$ 2.082	\$ 134.372
Ensayo 6	9	\$ 17.009	6	\$ 11.339	0,1296	\$ 2.082	\$ 13.421
Ensayo 7	11	\$ 22.678	9	\$ 17.009	0,0216	\$ 347	\$ 17.356

Para observar los resultados de ahorro a una mayor escala se expone la (tabla 12), donde se calculan los valores para un día, suponiendo que durante las 24 horas se mantuvo esa caracterización inicial del agua cruda, es decir, en el caso del ensayo 2 que tiene una turbiedad de 459 UNT y un color de 2375 UPC en su agua cruda, y la mejor dosificación se estableció mediante ensayos de jarras con 10 ppm de coagulante y 0,05 de polímero catiónico, suponiendo que estas características no sufren alteraciones durante un día de operación de la planta, se tendría un gasto monetario en coagulantes de \$701.170,16. Lo que significaría un ahorro de \$251.319,73 comparado con la cifra económica que se necesitaría para tratar el agua sin el ayudante \$952.489,89. La inversión en el polímero catiónico estaría representando un 26% menos en los costos si se utiliza solo coagulante PAC19%.

Tabla 12. Comparación de costos diarios con polímero catiónico y sin polímero catiónico

Ensayo	Sin Polímero	Con Polímero			Ahorro (\$/día)	% Ahorro (\$/día)
	Valor total PAC19 (\$/día)	Valor total PAC19 (\$/día)	Valor total polímero (\$/día)	Valor total con ambos Químico (\$/día)		
Ensayo 2	\$ 952.489,89	\$ 680.349,92	\$ 20.820,24	\$ 701.170,16	\$ 251.319,73	26
Ensayo 4	\$ 2.041.049,77	\$ 1.088.559,88	\$ 37.476,43	\$ 1.126.036,31	\$ 915.013,46	45
Ensayo 5	\$ 6.032.435,98	\$ 3.174.966,31	\$ 49.968,58	\$ 3.224.934,88	\$ 2.807.501,10	47
Ensayo 6	\$ 408.209,95	\$ 272.139,97	\$ 49.968,58	\$ 322.108,55	\$ 86.101,41	21
Ensayo 7	\$ 544.279,94	\$ 408.209,95	\$ 8.328,10	\$ 416.538,05	\$ 127.741,89	23

Se evidencia una mayor eficiencia del ayudante en turbiedades altas, logrando superar el 40% de ahorro en coagulante PAC19. Los ayudantes adquieren un comportamiento típico en coagulantes con respecto a la turbiedad y color, cuando la situación que se presenta es de turbiedades y colores altos tanto el coagulante como el ayudante tienen un desempeño superior a diferencia de cuando hay bajos colores y turbiedades.

7. CONCLUSIONES

- El polímero catiónico es el ayudante de coagulación idóneo para el tipo de aguas que se presentan en planta Apartadó, sea superficial o subterránea este polímero tiene la capacidad de tratar un amplio rango de características típicas del agua cruda, sobre todo se destaca su función en situaciones de turbiedades y colores altos en el sistema de potabilización de Apartadó.
- El polímero aniónico puede desempeñarse como un buen ayudante cuando las turbiedades y colores del agua cruda son bajas, es decir, inferiores a 1000 UNT, no se recomienda emplearlo en situaciones de altas turbiedades y colores, ni en el agua subterránea proveniente del pozo Apartadó.
- Las mejores dosis en su mayoría se obtuvieron con el ayudante catiónico, quien demostró que en compañía del Policloruro de Aluminio se pueden alcanzar altas remociones de turbiedad y color disminuyendo los volúmenes de ambos coagulantes al momento de su dosificación.
- Al dosificar coagulante y ayudante se estaría contribuyendo a un ahorro si se compara con una situación donde solo se aplique coagulante, el emplear el polímero catiónico mostró que se podría tener un ahorro cercano al 20% en los costos de dosificación de estos químicos para situaciones de turbiedades y colores bajos, y un ahorro superior al 40% para situaciones de turbiedades y colores altos.

REFERENCIAS

- ARREOLA, M. G. M. (2015). Uso de polímeros en el tratamiento de agua para consumo humano. Universidad Nacional Autónoma De México, 15–25.
- Barrenechea Martel A., CAPÍTULO 4. COAGULACIÓN Quím. Ada BarrenecheaMartel.
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf>
- Bolto, B., & Gregory, J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research*, 41(11), 2301–2324.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.012>
- Kirchmer, J., Arboleda, J., & Castro, M. (1975). Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 01(01), 1689–1699.
- Kirchmer, J. Aspectos químicos y físicos de la coagulación del agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, CEPIS.*
- Aldaco G, Hiram J. Teoría básica para el diseño de una planta potabilizadora (coagulación-floculación), Tesis Digitales, 8773, Biblioteca Digital, Universidad de Sonora, Mexico.*
- Ley 142. (1994). Ley 142 de 1994. *Diario Oficial*, 1994(41.433), 597.
<http://www.acueducto.com.co>
- Ministerio de la Protección Social, & Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Resolución Número 2115 de 2007. *Ministerio de La Protección Social Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial*, 23.
http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Resolución 0330 de 2017. Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/0330-2017.pdf>