

ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO Y ESPESAMIENTO DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE BOSCONIA DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA.

Juan Felipe Forero Torra

Erwin Fabian Trigos Duarte

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2020

ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO Y ESPESAMIENTO DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE BOSCONIA DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA.

Juan Felipe Forero Torra

Erwin Fabian Trigos Duarte

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERÍA AMBIENTAL

Director del Proyecto

Alexandra Cerón Vivas

Doctora en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

Le agradezco primero a Dios, a mis padres, familiares y amigos, que siempre estuvieron apoyándome en los momentos más duros de la carrera; agradecerles a las personas tanto docentes como personal de laboratorio de la Universidad que siempre tuvieron su mejor disposición para escuchar cualquier consulta que tuvimos durante el desarrollo del proyecto.

Juan Felipe Forero Torra

Agradecimientos

Principalmente a Dios padre todo poderoso que me permitió llegar hasta donde estoy y que sin el nada de esto sería posible, a mis padres por ese garbo y vehemencia con la me infundieron y transmitieron sus principios, a mis hermanos que gracias a ellos y a su trabajo mancomunado se me facilito llegar hasta esta etapa de mi vida, a todos mis amigos y compañeros de clase que sin ellos este paso en mi vida no hubiera dejado huella.

Erwin Fabian Trigos Duarte.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA | 14 |
| 3. ANTECEDENTES | 15 |
| 4. JUSTIFICACIÓN | 17 |
| 5. OBJETIVOS | 18 |
| 5.1 General 18 | |
| 5.2 Específicos | 18 |
| 6. MARCO TEÓRICO | 19 |
| 6.1 Potabilización del Agua | 19 |
| 6.1.1. Pretratamiento | 20 |
| 6.1.2. Coagulación | 21 |
| 6.1.3 Floculación | 22 |
| 6.1.4 Sedimentación - Desinfección - Filtración | 22 |
| 6.2 Tratamiento de Lodos | 23 |
| 6.2.1 Acondicionamiento Químico | 25 |
| Polímeros Naturales: | 27 |
| Polímeros Sintéticos: | 27 |
| Polímeros Minerales:..... | 27 |
| 6.2.1.2 Carga eléctrica de los polímeros | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 6.2.2 Espesamiento | 28 |
| 7. METODOLOGÍA | 31 |
| 7.1 Sitio de muestreo | 31 |
| 7.2 Selección de los polímeros | 32 |
| 7.3 Prueba de Acondicionamiento Químico del Lodo | 33 |
| 7.4 Parámetros óptimos para pruebas de acondicionamiento | 34 |
| 7.5 Pruebas de espesamiento | 35 |
| 8. RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 38 |
| 8.1 Selección de Polímeros | 38 |
| 8.2 Acondicionamiento químico | 46 |
| 8.2.1. Dosis óptima | 46 |
| 8.2.2. Floculación Óptima | 50 |
| 8.2.3 Sedimentación óptima | 52 |
| 8.3 Pruebas de espesamiento | 58 |
| 10. Conclusiones | 63 |
| 11. Recomendaciones | 64 |
| 12. Bibliografía..... | 64 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Procesos y Operaciones Unitarias de la PTAP Bosconia. | 20 |
| Figura 2. Desarenadores PTAP Bosconia. | 21 |
| Figura 3. Esquema de las capas en un tanque de espesamiento. | 28 |
| Figura 4. Metodología utilizada en el proyecto | 31 |
| Figura 5. Condiciones de mezcla en la determinación de dosis óptima | 34 |
| Figura 6. Parámetros óptimos de floculación o mezcla lenta | 34 |
| Figura 7. Parámetros para el acondicionamiento: Sedimentación óptima..... | 35 |
| Figura 8. Columna de vidrio (1 Litro)..... | 36 |
| Figura 9. Jarra con la muestra floculada y sedimentada..... | 42 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de espesamiento. | 29 |
| Tabla 2: Ventajas y Desventajas de las Diferentes Metodologías de Espesamiento de Lodos..... | 30 |
| Tabla 3. Polímeros suministrados por diferentes empresas a través del AMB..... | 32 |
| Tabla 4. Matriz para selección de polímeros..... | 33 |
| Tabla 5. Matriz de Selección para los polímeros..... | 44 |
| Tabla 6. Polímeros seleccionados..... | 45 |
| Tabla 7. Resultados de los parámetros óptimos para el lodo proveniente de la PTAP Bosconia..... | 58 |
| Tabla 8. Velocidad de sedimentación para los polímeros en un determinado tiempo..... | 61 |

Lista de gráficas

| | |
|--|----|
| Gráfica 1. Pruebas preliminares de Dosis optima | 38 |
| Gráfica 2. Pruebas preliminares de dosis óptima | 38 |
| Gráfica 3. Pruebas preliminares de dosis optima | 39 |
| Gráfica 4. Dosis óptima polímeros EXRO | 46 |
| Gráfica 5. Dosis óptima polímeros PRAESTOL | 47 |
| Gráfica 6. Dosis optima polímero SNF | 47 |
| Gráfica 7. Dosis óptima polímero SQ | 48 |
| Gráfica 8. Floculación optima primer muestreo | 50 |
| Gráfica 9. Floculación óptima segundo muestreo..... | 51 |
| Gráfica 10. Turbiedad promedio vs Tiempo para el muestreo 1. | 53 |
| Gráfica 11. Turbiedad promedio vs Tiempo para el muestreo 2. | 53 |
| Gráfica 12. Sedimentación óptima primer muestreo..... | 54 |
| Gráfica 13. Sedimentación óptima muestreo dos | 55 |
| Gráfica 14. Turbiedad Remanente vs Velocidad de sedimentación para el muestreo 1 | 56 |
| Gráfica 15. Turbiedad remanente vs Velocidad de sedimentación para el muestreo 2..... | 57 |
| Gráfica 16. Prueba de espesamiento polímeros EXRO..... | 58 |
| Gráfica 17. Prueba de espesamiento SQ A110 HMW | 59 |
| Gráfica 18. Prueba de espesamiento polímeros PRAESTOL..... | 60 |
| Gráfica 19. Prueba de espesamiento SNF 926..... | 60 |
| Gráfica 20. Prueba de espesamiento Lodo crudo..... | 61 |
| Gráfica 21. Sólidos Suspendidos Totales | 62 |

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO Y ESPESAMIENTO DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE BOSCONIA DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA

AUTOR(ES): Juan Felipe Forero Torra
Erwin Fabian Trigos Duarte

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Alexandra Cerón Vivas

RESUMEN

Actualmente en la Planta de Potabilización de Agua Bosconia, del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, se está construyendo un sistema de tratamiento para los lodos generados en los sedimentadores y filtros. Para la puesta en marcha de la planta, es necesario conocer algunos parámetros de operación para el espesamiento y acondicionamiento de lodos, los cuales se pueden determinar a escala laboratorio. El objetivo de este trabajo fue establecer los parámetros para el acondicionamiento químico y espesamiento de los lodos generados en la planta de agua potable Bosconia. Inicialmente, se estableció la naturaleza del polímero que más se ajustó a los parámetros evaluados para el acondicionamiento químico; además se determinaron parámetros óptimos para el espesamiento del lodo y se determinó la influencia de los polímeros sobre la sedimentabilidad del lodo. El polímero Praestol 2530 de naturaleza aniónica se destacó en las pruebas de acondicionamiento, arrojando dosis óptimas de 7,5 y 9,5 mg/L, tiempo de floculación óptimo entre 0-3 minutos y finalmente un tiempo de sedimentación óptimo de 4 minutos con bajos valores de turbiedad. Según los resultados obtenidos por las pruebas realizadas durante este estudio se pudo comprobar que el uso de polímeros es eficiente en una muestra de sólidos provenientes de una PTAP sin importar la turbiedad presente en estas, debido a que los polímeros aniónicos tuvieron un desempeño notable en las pruebas de acondicionamiento y espesamiento del lodo.

PALABRAS CLAVE:

Potabilización, lodos, turbiedad, acondicionamiento químico, espesamiento

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: CHEMICAL CONDITIONING AND THICKENING OF THE MUDS PRODUCED INN THE BOSCONIA DRINKING WATER TREATMENT PLANT OF THE BUCARAMANGA METROPOLITAN AQUEDUCT

AUTHOR(S): Juan Felipe Forero Torra
Erwin Fabian Trigos Duarte

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Alexandra Cerón Vivas

ABSTRACT

Currently, at the Bosconia Water Potabilization Plant, in the Bucaramanga Metropolitan Aqueduct, a treatment system is being built for the sludge generated in the settlers and filters. For the plant start-up, it is necessary to know some operating parameters for the thickening and conditioning of sludge, which can be determined on a laboratory scale. The objective of this work was to establish the parameters for the chemical conditioning and thickening of the sludge generated in the Bosconia drinking water plant. Initially, the nature of the polymer that best adjusted to the parameters evaluated for chemical conditioning was established; In addition, optimal parameters for the thickening of the mud were determined and the influence of the polymers on the sedimentability of the mud was determined. The Praestol 2530 polymer, anionic in nature, performed well in the conditioning tests, yielding optimal doses of 7.5 and 9.5 mg / L per sample, optimal flocculation time between 0-3 minutes for both samples, and finally a time of optimum sedimentation of 4 minutes with low turbidity values. According to the results obtained by the tests carried out during this study, it was possible to verify that the use of polymers is efficient in a sample of solids from a PTAP, regardless of the turbidity present in these, because the anionic polymers had a remarkable performance in the conditioning and thickening tests of the mud.

KEYWORDS:

Potabilization, sludge, turbidity, chemical conditioning, thickening

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace muy pocos años en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) sólo se gestionaba la producción de agua potable, prestando poca atención a los lodos que se producían, tanto en los decantadores como en el lavado de filtros, considerando que en definitiva estos lodos estaban formados por sustancias que ya llevaban las aguas naturales, generalmente inorgánicas, como arcillas, arenas finas o limos.

Pero hoy día, las aguas naturales se han ido degradando por múltiples circunstancias, y a la vez hay una mayor conciencia y presión medioambiental y legislativa, que ha impulsado a la construcción de plantas de tratamiento para los lodos, con el objetivo de remover la materia sólida y obtener efluentes libres de partículas que podrán ser vertidos al cauce o también ser recirculados a la PTAP para su respectivo tratamiento. (Quirós, 2008)

El vertimiento de lodos de las PTAP en las corrientes naturales de agua, llega a plantear problemas importantes, ya que si bien estos residuos son principalmente inorgánicos, van formando bancos de fango en los tramos lentos del cauce, a la vez aumentan la turbiedad y el color de las aguas receptoras, más aún si se está utilizando carbón activado en los procesos de potabilización, disminuyendo significativamente la actividad fotosintética de las plantas acuáticas presentes en el cuerpo de agua; es por esto que se crea la necesidad de construir una planta para los lodos provenientes del proceso de potabilización del agua.

La planta de tratamiento Bosconia, que pertenece al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, actualmente no cuenta con un tratamiento direccionado a los lodos provenientes de los sedimentadores y filtros, por lo cual los residuos generados en estas etapas del tratamiento se vierten directamente al río Suratá; alterando así las condiciones naturales aguas abajo. Por lo anterior, el propósito de este proyecto es evaluar diferentes polímeros

químicos para el acondicionamiento y posterior espesamiento de los lodos provenientes de la PTAP
Bosconia.

2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El manejo que se le ha dado a los lodos efluentes de las plantas de tratamiento de agua potable basados en coagulación química incluye el almacenamiento en lagunas artificiales por períodos de tiempo indefinidos, incineración, espesamiento y deshidratación; en estas últimas se obtienen reducciones de humedad entre 30-40% para llevarlos a disposición final. No obstante, debido a que sus propiedades mecánicas incrementan proporcionalmente con las dosis de coagulante utilizado, estas operaciones pueden resultar complejas y, en la mayoría de los casos, su disposición en fuentes de agua superficial resulta ser la alternativa de manejo preferida (Gutierrez, 2014) .

En las plantas de tratamiento convencionales del país se tienen diferentes procesos que generan gran cantidad de lodos, principalmente al final de los procesos de sedimentación y filtración. En la mayor parte de plantas se evidencia una disposición final inadecuada de lodos provenientes del proceso de potabilización de agua. En la actualidad, un gran porcentaje de las plantas realizan una disposición final de los lodos aguas abajo de los causes aleñados, sin hacerles ningún tipo de tratamiento cambiando así, sus propiedades y disminuyendo significativamente la calidad de los cuerpos de agua subyacentes a las plantas.

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga ha iniciado un proyecto para la construcción de la planta de tratamiento de lodos en la PTAP Bosconia. Sin embargo, es necesario conocer parámetros de operación para un correcto funcionamiento de esta. Este proyecto pretende evaluar diferentes polímeros disponibles en el mercado, para el acondicionamiento y posterior espesamiento del lodo producido en la PTAP Bosconia.

3. ANTECEDENTES

El tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilización es un tema relativamente nuevo en el campo de la investigación a nivel ambiental, ya que alrededor de dos décadas atrás se iniciaron los primeros estudios de los efectos de los lodos residuales de las plantas potabilizadoras; en los distintos cuerpos de agua donde son dispuestos. Pese al hecho de la escasa investigación del tema, a través de los años, varios estudios como los expuestos por Di Bernardo (2015), en donde se obtiene más compactación y remoción de sólidos dentro de las muestras de lodo tratadas, que han demostrado el efecto que pueden tener los lodos sobre los cuerpos de agua en que se disponen y los sistemas que los rodean.

En 2001, en Uganda un grupo de expertos japoneses estudió el efecto de la descarga del lodo en el lago Victoria y encontraron anomalías en las raíces de algunas plantas y deficiencia de fósforo. Esto último se atribuyó a la presencia de sales de aluminio utilizadas en el proceso de potabilización del agua, que impiden la correcta asimilación de fósforo por las raíces de la planta. (Kaggwa, Mulatelo, Patrick, & Okurutu, 2001).

En América Latina, México es uno de los países latinoamericanos que más ha estudiado los problemas provocados por la ausencia de tratamiento de los lodos generados en la potabilización del agua, demostrando con hechos la importancia del tema y brindando las pautas para que el resto de países de la zona, inicien con las respectivas medidas para la mitigación de los posibles impactos de la acumulación de los lodos por la falta de tratamiento, dentro de las cuales se destaca el hecho que los recursos para la operación de sistemas de tratamiento de lodos en las plantas potabilizadoras de América Latina son escasos; punto que es de vital importancia a tenerse en cuenta al proponer alternativas para aplicarlas en la región.

En cuanto al tratamiento de lodos a nivel nacional el principal inconveniente, es la poca información existente para guiar a las entidades que manejan estos residuos y darles bases para iniciar una

planeación en torno al tema, la cual permita identificar las ventajas de aplicar este tipo de tratamientos en las plantas de agua potable. Actualmente estos lodos son dispuestos sin ningún tratamiento en represas, terrenos baldíos o en las mismas fuentes de suministro ocasionando serios inconvenientes de consideración ambiental.

En Colombia, la información publicada en torno a experiencias de reutilización y tratamiento de los lodos provenientes de PTAP es escasa. En tres PTAP de ciclo convencional en diferentes ciudades del país, se realiza el tratamiento de lodos donde prima el tratamiento físico por medio de la deshidratación, mientras que en el municipio de Caldas (Antioquia) se cuenta con una planta piloto para el tratamiento de lodos donde se espesan por medio de polímeros hasta su secado para posterior disposición (Gutiérrez & Ramírez, 2014).

4. JUSTIFICACIÓN

El acondicionamiento, espesamiento y deshidratación son tecnologías que reducen los costos de manejo y transporte de lodos obtenidos en las PTAP. Además, la adición de polímeros sintéticos ha sido probada eficientemente para el acondicionamiento de lodos, incrementando la densidad de los flocs y la velocidad de sedimentación; los procedimientos como el acondicionamiento y espesamiento son muy importantes, ya que permiten una disposición final más sencilla de los lodos evitando que se viertan en los cauces de agua, permitiendo conservar la composición fisicoquímica de los mismos.

Lo anterior, permite la reducción del impacto al medio ambiente propiciado por las descargas de residuos de las PTAP en las corrientes naturales de agua. También son una importante alternativa en sectores urbanos donde el espacio es limitado, por lo que reducen el área requerida para los pasos posteriores de tratamiento. Por ejemplo, al separar gran parte del agua en tanques de sedimentación y espesamiento, los lechos de secado pueden ser mucho más pequeños (Dodane, 2014)

5. OBJETIVOS

5.1 General

- Establecer los parámetros para el acondicionamiento químico y espesamiento de los lodos generados en la planta de agua potable Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

5.2 Específicos

- Establecer la naturaleza del polímero que más se ajuste a los parámetros evaluados para el acondicionamiento químico.
- Determinar dosis óptima, tiempo de floculación, tiempo y velocidad de sedimentación para cada polímero estudiado.
- Determinar la influencia del acondicionamiento químico sobre la sedimentabilidad de los lodos.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 Potabilización del Agua

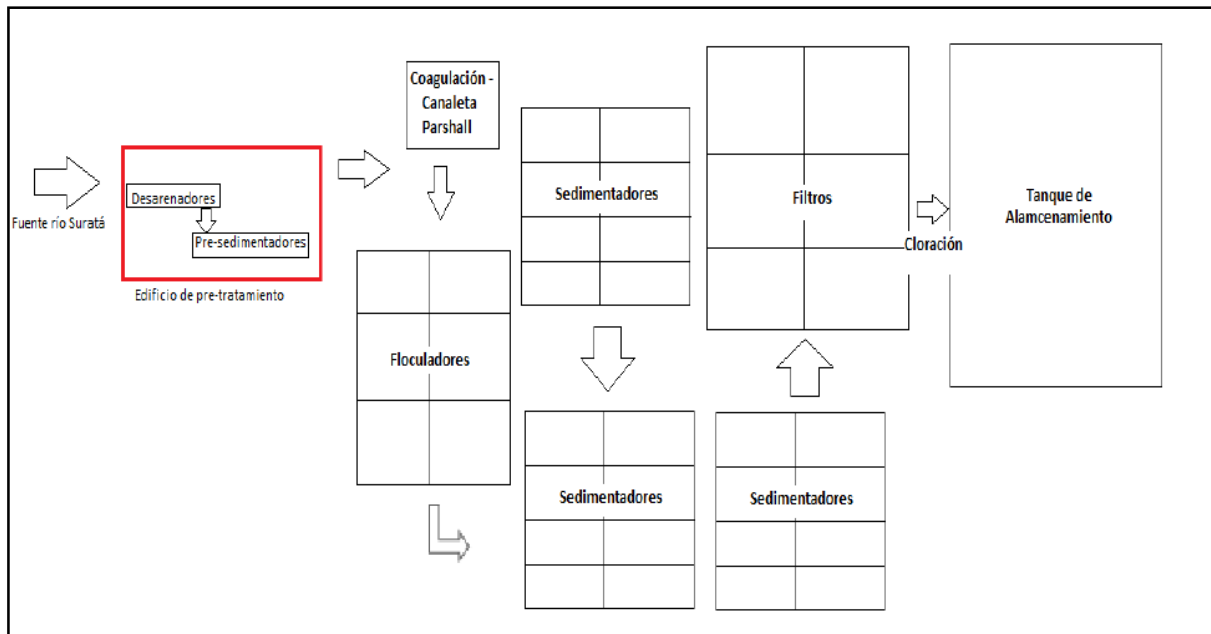
Colombia es un país rico en biodiversidad y en el recurso hídrico, presentando anualmente una oferta que supera los 2.100 km^3 ($59 \text{ L/s} * \text{km}^2$), con un volumen disponible por habitante de $50.000 \text{ m}^3/\text{año}$; estas cifras expresadas en $\text{L/s} * \text{km}^2$ clasifican a Colombia como uno de los países con mayor oferta hídrica natural en el mundo. A pesar de esta gran disponibilidad, hay deficiencia en el abastecimiento de agua potable para consumo humano en la gran mayoría de municipios afectando seriamente la zona rural la cual es fuente de producción agrícola y ganadera para el país. (Rodríguez, 2015)

En Colombia hacia los años 40, se acuñó el concepto de servicio público encaminado a satisfacer las necesidades de la población de las ciudades. Para esto es necesario implementar PTAP, por medio de las cuales se realiza el tratamiento del agua, posterior a esto, el agua puede ser servida a la población en general garantizando que es apta para consumo humano y uso doméstico. En las PTAP que incluyen coagulación, floculación, sedimentación y filtración, los lodos se producen en todos los procesos, excepto en la coagulación. (Gutiérrez & Ramírez, 2014).

El primer paso para potabilizar agua es determinar la calidad inicial del agua en la fuente de abastecimiento, lo que permitirá diseñar el tratamiento necesario. Es posible que el agua contenga metales, materia orgánica disuelta o particulada, color, sabor y olor desagradables, bacterias, virus, parásitos y otros microorganismos, grandes cantidades de calcio y magnesio, hierro y manganeso, carbonatos, bicarbonatos, cloruros o sulfatos en exceso, sustancias orgánicas de toxicidad elevada, etc. La lista puede ser muy larga y, sin embargo, son pocas las sustancias cuya presencia se verifica en el agua para consumo. (Ascencio, 2012)

El tratamiento realizado en la planta Bosconia es convencional. El agua cruda es sometida a tratamiento fisicoquímicos, para cumplir con las condiciones aptas para consumo humano como lo establece el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 de 2007. En la figura 1 se muestran las operaciones y proceso unitarios utilizados en la PTAP Bosconia.

Figura 1. Procesos y Operaciones Unitarias de la PTAP Bosconia.



Fuente: Morales Rozo & Mora Abril, 2019

La captación tiene como función principal derivar del Río Suratá un caudal hasta de 2400 L/S se usan una estructura de captación que cumple las funciones de regulador del caudal que ingresa a la planta tanto como en épocas de lluvia o invierno como en épocas de estiaje o sequía y así garantizar un flujo constante de agua durante todo el año de manera ininterrumpida. A continuación de la captación se lleva el agua a la planta por gravedad donde inicia el tratamiento (AMB, 2004).

6.1.1. Pretratamiento

Los desarenadores son obras hidráulicas que sirven para separar (decantar) y remover (evacuar), el material sólido que lleva el agua de un canal. (Alamo Sparrow, 2009) . Estas unidades hidráulicas

permiten descartar la presencia de interrupciones solidas a causa de bancos de material sedimentado disminuyendo así su sección y provocando un mal funcionamiento de la unidad. Esta unidad usa el principio de sedimentación el cual se basa en la diferencia de peso específico y el agua. En la figura 2 se aprecian los desarenadores que posee la PTP Bosconia.

Figura 2. Desarenadores PTAP Bosconia.



Fuente: Avendaño, 2010.

6.1.2. Coagulación

Es un proceso de desestabilización de las fuerzas de Coulomb presentes en las partículas coloidales, las cuales las obliga a estar separadas o repelerse esto se lo logra después de la adición de coagulantes químicos y la previa inducción de energía por medio de la agitación rápida (Cárdenas, 2000).

6.1.3 Floculación

Este proceso se basa en agitar el agua favoreciendo la formación de flóculos más grandes por medio de la cohesión de partículas, esta agitación del agua debe realizarse de forma muy lenta ya que si se realiza rápidamente se desestabilizan las aglomeraciones ya formadas y se causaría una resuspensión de sedimentos. Es importante que se generen floculos grandes y compactos para que tengan mayor peso específico y a su vez sean mas sedimentables y se cumpla con la finalidad de precipitación de sedimentos mucho más rápido.

6.1.4 Sedimentación - Desinfección - Filtración

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua (Moreno Capacho & Delgado Aguilar, 2009). Las partículas que se sedimentan lo hacen por tener mayor peso específico que el fluido donde se encuentran contenidas y las partículas que no se logren remover por efecto de la gravedad se deben eliminar por medio de la filtración.

La filtración directa ascendente es la que se usa normalmente en los procesos convencionales el tratamiento de agua para abastecimiento público, unas de las ventajas de la filtración ascendente son: reducción en las dimensiones de la estación de tratamiento, usa su altura total para la retención de partículas o impurezas etc. Esta tecnología fue tan eficiente que fue adoptadas en grandes ciudades como Moscú, Leningrado y Kiev entre otras. Esto fue un gran avance ya que permitió la que la coagulación y la clarificación fueran combinadas en un único proceso por medio de la adición de un coagulante químico antes de pasar por el filtro de arena. La distribución del agua en la base del filtro se hace por medio de un sistema “manifold” que permite el flujo ascendente y facilito el tratamiento de tasas más elevadas garantizando la eficiencia del proceso pudiendo tratar agua con turbidez de hasta 150 mg/L. (Di Bernardo Dantas, 2015, pág. 785)

En cuanto a la desinfección es un proceso que usa un agente químico o no químico y que tiene como objetivo la inactivación de microorganismos patogénicos presentes en el agua, incluyendo bacterias,

protozoos y virus, también de algas, por medio de los siguientes mecanismos: a) destrucción de la estructura celular; b) interferencia de metabolismo con inactivación de encimas; c) interferencia en la biosíntesis en el crecimiento celular, evitando la síntesis de pro de proteínas, ácidos nucleicos y coenzimas. Considérese que la eficiencia de la desinfección resulta en la oxidación en la pared celular trayendo como consecuencia la desintegración de las células, o la difusión de un agente en el interior de la célula el cual interfiere en sus actividades. La desinfección es un proceso selectivo por eso no destruye todas las formas de vida ni todos los organismos patogénicos ya que la destrucción de todas las formas de vida se llama esterilización. Entre los agentes químicos usados en la desinfección en general tenemos oxido de cloro, bromo, iodo, dióxido de cloro, ozono, permanganato de potasio, peróxido de hidrogeno, ácido peracético, ferrato de potasio y iones metálicos de plata y cobre, en cuanto a agentes físicos destacan el calor en la radiación ultravioleta. (Di Bernardo Dantas, 2015, pág. 1151)

6.2 Tratamiento de Lodos

El lodo obtenido en las plantas de tratamiento es una mezcla básica de los sólidos presentes en el agua a tratar y coagulante utilizado para tal fin. Cuando se añade sulfato de aluminio al agua, la reacción se presenta típicamente de acuerdo con la siguiente ecuación:



Cuando se logra el equilibrio, el hidróxido de aluminio será el producto predominante. Sin embargo, el equilibrio no se logra normalmente y se forma un compuesto complejo polimerizado, que contiene en promedio 3 o 4 moléculas del agua unidas al hidróxido de aluminio, el cual precipita. El agua unida al complejo incrementa la cantidad de lodo, aumenta el volumen del lodo y lo hace más difícil de desaguar, ya que las moléculas de agua unidas químicamente no se pueden remover mediante los métodos mecánicos normales (Fernandez, 2003).

Los lodos en las plantas de tratamiento de agua potable generalmente se obtienen luego de separar por métodos fisicoquímicos el agua de partículas presentes en el agua cruda que ingresa en las PTAP; concretamente se obtienen lodos de las etapas de floculación, sedimentación y filtración, en la única etapa que no se obtienen residuos de los lodos es en la coagulación. La disposición inadecuada de lodos produce en las aguas receptoras los siguientes efectos principales: los altos niveles de turbidez limitan la penetración de la luz solar en la columna de agua, lo que limita o impide el crecimiento de las algas y de las plantas acuáticas enraizadas, y los altos niveles de sedimentación en los ríos dan lugar a la perturbación física de las características hidráulicas del cauce. Ello puede tener graves efectos en la navegación, por la reducción de la profundidad, y favorecer las inundaciones, por la reducción de la capacidad del flujo de agua en la cuenca de drenaje. (Ongley, 1997)

Las propiedades de los lodos producidos en las plantas de tratamiento pueden llegar a ser variables dependiendo de la calidad del efluente ya que la calidad va ligada al cuerpo de agua y este a su vez está muy condicionado por el medio, las condiciones meteorológicas y muchos factores más, tanto antropológicos aguas arriba como factores antrópicos de la cuenca donde se hace la captación, a menudo se consideran inactivos o inertes debido a que contienen microorganismos, arcillas, partículas en suspensión, coloides, materia orgánica y arenas (Gutiérrez & Ramírez, 2014).

Estos lodos están compuestos principalmente por materias que estaban presentes en el agua bruta y que por el efecto de la oxidación, coagulación y precipitación son retenidas en las unidades de sedimentación y filtración; así como otros reactivos que en ocasiones se emplean en el tratamiento como la cal, permanganato y carbón. (Sastoque Perilla, 2015)

Las características de los lodos residuales varían generalmente con la calidad del agua cruda tratada, origen, tecnología de tratamiento, tipo y cantidad de elementos químicos empleados, de forma tal que es difícil establecer una composición definitiva para estos; razón por la cual una caracterización de acuerdo con la naturaleza fisicoquímica y microbiológica se hace de suma importancia con el fin de poder establecer los métodos y equipos más apropiados para su tratamiento. (Torres Rodríguez, 2013)

En Colombia se tiene reglamentación sobre el manejo de estos residuos (Decreto 3930 del 2010), los cuales pueden catalogarse como residuos especiales pero estas reglamentaciones no se cumplen a cabalidad dado que los desechos provenientes de las PTAP, en su gran mayoría desembocan nuevamente en el cauce de donde se toma el agua cruda, debido al incumplimiento de las normas las empresas prestadoras de servicios pagan una remuneración al Estado Colombiano por la contaminación que hace de los cauces naturales llamado “Tasa Retributiva”.

El tratamiento de lodos tiene como objetivo principal la reducción del volumen de lodos generados en las plantas potabilizadoras, ya que esto facilita las operaciones de transporte y disposición final. Los métodos usados incluyen acondicionamiento, espesamiento y deshidratación

6.2.1 Acondicionamiento Químico

El acondicionamiento de lodo es un procedimiento que se realiza con el único fin de mejorar las características de espesamiento y deshidratación de este; uno de los métodos más usados es el acondicionamiento químico, el cual es un procedimiento que da como resultado la coagulación de los sólidos y la liberación del agua absorbida. En el acondicionamiento químico hay dos aspectos muy importantes que se deben tener en cuenta: la dosificación y la mezcla de lodos.

Dado que el acondicionamiento de los lodos se deriva de un tratamiento químicos con ayudantes de floculación, polímeros o polielectrolitos, se entrará en contexto con los polímeros que son los agentes encargados de realizar el apelmazamiento de las partículas sedimentables, estos luego de su activación en solución acuosa con un tiempo suficiente para que sus cadenas de monómeros se estiren lo más posible, posteriormente se añaden a un ciclo de mezcla, floculación y sedimentación con el agua o lodo a tratar para realizar la remoción de partículas presentes en el agua cruda o lodo.

Los polímeros son usados extensamente en el acondicionamiento de los lodos y existe una gran variedad en el mercado. Estos materiales difieren grandemente en su composición química,

efectividad funcional y costo efectivo. Las razones para el uso de polímeros en lugar de químicos inorgánicos acondicionadores son consideradas a continuación:

- Mejora la eficiencia en el desagüe.
- Produce una cantidad menor de masa adicional, ya que los acondicionadores inorgánicos generalmente aumentan la masa del lodo de 15 a 30%.
- Los polímeros no reducen el valor de combustible, esto en el caso que el lodo final vaya a ser usado como combustible para incinerador.
- El polímero permite una operación de manejo de materiales más limpia; y el polímero reduce los problemas operacionales y de mantenimiento. (Torres Rodríguez, 2013)

La selección del polímero se debe tener en constante monitoreo dada la propiedad cambiante del agua para este fin se debe tener un equipo de jarras que se encargue de definir dosis óptimas a ciertos intervalos de tiempo no muy prolongados.

Los polímeros funcionan gracias a que poseen altos pesos moleculares, cadenas largas de monómeros y algunas de ellas se disocian en el agua formando iones, lo cual facilita la absorción de partículas en las cadenas del polímero o por la neutralización de carga o el cambio de cargas dependiendo de la naturaleza del polímero. (Almeida Naranjo, 2015)

6.2.1.1. Clasificación de los Polímeros

Al utilizar un polímero catiónico, éste neutraliza las cargas negativas de los coloides y anula el potencial zeta, por el contrario, un aniónico y un no iónico no anulan las cargas. Sin embargo, existe una adsorción de radicales activos de la cadena del polímero sobre las partículas, creándose una modificación en su superficie y en el potencial zeta, produciéndose una aglomeración mediante un mecanismo de reticulación. (Sandoval Yoval, Montellano Palacios, Piña Soberanis, & Sanchez Guzman, 2015).

Polímeros Naturales:

Estos polímeros se extraen de una fuente natural como lo son animales o plantas los cuales muestran un muy buen comportamiento como agente floculador en las PTAP'S.

Polímeros Sintéticos:

Estos polímeros se forman por la polimerización de monómeros como la acrilamida, el ácido acrílico y el cloruro de aciloxi-etil-trimetil-amonio, en el mercado el 95% de floculantes están formados de estos.

Generalmente poseen en su estructura cargas eléctricas en los grupos ionizables y el alto peso molecular los capacita para arrastrar partículas disueltas en el medio.

Polímeros Minerales:

Entre estos polímeros la más conocida es la Sílice activada o agentes adsorbentes calificadas como arcillas, carbonato calcio o carbón activado.

6.2.1.2 Carga eléctrica de los polímeros

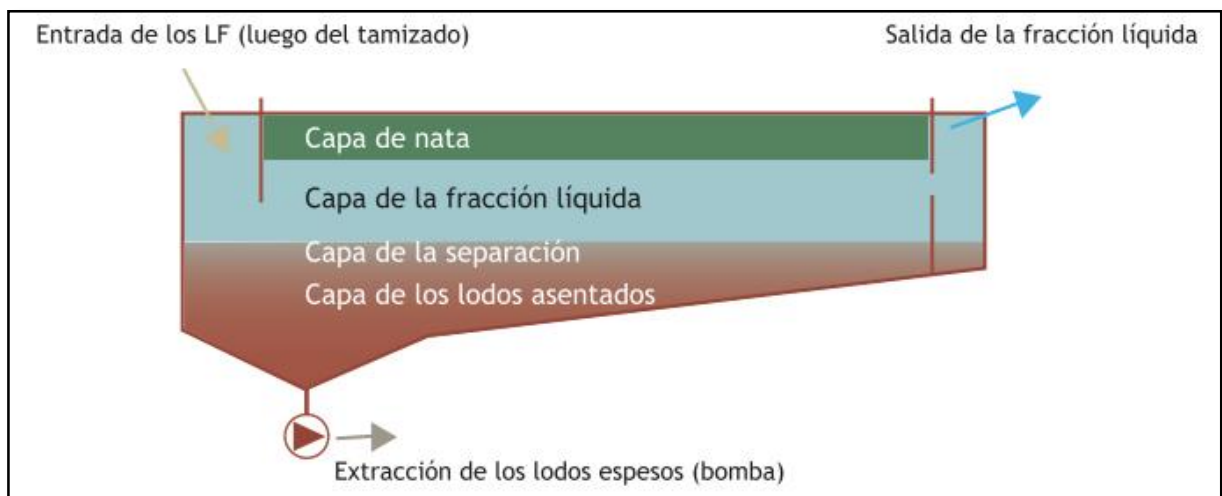
Se clasifican generalmente por la carga eléctrica que poseen independientemente de donde han sido extraídos o su procedencia es decir si son minerales, naturales o sintéticos y según su carga se clasifican de la siguiente manera: catiónicos, aniónicos y no – iónicos.

- Los polímeros catiónicos tienen una alta carga positiva dada para muchos de ellos por los iones cuaternarios de amonio que hacen parte de su estructura química.
- Los polímeros aniónicos son acrilamidas o ácido acrílico o polisacáridos sulfatados
- Los no – iónicos son gomas, derivados de celulosa o gelatinas. (Almeida Naranjo, 2015)

6.2.2 Espesamiento

Las partículas que se acumulan en el fondo del tanque se comprimen mediante un proceso llamado espesamiento, el cual funciona debido al peso de las partículas que se encuentran encima, ya que dicho peso exprime el agua e incrementa la concentración de sólidos. Es un resultado de la gravedad y se presenta cuando la concentración de sólidos suspendidos es alta y las fuerzas entre las partículas impiden su movimiento individual. Una importante consideración en el diseño de estos tanques es dejar suficiente espacio para el almacenamiento de los lodos, que reducen, en efecto, la profundidad del tanque que esté disponible para sedimentación adicional (Ver figura 3). También influye en el diseño de las operaciones, el mantenimiento y el cronograma de la extracción de lodos. (Bassan, 2014). En la tabla 1 se presentan las ventajas y desventajas del espesamiento de lodos.

Figura 3. Esquema de las capas en un tanque de espesamiento.



Fuente: Bassan, 2014

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de espesamiento.

| Ventajas | Desventajas | Aplicabilidad |
|---|--|---|
| <p>El Producto final es un lodo con muy buena consistencia debido a la compactación sufrida.</p> <p>Se obtiene un lodo más concentrado facilitando mucho la deshidratación de este e inclusive puede llegar a facilitar el transporte y dependiendo de la calidad del lodo se puede usar para aplicar en terrenos.</p> <p>Mejora la calidad del agua clarificada por tanto también mejora en gran manera la suspensión asentada en el fondo o el lodo depositado y al descargar el agua clarificada a un cuerpo receptor no se altera en gran medida.</p> | <p>Se debe implementar el uso de polímeros los cuales forman flóculos más grandes y potencian el espesamiento por gravedad y también aumentan su velocidad de precipitación.</p> <p>En relación costo beneficio no se recomienda para plantas que no tengan flujo de lodo abundante ya sea por la calidad del efluente o por la cantidad de agua tratada.</p> <p>Se está condicionado al tiempo ya que los polímeros son los encargados de optimizar la compresión de los lodos</p> <p>Se debe tener en cuenta que las altas concentraciones de hidróxidos de magnesio reducen el secado de los lodos.</p> | <p>Es de un rango medio ya que se necesitan operarios capacitados para manejar este tipo de procesos y se debe implementar insumos nuevos (polímeros) para realizar un buen espesamiento.</p> |

Fuente: Autores

6.2.2.1 Tecnologías de espesamiento:

Las tecnologías que más se han implementado en el tratamiento de lodos provenientes de plantas potabilizadoras son las siguientes:

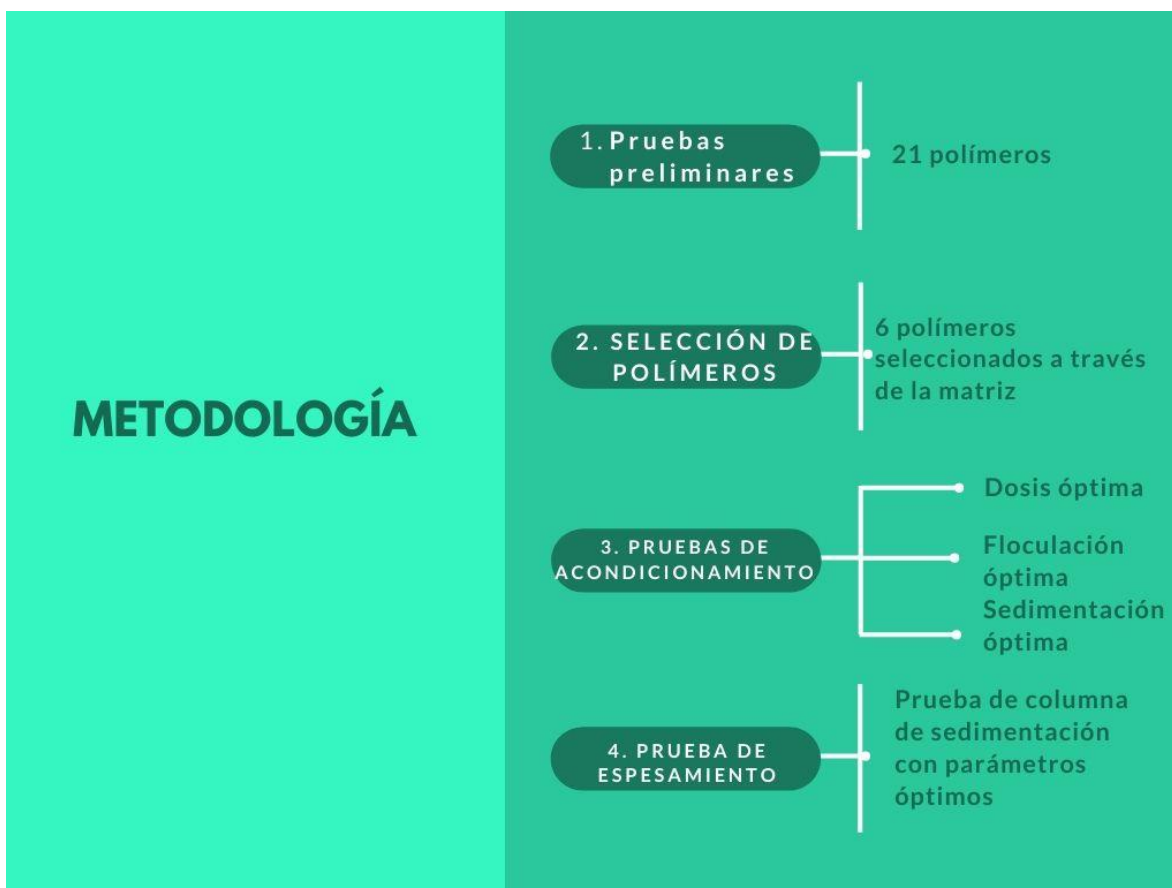
Tabla 2: Ventajas y Desventajas de las Diferentes Metodologías de Espesamiento de Lodos.

| Método | Ventaja | Desventaja |
|------------------------------------|--|---|
| Gravedad | <ul style="list-style-type: none">- Simple.- Bajos costos de operación no requiere mucha atención de parte del personal- Idóneo para la sedimentación rápida de lodos densos y brinda almacenamiento y espesamiento. | <ul style="list-style-type: none">- Se debe implementar el uso de polímeros |
| Flotación por aire Disuelto | <ul style="list-style-type: none">-Funciona sin químicos con cargas específicas.- Los equipos usados son simples. | <ul style="list-style-type: none">- Las concentraciones de los lodos son precarias.- se necesita una disposición considerable de espacio con respecto a otro tipo de mecanismos- requiere atención moderada de personal.-Se necesita adicionar polímeros para agilizar y optimizar el proceso. |
| Acondicionamiento | <ul style="list-style-type: none">- Disminuye el porcentaje de agua- Bajos costos de capital-Consumos de energía relativamente bajos- La alta captura de sólidos puede ser fácilmente confinada | <ul style="list-style-type: none">- Dependiente de polímeros-Sensible al tipo de polímero-Es necesario acondicionar para conseguir un 20 o 30 % de sólidos.- Requiere de atención moderada por parte de los operarios |

Fuente: Hazen, Sawyer, & Nippon Koei, 2011

7. METODOLOGÍA

Figura 4. Metodología utilizada en el proyecto



7.1 Sitio de muestreo

El trabajo se realizó utilizando lodos de la PTAP Bosconia, que se encuentra ubicada en la vía que conduce de Bucaramanga a Matanza, entre las cotas topográficas 685 y 675 metros sobre el nivel del mar. La planta cuenta con una capacidad de 2000 L/s, y es de tipo convencional con tanques desarenadores, presedimentadores, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación, filtración y desinfección. Actualmente, la planta posee un sistema de pretratamiento que involucra los procesos necesarios para realizar la remoción de cianuro y mercurio como son la pre-cloración, la adición de ayudante de floculación y carbón activado, además cuenta con un laboratorio en donde se monitorea con una frecuencia horaria los factores fisicoquímicos de interés como el oxígeno disuelto, pH,

conductividad, entre otros. La PTAP Bosconia brinda el servicio de agua potable al 30% del Área metropolitana de Bucaramanga, alrededor de 237.000 suscriptores al servicio. (AMB, 2017)

La PTAP Bosconia no cuenta con tratamiento de lodo que son generados en el proceso de potabilización del agua, razón por la cual surgió la necesidad de construir una planta de tratamiento de lodos. El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga en su primer informe para el estudio y diseño del sistema de extracción y conducción de lodos de la PTAP Bosconia hasta la planta de lodos, determinó los promedios anuales de turbiedades y caudales para un periodo comprendido entre el año 2006 y 2009. El balance encontrado fue: Turbiedad y caudal promedio anual de 126,43 UNT y 471,08 L/s, respectivamente. (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2010). Teniendo en cuenta esta cantidad de lodos que se producen es necesario construir un tratamiento de lodos que mitigará el impacto al cauce donde se desaguan los lodos.

7.2 Selección de los polímeros

Para la selección de los polímeros se tuvieron en cuenta inicialmente tres factores importantes: peso molecular, naturaleza del polímero (aniónico, no iónico y catiónico) y, por último, la vida útil de la solución de polímero preparado. Se recibieron 21 polímeros descritos en la tabla 3, de diferentes fabricantes y también de diferente naturaleza; se realizaron pruebas preliminares de dosis óptima para conocer el comportamiento de cada polímero tanto en preparación de este como en la evolución en las pruebas de jarras, para visualizar la dosis más conveniente de cada polímero. Una vez realizadas las pruebas, se descartaron polímeros que no se ajustaban a los parámetros definidos, arrojando como resultado la selección de 6 polímeros. En la tabla 4 se presenta la matriz implementada para la selección de los polímeros, estas pruebas fueron realizadas a dos diferentes tipos de muestra.

Tabla 3. Polímeros suministrados por diferentes empresas a través del AMB

| Polímero | Naturaleza | Peso molecular |
|-----------------|---------------------|-----------------------|
| EXRO 651 | Levemente Catiónico | Alto |
| EXRO 653 | Medio Catiónico | Alto |
| EXRO 656 | Catiónico Alto | Alto |

| | | |
|------------------|-----------|------------|
| EXRO 663 | Aniónico | Muy Alto |
| PQP 2174 | Catiónico | Muy Alto |
| SNF 4190 | Catiónico | Alto |
| SNF 934 | Aniónico | Ultra Alto |
| SQ C492 | Catiónico | Alto |
| SQ C494 | Catiónico | Alto |
| SQ C 496 | Catiónico | Alto |
| SQ C498 | Catiónico | Alto |
| SQ A130 | Aniónico | Alto |
| SQ A130 HMW | Aniónico | Muy Alto |
| SQ A110HMW | Aniónico | Muy Alto |
| SQ C492HMW | Catiónico | Muy Alto |
| SQ C494HMW | Catiónico | Muy Alto |
| SQC496HMW | Catiónico | Muy Alto |
| SQ C498HMW | Catiónico | Muy Alto |
| Praestol 2500 TR | No iónico | - |
| Praestol 851 TR | Catiónico | - |
| Praestol 2530 | Aniónico | - |

Tabla 4. Matriz para selección de polímeros

| Polímeros | Tiempo de Agitación (min) | | | | | Tiempo Preparado (días) | | | | | Compactación | | | | | Adherencia | | Presencia de Grumos en la solución acuosa | | Puntaje |
|-----------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|---------------------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|---------------|---|---------------|---------|
| | 0-15 (5 pts) | 15-30 (4 pts) | 30-45 (3 pts) | 45-60 (2 pts) | 60-90 (1 pts) | 0-1 (1 pts) | 1-7 (2 pts) | 7-15 (3 pts) | 15-30 (4 pts) | 30-45 (5 pts) | Muy alta (5 pts) | Alta (4 pts) | Media (3 pts) | Baja (2 pts) | Muy baja (1 pts) | Sí (1 pts) | No (5 pts) | Sí (1 pts) | No (5 pts) | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

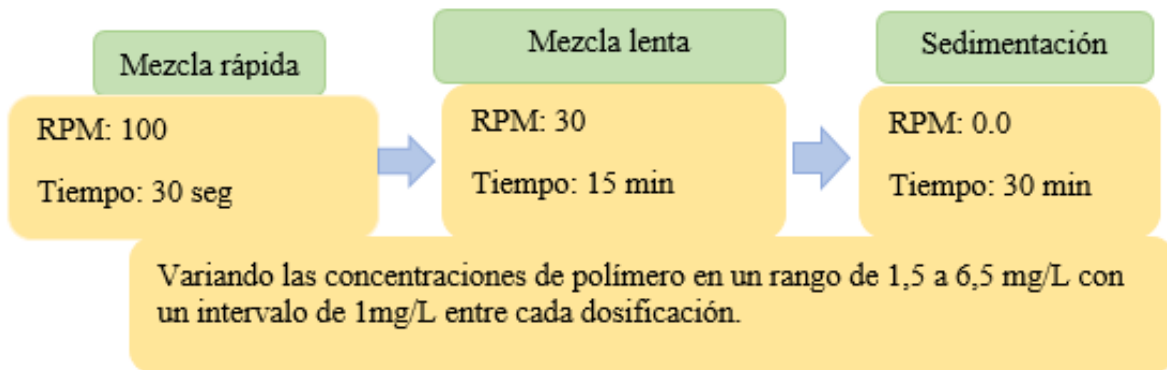
7.3 Prueba de Acondicionamiento Químico del Lodo

Para realizar el acondicionamiento químico del lodo se trabajó con los 6 polímeros seleccionados.

Cada polímero requería un tiempo de activación (entre 60-90 minutos de agitación continua) antes de realizar las pruebas para estirar las cadenas del polímero.

Las pruebas de acondicionamiento químico se realizaron por medio de la prueba de jarras en un equipo marca PHIPPS & BIRD con un volumen útil de 1L. Inicialmente se realizaron pruebas de dosis óptima de polímero y los parámetros que se utilizaron en estas pruebas para la agitación se presentan en la figura 6.

Figura 5. Condiciones de mezcla en la determinación de dosis óptima

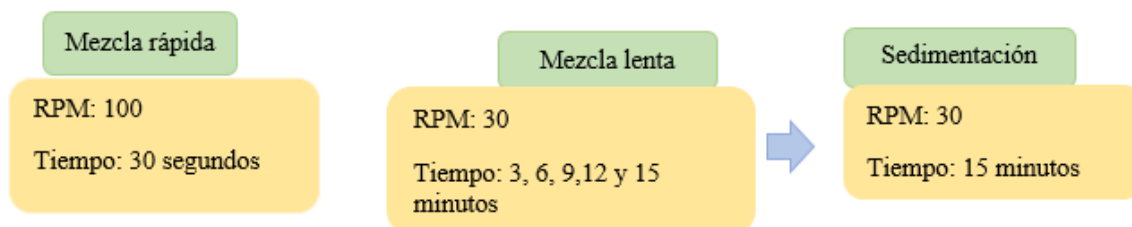


Cada jarra se llenó con 1 L de muestra homogenizada de lodo, se agregaron las diferentes dosis de polímeros. Una vez culminó la fase de sedimentación, se midió la turbiedad de cada jarra; el valor menor de turbiedad que arrojó fue el que se consideró como dosis óptima.

7.4 Parámetros óptimos para pruebas de acondicionamiento

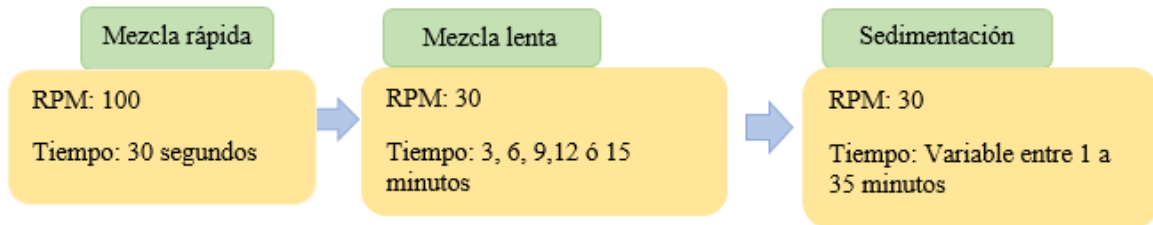
Una vez hallada la dosis óptima para cada polímero, se determinaron los parámetros óptimos para las pruebas, entre los cuales se tienen: tiempo óptimo de floculación, tiempo y velocidad de sedimentación. Para determinar el tiempo óptimo de floculación, se utilizó 1 L de muestra de lodo y se agregó la dosis óptima en las 6 jarras. Las condiciones de mezcla se presentan en la figura 5.

Figura 6. Parámetros óptimos de floculación o mezcla lenta



Finalmente, para el tiempo de sedimentación óptimo se utilizó la dosis óptima haciéndolo por triplicado. Se procedió a medir la turbiedad en los intervalos de tiempo 1 a 5 min cada minuto, luego a los 10,15, 25 y 35 minutos respectivamente; el valor de menor turbiedad promedio de todos los tiempos medidos fue el que se consideró como el tiempo de sedimentación óptimo.

Figura 7. Parámetros para el acondicionamiento: Sedimentación óptima



Para realizar el cálculo de la velocidad de sedimentación se tuvo en cuenta la altura a la que se encuentra el orificio de las jarras para la extracción de muestras, la cual es de 7 cm y los tiempos en que se tomaron las muestras.

$$V_s = d/t$$

7.5 Pruebas de espesamiento

Una vez conocidos los parámetros óptimos de las pruebas de acondicionamientos, se realizó la prueba de jarras con dosis óptima, parámetros de floculación y sedimentación óptimos, para cada uno de los 6 polímeros escogidos para el espesamiento. Se utilizaron dos jarras por polímero y posterior a las pruebas de acondicionamiento, el lodo fue transferido a columna de sedimentación con capacidad de 1000 mL (40 cm de altura y 7 cm de diámetro) como se muestra en la Figura 7.

Figura 8. Columna de vidrio (1 L)



Una vez se transfirió la muestra de lodo acondicionado se agitó la columna durante 30 segundos. Para conocer qué velocidad de sedimentación presentaba el lodo acondicionado vs el lodo crudo. Se utilizaron tiempos medidos en segundos de 5 a 60 segundos cada 5 segundos, luego cada 60 segundos hasta cumplidos los 600 segundos y finalmente de 1200 hasta 1800 segundos. Midiendo alturas a medida que el tiempo transcurría.

Las velocidades y las curvas obtenidas de las pruebas de espesamiento realizadas a cada uno de los polímeros en la columna de sedimentación por duplicado se obtuvieron de la siguiente manera: Las velocidades se obtuvieron basados en su definición $v = \Delta r / \Delta t$ distancia sobre tiempo. El cambio de posición se determinó midiendo la altura de la interfaz en una columna volumétrica y el tiempo se midió con un cronómetro de precisión Casio.

Las curvas se obtuvieron graficando en las ordenadas la altura de la interfaz y en las abscisas el tiempo (ver gráficas 16-20).

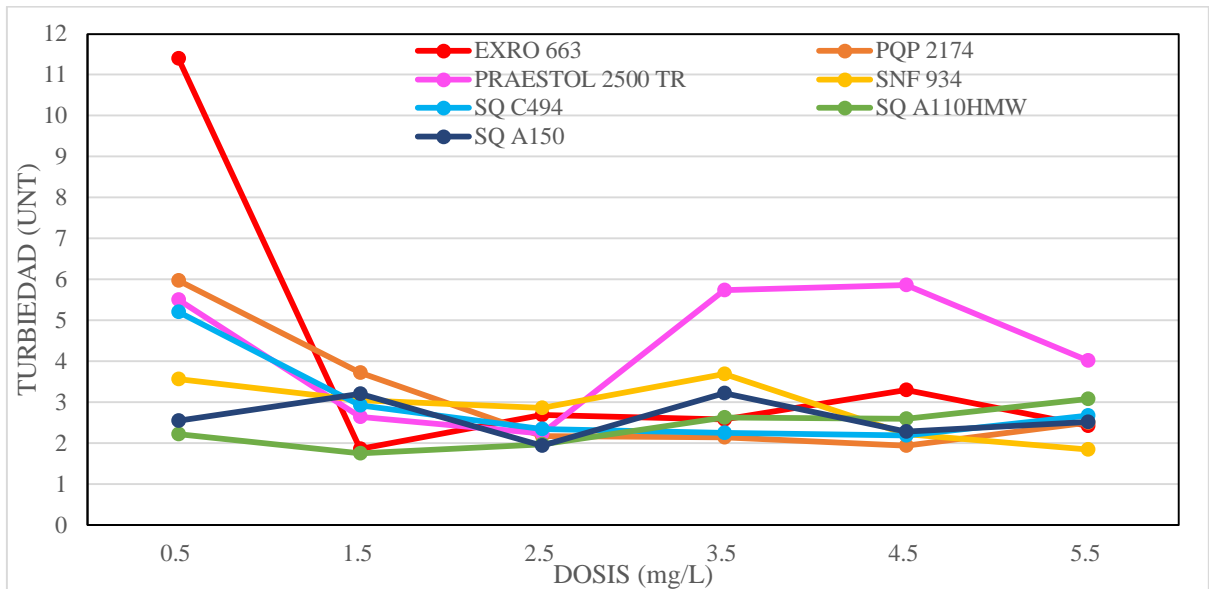
Finalmente, el lodo antes y después del espesamiento fue caracterizado en función de los sólidos suspendidos fijos, volátiles y totales, de acuerdo con los métodos estándar (Rice, Baird, Eaton, & Clescerl, 2015).

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

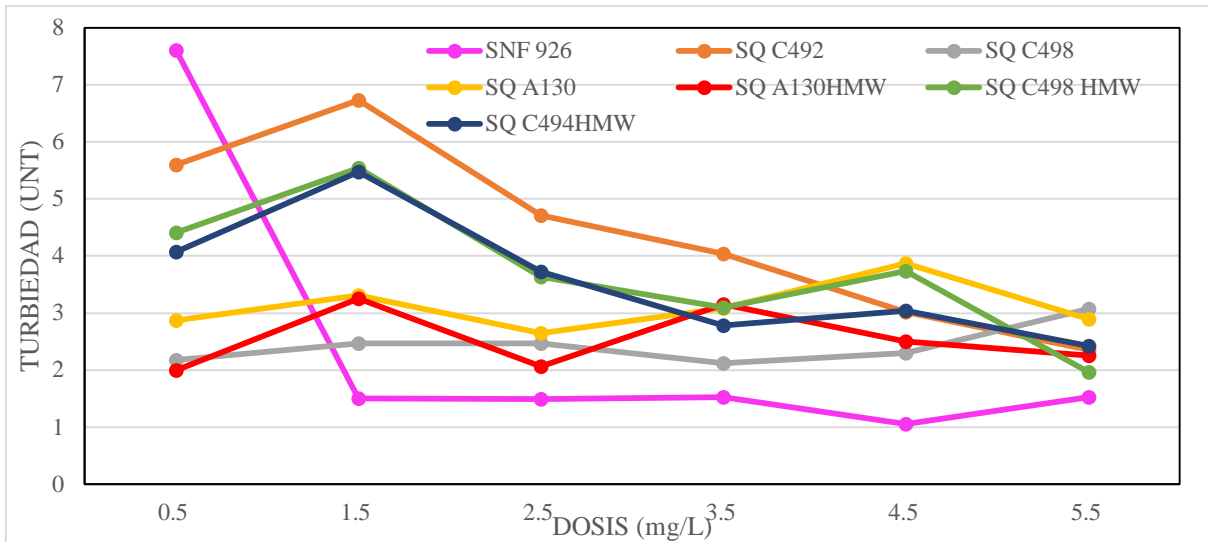
8.1 Selección de Polímeros

Se presentan los resultados obtenidos en las pruebas preliminares realizadas a 21 polímeros, para determinar cuales se usarían en la pruebas de acondicionamiento y espesamiento del lodo proveniente de la PTAP Bosconia. Las muestras captadas para este estudio tenían unas condiciones iniciales las cuales eran, una turbiedad inicial mayor de mil unidades nefelométricas, pH de entre 5,62 a 6,92 unidades y temperatura entre 26 y 27 °C; para estas pruebas se utilizó un solo muestra para los 21 polímeros, es decir se realizó una sola prueba para cada uno de los polímeros.

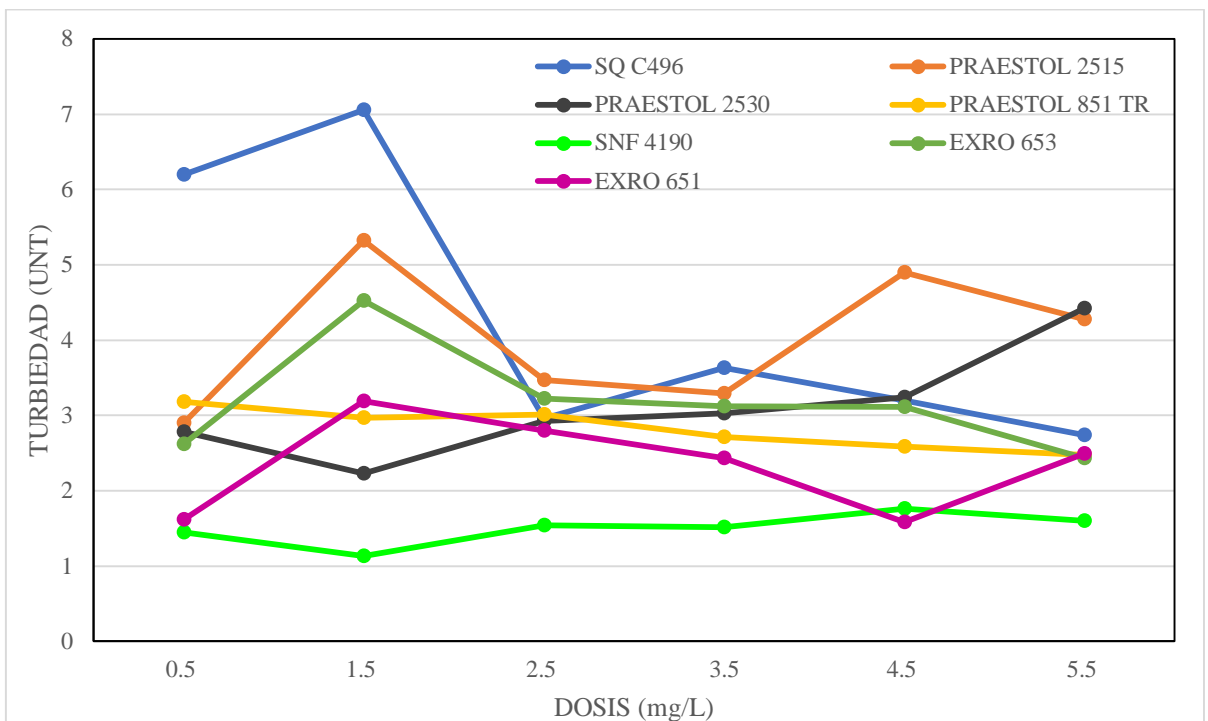
Gráfica 1. Pruebas preliminares de Dosis óptima



Gráfica 2. Pruebas preliminares de dosis óptima



Gráfica 3. Pruebas preliminares de dosis óptima



Tomando como punto de partida la turbiedad inicial de 1000 UNT de la muestra de lodo, se puede observar que la mayoría de los polímeros presentan una turbiedad residual inferior a 6 UNT con la dosis de 0,5 mg/L, evidenciando así la efectividad de los polímeros en la disminución de turbiedad

del lodo. Los únicos polímeros que no llegaron a esos valores en la primera dosis suministrada fueron EXRO 663 y SNF 926 de naturaleza aniónica y peso molecular muy alto; no obstante, al aumentar la dosis inmediatamente llegan a arrojar valores de 1,50 UNT y 1,76 UNT respectivamente. Estos resultados son inusuales por la naturaleza del polímero, ya que generalmente las muestras de lodos poseen cargas negativas y estos polímeros son anicónicos, sin embargo, existe un proceso adicional entre muestras de lodo y polímeros con la misma carga, en el cual ocurre una adsorción de radicales activos de la cadena del polímero sobre las partículas, creándose una modificación en el potencial zeta.

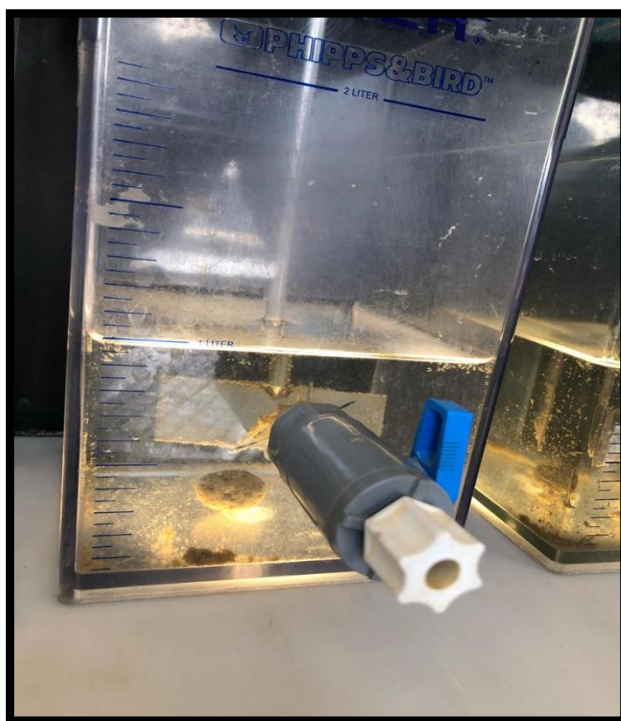
Los polímeros de la empresa EXRO se caracterizaron por tener un tiempo de preparación convencional, es decir entre 60-90 minutos de agitación continua; pero al culminar su preparación la mitad de estos presentaron grumos. Por otra parte, los polímeros de la empresa SNF tenían un tiempo de vida útil corto, de 1 día; después de ser preparado, aun así, tenían un desempeño bueno a la hora de disminuir la turbiedad; los polímeros de la empresa Sulfoquímicas y EXRO tienen un tiempo de vida útil preparado en solución acuosa de 7-15 días, lo cual es destacable para el polímero. Finalmente, los polímeros con más durabilidad de preparado son los de la empresa PRAESTOL, que tienen hasta un tiempo de vida útil de 30 días sin perder sus propiedades.

La disminución más evidente se dio con el polímero SNF 4190, de naturaleza catiónica y de peso molecular alto, con el cual se obtuvo turbiedades inferiores de 2 UNT con todas las dosis aplicadas. Un comportamiento similar se tuvo con el polímero PRAESTOL 851 TR, de naturaleza catiónica y peso molecular alto, que para todas las dosis evaluadas se obtuvo una turbiedad alrededor de las 3 UNT, es decir que eventualmente el polímero pudo haber tenido un funcionamiento óptimo a concentraciones inferiores, además en las concentraciones más bajas se evidenció la formación de una esfera de sedimentos en el medio y fondo de la jarra, es decir logra una buena compactación de sólidos.

También se evidencia que el polímero SNF 926, de naturaleza aniónica y de peso molecular ultra alto, obtuvo una remoción más alta que los demás polímeros, a pesar que no descendió la turbiedad en la concentración de 0.5 mg/L, a partir de la concentración de 1.5 mg/L mantuvo valores de turbiedad muy bajas hasta lograr 1 UNT; en las pruebas se obtuvo presencia de precipitado en cada una de las jarras, sin embargo en donde se logró remover mayor turbiedad se evidenció formación de esferas compuestas de sedimento. Con respecto a los polímeros SQ C492, SQ C498HMW, SQ C494HMW, SQ A 130, SQ A 130 HMW; el comportamiento fluctuó drásticamente por la naturaleza de los polímeros y no por la muestra tratada, ya que de los 5 polímeros mencionados anteriormente los primeros tres son catiónicos y los dos últimos son aniónicos y presentan comportamientos muy similares entre los polímeros de igual naturaleza (ver gráfica 2), pero es evidente que los de mejores resultados en remoción de turbiedad son los de naturaleza aniónica.

De todos los polímeros evaluados se destacaron PRAESTOL 2500 TR, el cual es de naturaleza No iónica y peso molecular alto, arrojando una turbiedad residual de 2,24 UNT en la concentración de 2,5 mg/L; SQ A110HMW de naturaleza aniónica y peso molecular muy alto, con una dosis optima de 1,5 mg/L arrojó 1,76 UNT; PRAESTOL 2530, de naturaleza aniónica y peso molecular alto, con 1,5 mg/L se obtuvo 2,23 UNT, EXRO 651 de naturaleza levemente catiónica y peso molecular alto, con una dosis optima de 4,5 mg/L dio 1,58 UNT; EXRO 653, de naturaleza aniónica y peso molecular muy alto, con 5,5 mg/L arrojó una turbiedad residual de 2,43 UNT y SNF 926 con una dosis optima de 4,5 mg/L se obtuvo 1,06 UNT, debido a que a la hora de agregar los polímeros actuaron inmediatamente (7 segundos aproximadamente) y en la fase de mezcla lenta presenta un alto nivel de aglomeración, que se terminó de complementar en la fase de sedimentación compactándose el lodo en el centro del fondo de cada una de las jarras como se observa en la Figura 9.

Figura 9. Jarra con la muestra floculada y sedimentada



A nivel de compactación, cabe resaltar que en los otros 15 polímeros se presentó una compactación leve y media, donde hubo presencia de sedimentos adheridos en las paredes de la jarra y en el aspa del equipo; además de una alta presencia de partículas suspendidas.

Para tomar una decisión final sobre los polímeros a elegir, se utilizó una matriz de selección donde se evaluaron factores como: el tiempo de preparación que varía entre 0-90 minutos, o sea lo que tarda cada uno de los polímeros en agitación continua en presencia de agua destilada para su activación; el tiempo que perdura preparado sin cambiar sus propiedades (varía en días), es decir el tiempo que después de ser activado el polímero en solución acuosa permanece estable para ser utilizado en las respectivas pruebas, a nivel de compactación cabe resaltar que en los otros 15 polímeros ensayados se presentó una compactación leve, donde hubo presencia de sedimentos adheridos a las paredes de la jarra y las aspas del equipo; además de una alta presencia de partículas suspendidas y no se generaron aglomeraciones de sedimentos en un solo punto del fondo de la jarra, por el contrario se encontraban dispersos, este factor se consideró muy importante, debido a que el interés de este

proyecto fue encontrar el mejor polímero para lograr la mejor compactación en un posterior espesamiento de la muestra de lodo acondicionado; el nivel de compactación se midió cualitativamente, es decir las jarras que presentaban una evidente diferencia entre el lodo apelmazado en el fondo de la jarra sin presentar partículas suspendidas en esta se consideraba satisfactorio. Otro aspecto evaluado en la matriz de selección fue la adherencia del lodo acondicionado en las paredes de la jarra o en las espas y, por último, la presencia de grumos en la preparación acuosa del polímero, lo cual afectaba la facilidad para tomar la dosis de la muestra madre con la jeringuilla. Los puntajes para evaluar el polímero que más se ajuste a las condiciones de las pruebas en cada categoría fueron 1-5 puntos; siendo el puntaje 1 el menos apropiado y el puntaje 5 el óptimo.

Finalmente, la matriz arrojó la selección de 6 polímeros dando puntajes de 21 como valor máximo y mínimo de 19 sobre 25 puntos posibles para la selección de estos. En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en la matriz de selección.

A manera de ejemplo se tomará el polímero SNF 926, el cual en el tiempo de preparación obtuvo una calificación de 3 puntos, ya que se debe agitar durante 30 minutos; en el tiempo preparado en días, obtuvo un punto debido a que solo dura un día preparado y después de un día pierde propiedades como la viscosidad, ya que se aumenta, presenta un olor fuerte luego de pasado un tiempo considerable. Por último, generó manchas de color oscuro cuando se almacena alrededor de una semana, en la compactación se relaciona el desempeño del polímero y en este caso el polímero obtuvo la máxima puntuación, ya que presentó muy buena compactación en forma de esfera en 5 de las 6 diferentes concentraciones (1,5 2,5 3,5 4,5 y 5,5 mg/L). En la adherencia, este polímero se destacó por no presentar flóculos aglutinados, ni en las paredes ni en las espas al momento en que se realizó la prueba. en el último ítem se evaluó el manejo al momento de dosificar con las jeringas y para este ítem el polímero en cuestión no presentaba grumos y su manejo es sencillo si se encuentra recién preparado.

Tabla 5. Matriz de Selección para los polímeros

| Polímeros | Tiempo de Agitación (min) | | | | | Tiempo Preparado (días) | | | | | Compactación | | | | | Adherencia | | Presencia de Grumos en la solución acuosa | | Puntaje |
|------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|------------------|--------------|---------------|--------------|------------------|------------|------------|---|------------|---------|
| | 0-15 (5 pts) | 15-30 (4 pts) | 30-45 (3 pts) | 45-60 (2 pts) | 60-90 (1 pts) | 0-1 (1 pts) | 1-7 (2 pts) | 7-15 (3 pts) | 15-30 (4 pts) | 30-45 (5 pts) | Muy alta (5 pts) | Alta (4 pts) | Media (3 pts) | Baja (2 pts) | Muy baja (1 pts) | Si (1 pts) | No (5 pts) | Si (1 pts) | No (5 pts) | |
| EXRO 651 | | | | X | | | | X | | | X | | | | | X | | | X | 20 |
| EXRO 653 | | | | X | | | | X | | | X | | | | | X | | | X | 20 |
| EXRO 656 | | | | X | | | | X | | | | X | | | X | | | X | | 10 |
| EXRO 663 | | | | X | | | | X | | | | X | | | X | | | X | | 10 |
| PQP 2174 | | | | | X | | X | | | | | | X | | X | | | X | | 7 |
| SNF 926 | | | X | | | X | | | | X | | | | | | X | | | X | 19 |
| SNF 4190 | | | | X | | X | | | | | | | X | | X | | | X | | 7 |
| SNF 934 | | | | X | | X | | | | | | | X | | X | | | X | | 7 |
| SQ C492 | | | | X | | | | X | | | | | X | | X | | | X | | 9 |
| SQ C494 | | | | X | | | | X | | | | | X | | X | | | X | | 9 |
| SQ C496 | | | | X | | | | X | | | | | | X | X | | | X | | 8 |
| SQ C498 | | | | X | | | | X | | | | | | X | X | | | X | | 8 |
| SQ A130 | | | | X | | | | X | | | | | X | | X | | | X | | 9 |
| SQ A130HMW | | | | | X | | | X | | | | | | X | X | | | X | | 7 |
| SQ A150 | | | | X | | | | X | | | | | | X | X | | | X | | 8 |
| SQ A110HMW | | | | | X | | | X | | X | | | | | | X | | | X | 19 |
| SQ C492HMW | | | | | X | | | X | | | | | X | | X | | | X | | 8 |
| SQ C494HMW | | | | | X | | | X | | | | | X | | X | | | X | | 8 |
| SQ C496HMW | | | | | X | | | X | | | | | X | | X | | | X | | 8 |
| SQ C498HMW | | | | | X | | | X | | | | X | | | X | | | X | | 9 |
| PRAESTOL 2500 TR | | | | X | | | | | X | X | | | | | | X | | | X | 21 |
| PRAESTOL 851 TR | | | | | X | | | | X | | | | X | | X | | | X | | 9 |
| PRAESTOL 2530 | | | | X | | | | | X | X | | | | | | X | | | X | 21 |
| PRAESTOL 2515 | | | | | X | | | | X | | | | | X | X | | | X | | 9 |

Se presenta la tabla 6 con los polímeros seleccionados mediante la matriz de selección, en donde se muestra el nombre del polímero, la naturaleza, el peso molecular, duración preparado en solución acuosa y por último el puntaje obtenido.

Tabla 6. Polímeros seleccionados

| Polímero | Naturaleza | Peso Molecular | Duración en solución acuosa | Puntaje |
|------------------|---------------------|----------------|-----------------------------|---------|
| Praestol 2500 TR | No iónico | Alto | 1 mes | 21 |
| Praestol 2530 | Aniónico | Muy alto | 1 mes | 21 |
| EXRO 651 | Levemente catiónico | Alto | 2 semanas | 20 |
| SNF 926 | Aniónico | Ultra Alto | 1 día | 19 |
| EXRO 653 | Medio catiónico | Alto | 2 semanas | 20 |
| SQ A110 HMW | Aniónico | Muy Alto | 2-3 semanas | 19 |

Para la selección de los polímeros se escogieron de diferente naturaleza, peso molecular similar (alto y muy alto), debido a que estos presentaron mayor aglomeración de lodo en la jarra y mayor compactación en el fondo de ésta, además se tenía poca presencia de partículas suspendidas y había escasa presencia de sedimentos adheridos en las paredes de las jarras y en el aspa del equipo. Las características de estos polímeros fueron suministradas por cada proveedor en su ficha técnica, donde se encontraba enunciado la presentación física en polvo granular blanco, densidad, tiempo de la solución acuosa preparada, tiempo de vida almacenado y a qué porcentaje se debe preparar, donde la mayoría tenían recomendación de prepararse al 0,5%.

8.2 Acondicionamiento químico

Inicialmente se realizaron pruebas de dosis óptima a cada uno de los polímeros seleccionados con dos muestras de lodos diferentes. Las dosis se seleccionaron de acuerdo con el comportamiento que tuvieron los polímeros en la fase preliminar. Posteriormente se realizó la prueba de floculación que consistía en determinar el tiempo óptimo en que el polímero actuaba en ciertos intervalos de tiempo.

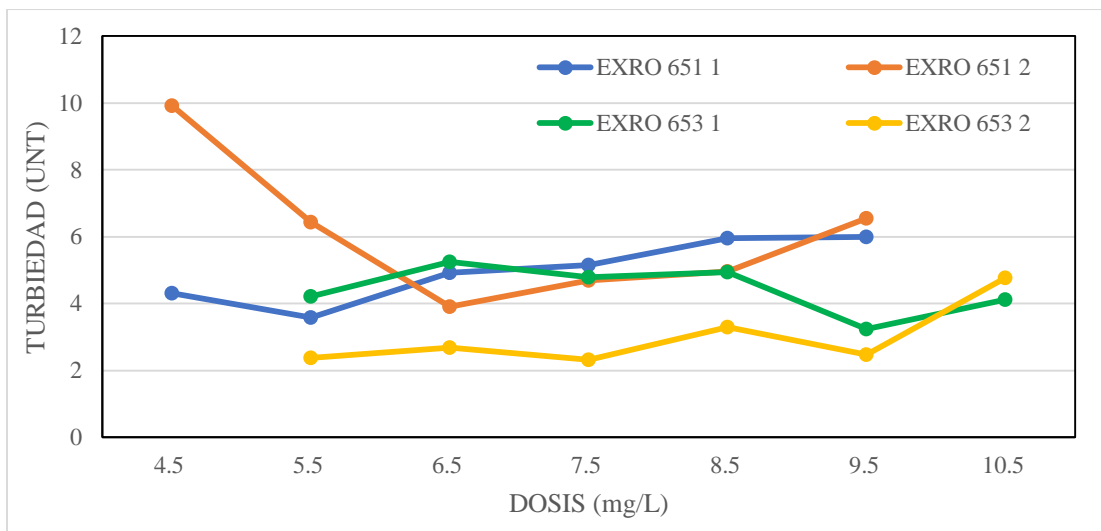
Finalmente se realizaron las pruebas de sedimentación óptima utilizando la dosis óptima y el tiempo de floculación determinado.

Las dos muestras de lodos utilizadas en estas pruebas presentaban características muy diferentes ya que en el primer muestreo la cantidad de sólidos presentes en el agua era baja y debido a esto la muestra se veía más clara comparándola con la del muestreo dos, que venía bastante cargada de sólidos y de color oscuro.

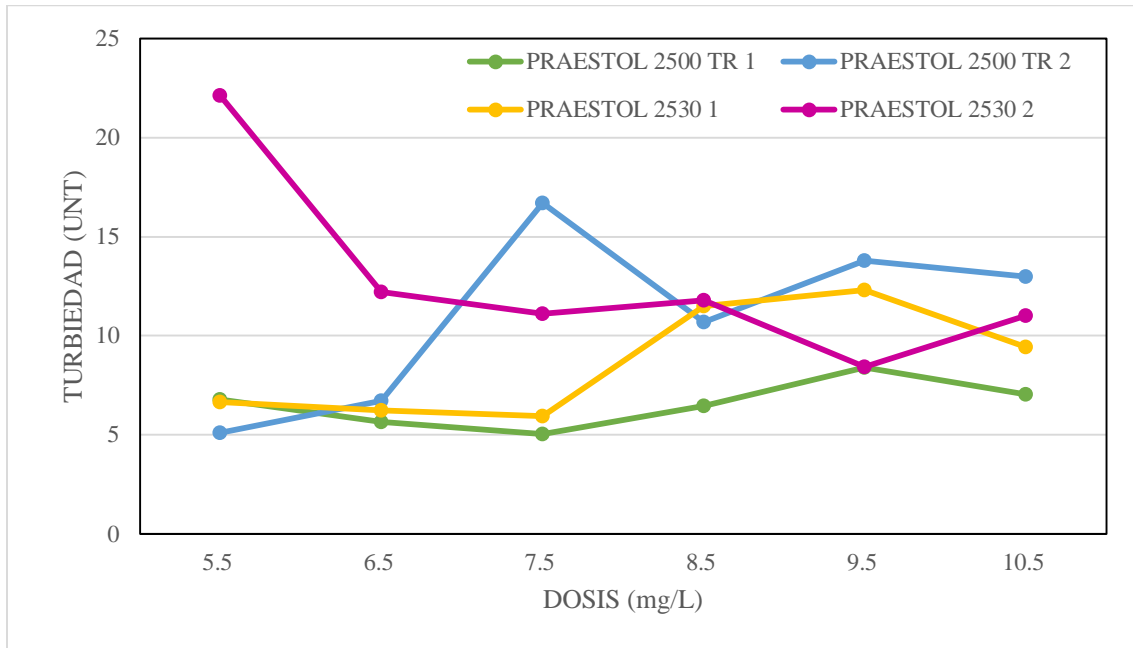
8.2.1. Dosis óptima

Se observan las gráficas de dosis óptima como parte inicial del acondicionamiento químico del lodo. Las gráficas se encuentran ordenadas por fabricante y en cada una se presentan los resultados para los dos muestreos realizados.

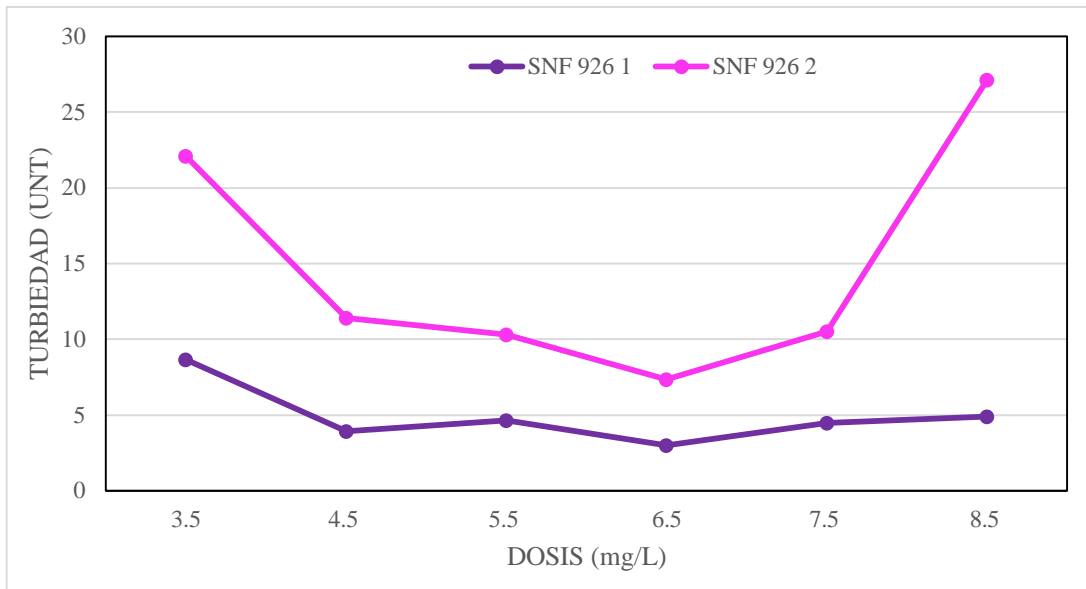
Gráfica 4. Dosis óptima polímeros EXRO



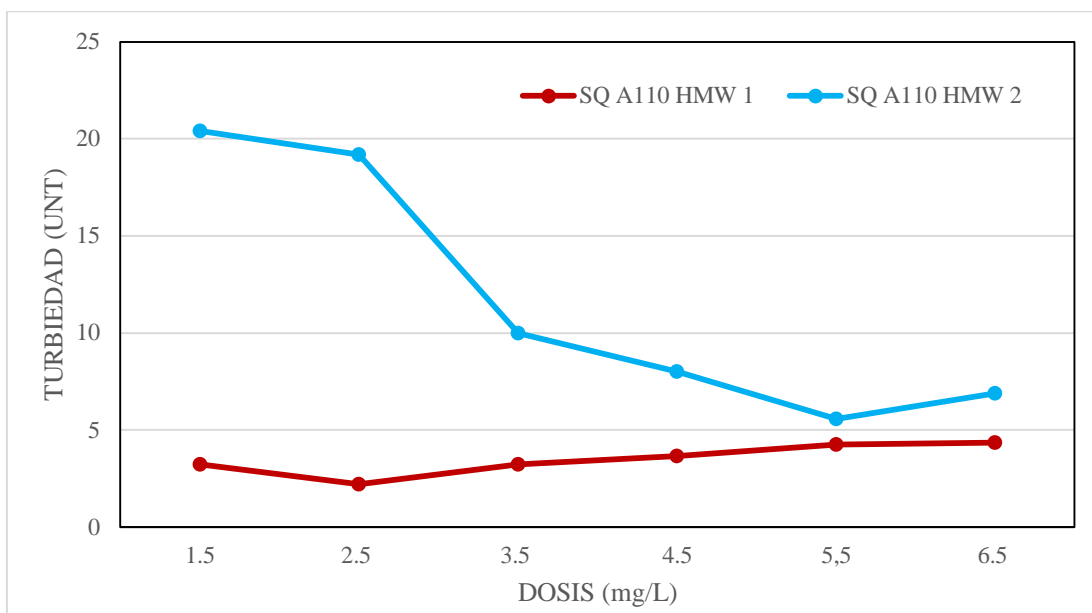
Gráfica 5. Dosis óptima polímeros PRAESTOL



Gráfica 6. Dosis optima polímero SNF



Gráfica 7. Dosis óptima polímero SQ



De acuerdo con la gráfica 4, el polímero EXRO 653 tuvo un comportamiento similar en los dos muestreos. La dosis óptima en el primer y segundo muestreo fueron 9,5 mg/L y 7,5 mg/L, respectivamente; sin embargo, con la aplicación de la dosis evaluada más baja (5,5 mg/L) se alcanzaron turbiedades residuales inferiores a 5 UNT, lo cual puede significar un ahorro importante en la cantidad de polímero a utilizar a escala real. El polímero EXRO 651 tuvo un comportamiento diferente en los dos muestreos. En la primera muestra arrojó un valor de 5,5 mg/L como dosis óptima obteniendo una turbiedad de 3,58 UNT, y en la segunda, para obtener resultados similares la dosis óptima fue de 6,5 mg/L, arrojando una turbiedad de 3,92 UNT. En la determinación de las dosis óptima de este polímero se debe tener especial cuidado, ya que al aplicar dosis superiores a la necesaria se observó que las turbiedades residuales se incrementan, lo cual puede atribuirse a una reestabilización de las partículas.

En la gráfica 5, se observa que las turbiedades residuales alcanzadas por los polímeros PRAESTOL fueron levemente superiores a las obtenidas con los EXRO presentando una diferencia de casi 10 UNT. Además, el comportamiento de los polímeros cambia con la muestra, por ejemplo, el polímero PRAESTOL 2530 obtuvo con la primera muestra, turbiedades residuales inferiores a 6 UNT con dosis

menores a 7,5 mg/L, mientras que, con la segunda muestra, la dosis óptima fue de 5,5 mg/L y con dosis superiores, la turbiedad residual se incrementó hasta alcanzar valores superiores a 15 UNT. En cuanto al PRAESTOL 2500 TR, la dosis óptima incrementó con la turbiedad inicial de la muestra, ya que para el primer muestreo con dosis entre 5,5 y 7,5 mg/L se alcanzaron turbiedades residuales inferiores a 6 UNT y con la segunda muestra (con mayor turbiedad inicial) fue necesaria una dosis de 9,5 mg/L para obtener valores de turbiedad residual alrededor de las 9 UNT.

En la gráfica 6 se puede observar que el polímero aniónico respondió bien en ambos muestreos, debido a que ayuda al proceso de entrecruzamiento de sólidos por medio de la cadena polimérica lo cual permite una sedimentación rápida ya que aumentan la consistencia de los coágulos, arrojando la dosis óptima en la concentración de 6,5 mg/L para ambos muestreos, dando valores aceptables comparados con la turbiedad inicial de más de 1000 unidades nefelométricas. Cabe resaltar que no se llegó a medir con exactitud la turbiedad inicial de la muestra debido a que esta superaba las capacidades de los equipos utilizados.

En la gráfica 7 se puede observar que la dosis del polímero varía con la turbiedad o la cantidad inicial de sólidos, ya que en el muestreo 1, en el cual se tuvo menor turbiedad, la dosis de polímero necesaria para disminuir la turbiedad fue baja, sin embargo, en el muestreo 2, se necesitaron dosis más altas de polímero para alcanzar una turbiedad residual baja. De acuerdo con los resultados, el polímero SQ A110 AMW fue el que arrojó dosis óptimas más bajas con las muestras evaluadas, ya que con la muestra uno se alcanzaron valores de turbiedad residual inferiores a 5 UNT con la dosis de 1,5 mg/L y con la muestra dos, se obtuvo una dosis de 5,5 mg/L.

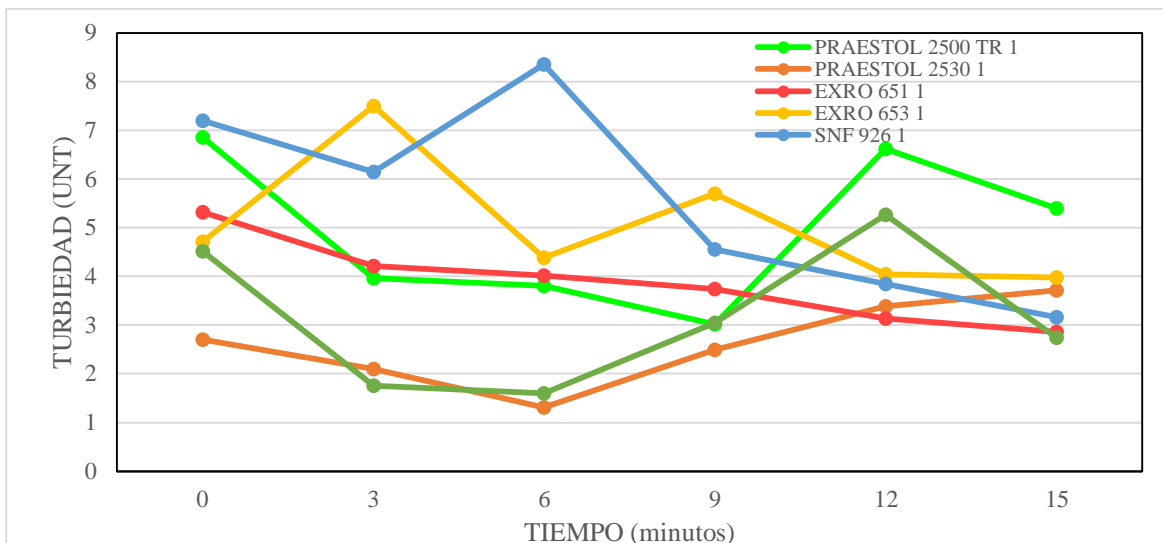
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con todos los polímeros, la elección del polímero más adecuado estará influenciado por el factor económico, ya que las dosis óptimas y las turbiedades residuales obtenidas con las muestras evaluadas son similares.

Se obtuvieron remociones altas algunas por debajo de 2 UNT esto hace que el agua clarificada producto del acondicionamiento del lodo es de muy buena calidad. Según un estudio realizado por Diana Romero de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, al implementar polímeros para impulsar la remoción de turbiedad y disminución de color en agua cruda proveniente de la reserva de Chingaza se pueden obtener resultados menores a 1 UNT lo cual lo hace cumplir con la resolución 2115 de 2007 con la que rigen la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá.

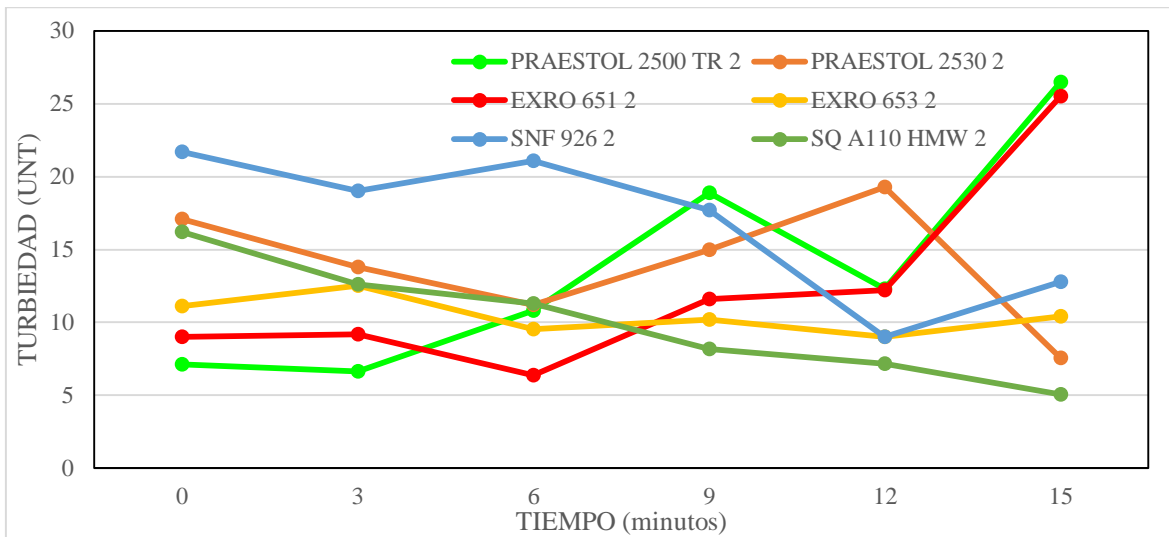
8.2.2. Floculación Óptima

Posteriormente a las pruebas de dosis óptima, se realizaron pruebas para determinar el tiempo de floculación utilizando la misma velocidad para cada polímero, la cual fue de 30 rpm. Se presentan las gráficas dónde se muestran los resultados obtenidos en la pruebas de floculación óptima para los dos muestreos realizados como segunda parte del acondicionamiento químico del lodo. En las gráficas se etiquetan los polímeros con un número después del nombre indicando si pertenecen a los resultados provenientes del primer o segundo muestreo.

Gráfica 8. Floculación optima primer muestreo



Gráfica 9. Floculación óptima segundo muestreo



De acuerdo a los resultados se observa que con la segunda muestra evaluada, la cual tenía una mayor turbiedad inicial, se obtuvieron valores de turbiedad residual un poco más altos que con la primera muestra y en algunos casos fue necesario más tiempo de floculación. Con la primera muestra de lodo, se observa que en el caso del PRAESTOL 2500 TR, el cual posee una naturaleza no iónica, se obtienen mejores resultados en la reducción de turbiedad, alcanzando valores inferiores a 4 UNT, para los tiempos de floculación inferiores a nueve minutos; con la segunda muestra de lodo, el tiempo óptimo de floculación fue de 3 minutos con una turbiedad residual de 6,6 UNT. En los dos casos, al incrementar el tiempo de contacto, la turbiedad residual se incrementa levemente debido a que se genera re-suspensión de partículas si se continúa con la agitación. Resultados similares se obtuvieron para el PRAESTOL 2530, con el cual se presentaron turbiedades residuales inferiores a 3 UNT con tiempos de floculación entre 0 y 9 minutos, alcanzando el valor mínimo con 6 minutos (1,3 UNT) en el primer muestreo; con la segunda muestra, el tiempo necesario para obtener la menor turbiedad fue de 15 minutos. El EXRO 651, de naturaleza levemente catiónica, necesitó de tiempos de floculación entre 0 y 6 minutos para arrojar los menores valores de turbiedad residual con las dos muestras evaluadas, mientras que el EXRO 653, el cual tiene un peso molecular alto y naturaleza medio catiónica, presentó un comportamiento diferente en los dos muestreos. Para el SNF 926, de peso

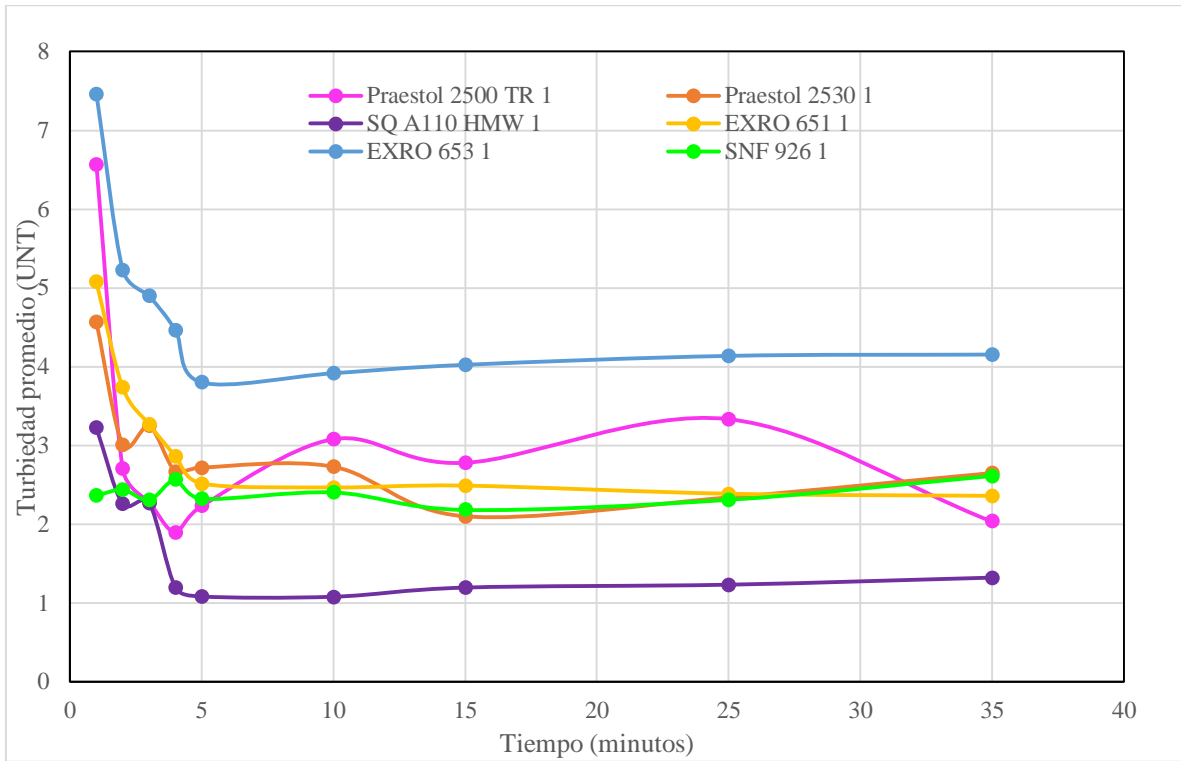
molecular Ultra alto y de naturaleza aniónica, se logra apreciar que al transcurrir el tiempo tiene una reducción de turbiedad residual, alcanzando los resultados óptimos, con las dos muestras, con tiempos mayores a 9 minutos. Finalmente, el SQ A110HMW de naturaleza aniónica tuvo un comportamiento diferente en los dos muestreos, ya que con la primer muestra se obtuvo turbiedades inferiores a 2 UNT con tiempos de contacto entre 3 y 6 minutos, mientras que con la segunda muestra fueron necesarios 15 minutos para alcanzar un valor de 5 UNT.

Una observación que se puede dar a simple vista es que los seis polímeros en ambos muestreos en el tiempo 0 presentaron una reducción buena de turbiedad, esto quiere decir que la floculación no es un parámetro importante a la hora de acondicionar este lodo, solo se necesita una buena mezcla rápida para que el polímero actúe adecuadamente.

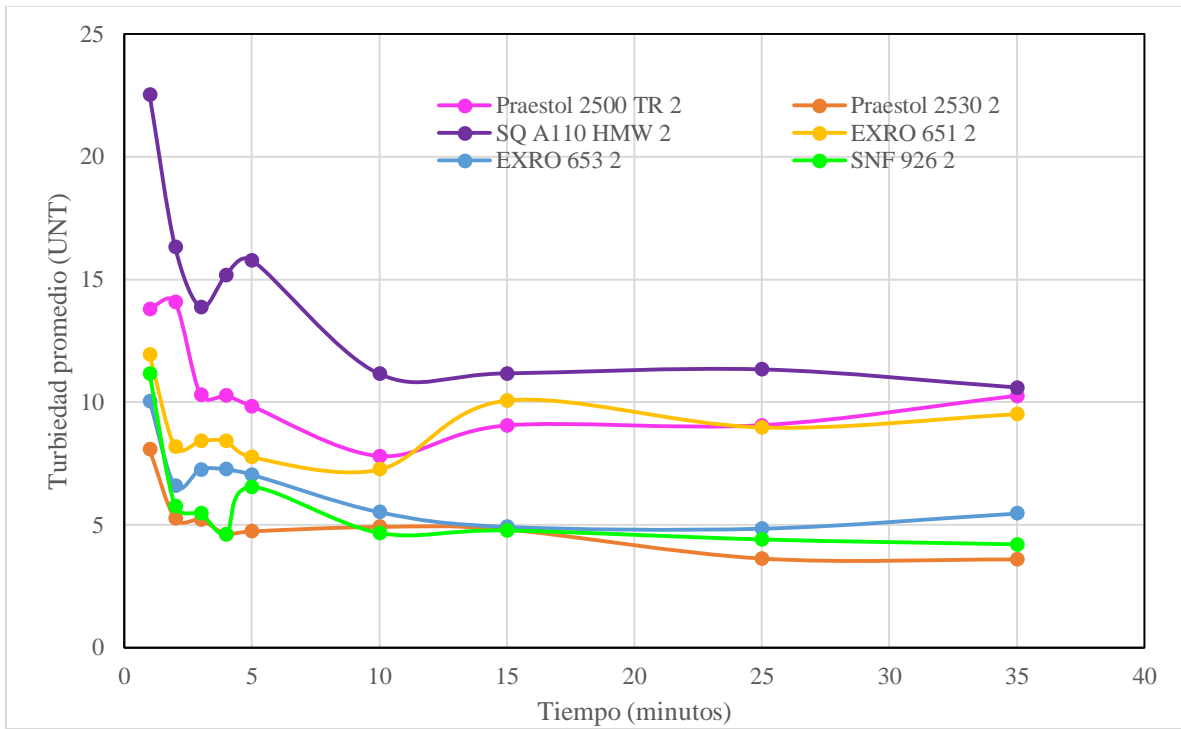
8.2.3 Sedimentación óptima

Posterior a la prueba de floculación óptima, se realizaron ensayos para determinar el tiempo de sedimentación óptima, los cuales se pueden apreciar en las siguientes gráficas. Las gráficas muestran los resultados con las turbiedades promedio para ambos muestreos.

Gráfica 10. Turbiedad promedio vs Tiempo para el muestreo 1.



Gráfica 11. Turbiedad promedio vs Tiempo para el muestreo 2.

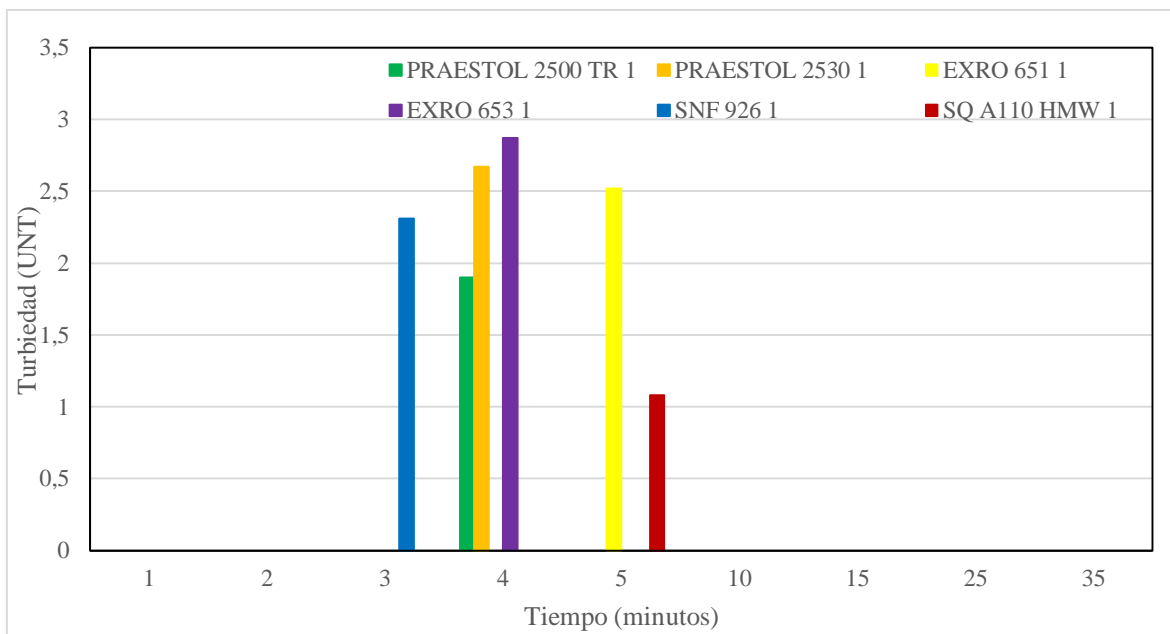


Una vez analizados las gráficas 10 y 11, se puede deducir que el tiempo óptimo de sedimentación no siempre es el menor valor, ya que algunos de los polímeros, tanto en el primer como en el segundo muestreo, alcanzaron los menores valores de turbiedad al principio de la prueba (en los primeros 5 minutos de sedimentación) sin diferir mucho de los valores obtenidos después.

En la mayoría de las pruebas se evidenció que el polímero actúa muy bien al momento de compactar y sedimentar los sólidos en tiempos muy cortos. Es decir que es muy recomendable el uso de polímeros para realizar un adecuado acondicionamiento de los lodos de una PTAP ya que al estar cargados y además presentar cadenas largas de monómeros con ramificaciones desestabilizan y fomentan la unión de flóculos aumentando su peso específico favoreciendo así la sedimentación y compactación de sedimentos.

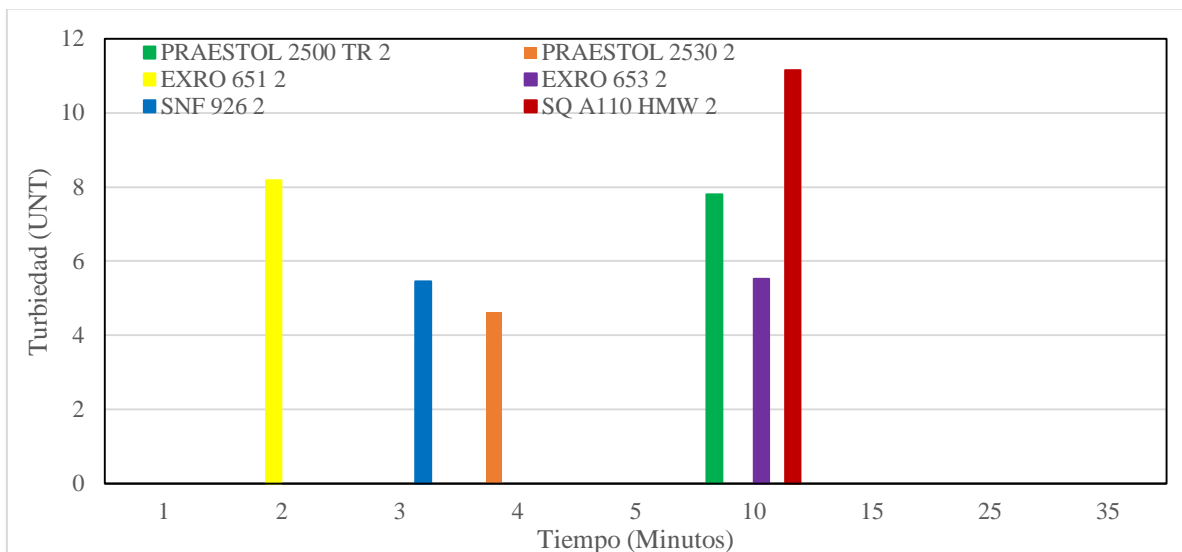
Se mostrarán los resultados basados en el menor tiempo que se requirió para disminuir la turbiedad en gran medida, usando como principio que para una muestra de lodo que pasa de una turbiedad de 1000 UNT a una turbiedad de entre 25-20 UNT no se considera representativo si disminuye 2 o 3 UNT si es necesario aumentar los intervalos de tiempo en la floculación.

Gráfica 12. Sedimentación óptima primer muestreo



En la gráfica 12 se puede observar el tiempo de sedimentación óptimo en el primer muestreo para los 6 polímeros seleccionados, donde el valor más alto fue el de EXRO 653 con una turbiedad de 2,87 UNT y el menor valor arrojado fue el de SQ A110HMW con una turbiedad de 1,08 UNT, en este primer muestreo los polímeros fueron eficientes debido a los bajos valores de turbiedad y también a que no es necesario mucho tiempo de sedimentación para lograr una muy buena reducción de turbiedad. Cabe destacar que el proceso de sedimentación nos reveló la eficiencia de compactación que tienen estos polímeros.

Gráfica 13. Sedimentación óptima muestreo dos



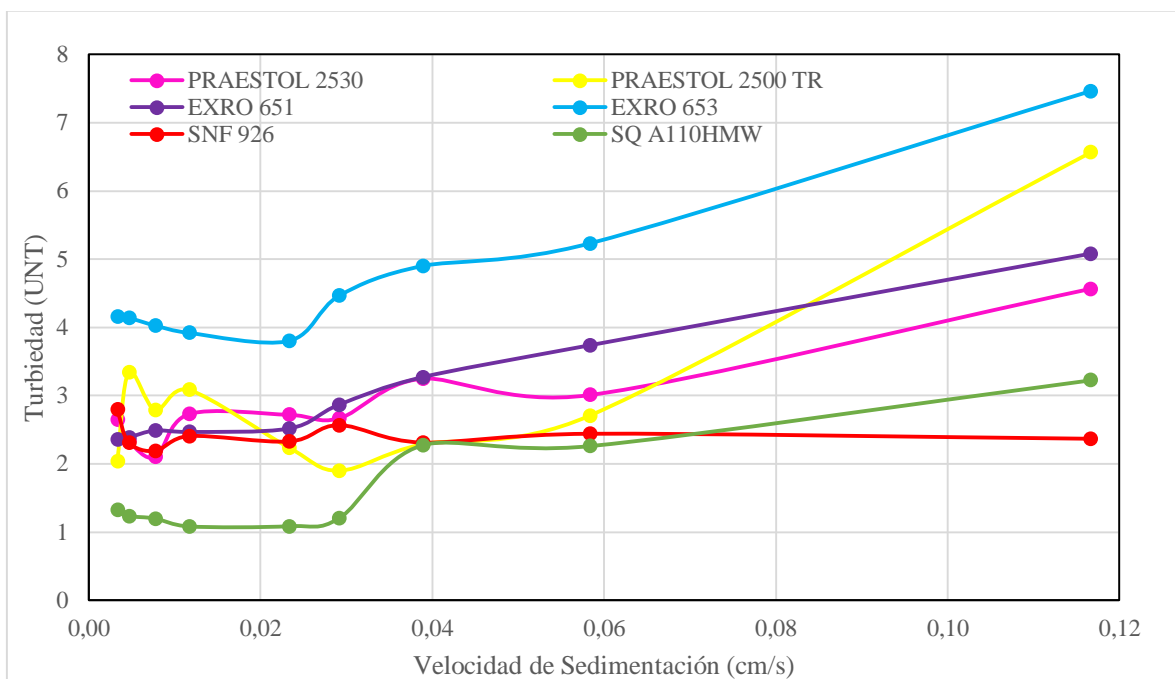
En el gráfico 13 se observa que 5 de los 6 polímeros seleccionados arrojaron valores altos debido a que no se modificó su dosificación suponiendo que iban a responder de la misma manera como en el muestreo uno; el polímero que obtuvo el mayor valor de turbiedad fue el SQ A110HMW en el tiempo de 10 minutos de sedimentación dando como resultado un valor de turbiedad de 11,15 UNT.

Debido a los resultados obtenidos en las pruebas de tiempo de sedimentación del lodo acondicionado se logra observar que la diferencia de valor de turbiedad entre un tiempo y el otro varía poco, entre 2-3 UNT; es por esto por lo que se toma como el óptimo no el valor más bajo de turbiedad si no el que actúe en menos tiempo.

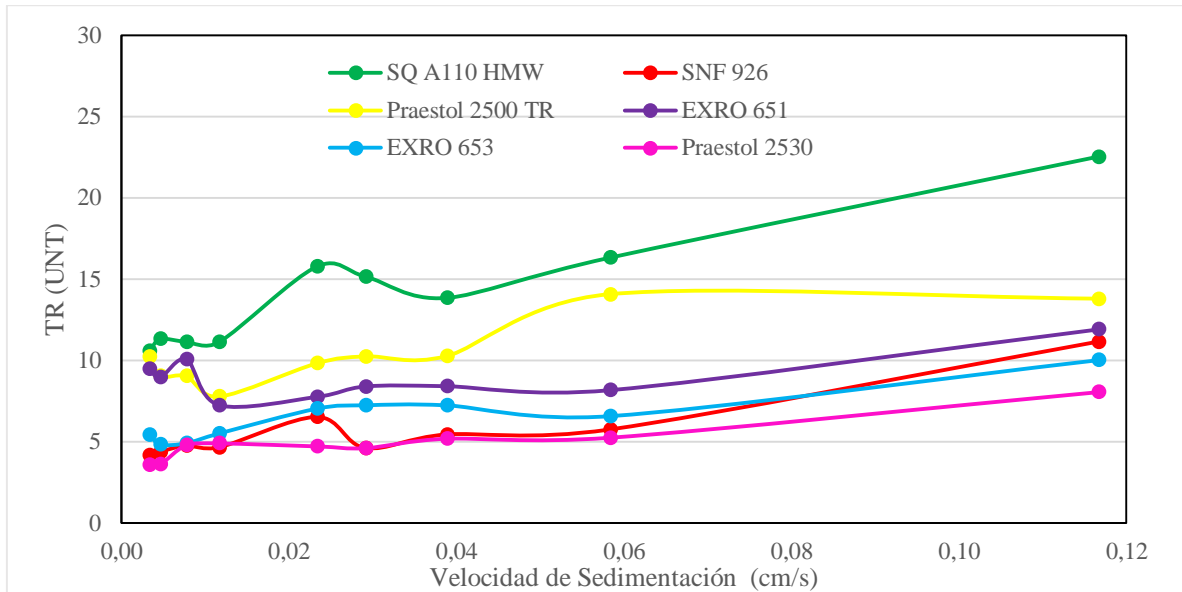
Los resultados que se evidencian en las gráficas anteriores dan un panorama muy satisfactorio, ya que hubo una reducción buena en las turbiedades y se lograron tiempos bastante cortos, lo cual lo hace un proceso muchos más eficiente. Esta afirmación se corroboró por lo mostrado por Di Bernardo donde hicieron el mismo procedimiento utilizando polímeros para el acondicionamiento químico de una ETAP, dando reducciones altas de turbiedad como en esta investigación.

En la tablas 14 y 15 se muestran los valores de turbiedad frente a las velocidades alcanzadas en la sedimentación en el proceso de acondicionamiento de los lodos provenientes de la PTAP Bosconia.

Gráfica 14. Turbiedad Remanente vs Velocidad de sedimentación para el muestreo 1



Gráfica 15. Turbiedad remanente vs Velocidad de sedimentación para el muestreo 2



Como se logra evidenciar, el aumento de los valores de turbiedad se comportó proporcionalmente a las velocidades alcanzadas, esto indica que cuando los sólidos se encuentran en movimiento la muestra se torna más turbia o con presencia de color, lo cual aumenta la turbiedad remanente.

En el primer muestreo el polímero que presentó mayor valor de turbidez fue el EXRO 653, al aumentar la velocidad proporcionalmente aumentó la turbiedad, arrojando un valor de 7,46 UNT y el polímero que presentó menor valor fue SNF 926 con un valor de 2,37. Ahora como se evidencia en la gráfica 15, el que muestra mayor turbiedad (22 UNT) para el segundo muestreo con una velocidad de sedimentación igual para todos los polímeros es el polímero EXRO 653 sin embargo mostró una gran remoción de turbiedad remanente pasando de 1000 a solo 22 UNT. El polímero que mostró una disminución de turbiedad mientras aumentaba la velocidad fue PRAESTOL 2500 TR, aunque la turbiedad que disminuyó no fue muy representativa menos de 1 UNT.

En la tabla 8 se pueden observar los resultados de la prueba de acondicionamiento del lodo, donde el polímero que se destacó fue PRAESTOL 2530 de naturaleza aniónica y peso molecular muy alto, sobresalió por sus periodos cortos de floculación y sedimentación para los dos muestreos tratados y su dosis óptima aumento proporcionalmente a la turbiedad inicial de la muestra.

Tabla 7. Resultados de los parámetros óptimos para el lodo proveniente de la PTAP Bosconia

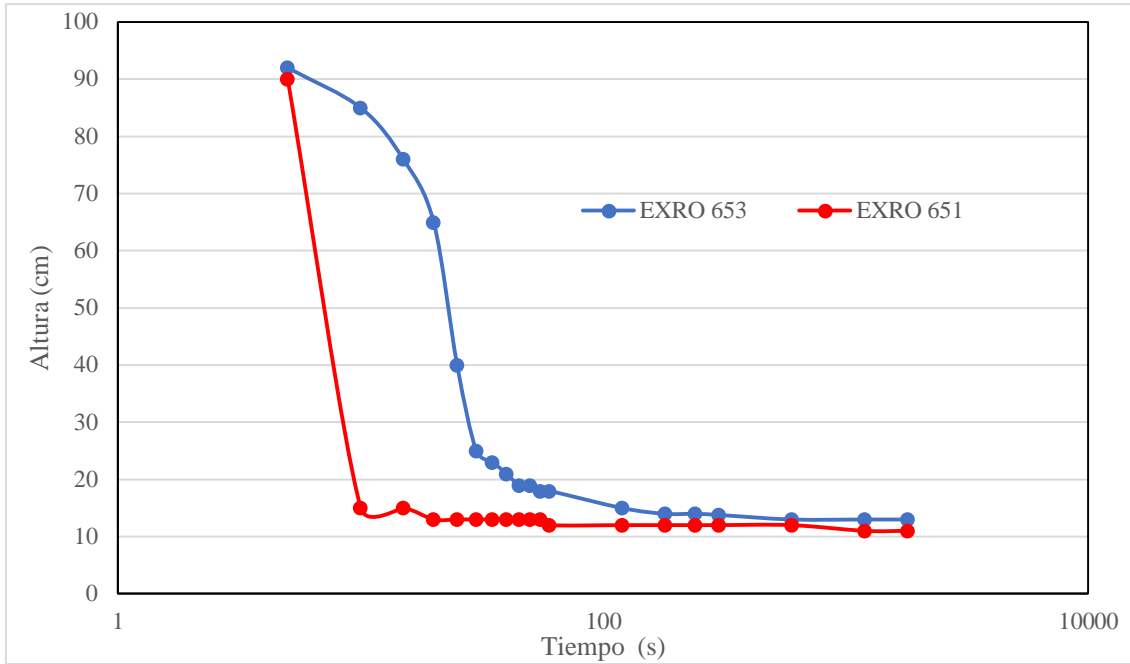
| | | RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS | | | | | |
|-----------|------------------|--------------------------------------|------------|------------------------------|------------|--------------------------------|------------|
| | | Dosis óptima (mg/L) | | Floculación óptima (Minutos) | | Sedimentación óptima (Minutos) | |
| | | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 1 | Muestreo 2 |
| | | | | | | | |
| POLÍMEROS | Praestol 2500 TR | 7,5 | 5,5 | 3 | 0 | 4 | 10 |
| | Praestol 2530 | 7,5 | 9,5 | 3 | 0 | 4 | 4 |
| | SQ A110 HMW | 2,5 | 5,5 | 3 | 9 | 5 | 10 |
| | EXRO 651 | 5,5 | 6,5 | 6 | 6 | 5 | 2 |
| | EXRO 653 | 6,5 | 6,5 | 0 | 3 | 4 | 10 |
| | SNF 926 | 6,5 | 6,5 | 9 | 12 | 3 | 3 |

Como se muestra en la tabla anterior los polímeros aniónicos (PRAESTOL 2530, PRAESTOL 2500 y SNF 926) son los que mostraron mejores resultados. Según Di Bernardo los polímeros aniónicos además de una velocidad alta de sedimentación presentaron en las muestras de sobrenadante reducción de metales, E. coli, presentaron reducciones significativas de turbiedad remanente pasaron de lecturas de entre 800 y 1000 UNT a valores de entre 40 y 7 UNT y aconsejan su recirculación. Estas muestras provenían del lavado de filtros y descarga de los sedimentadores de la planta de agua potable Taiçupeba del área metropolitana de Sao Paulo (Brasil).

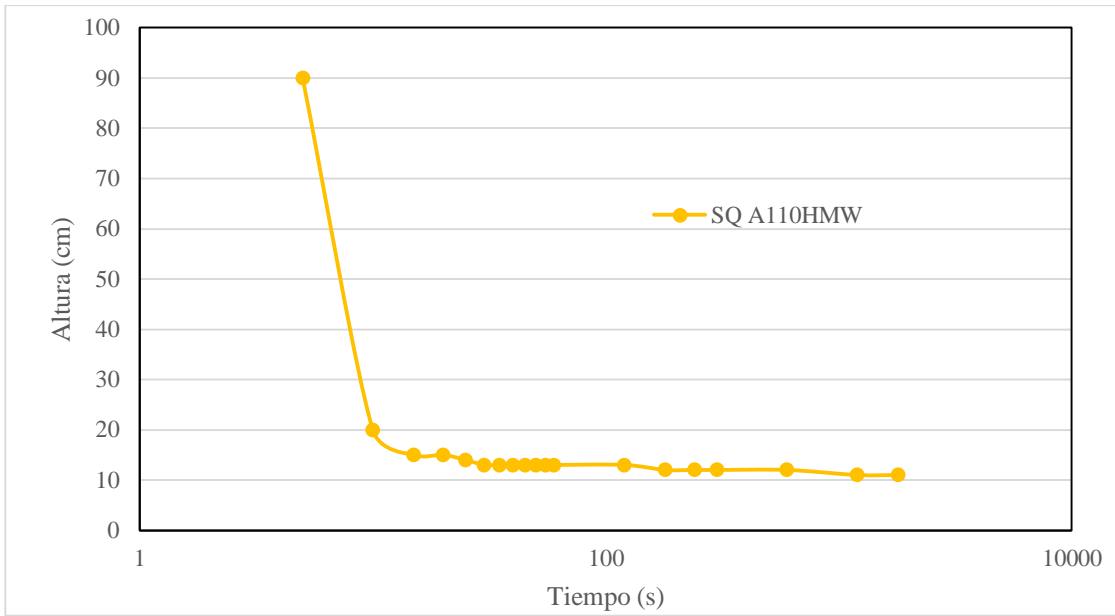
8.3 Pruebas de espesamiento

Se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de espesamiento realizadas a la muestra de lodos acondicionada, las primeras 4 gráficas son las que derivan del espesamiento del lodo con presencia de polímero y la última gráfica presenta los resultados realizados a los lodos sedimentados “naturalmente”, es decir sin ninguna ayuda química.

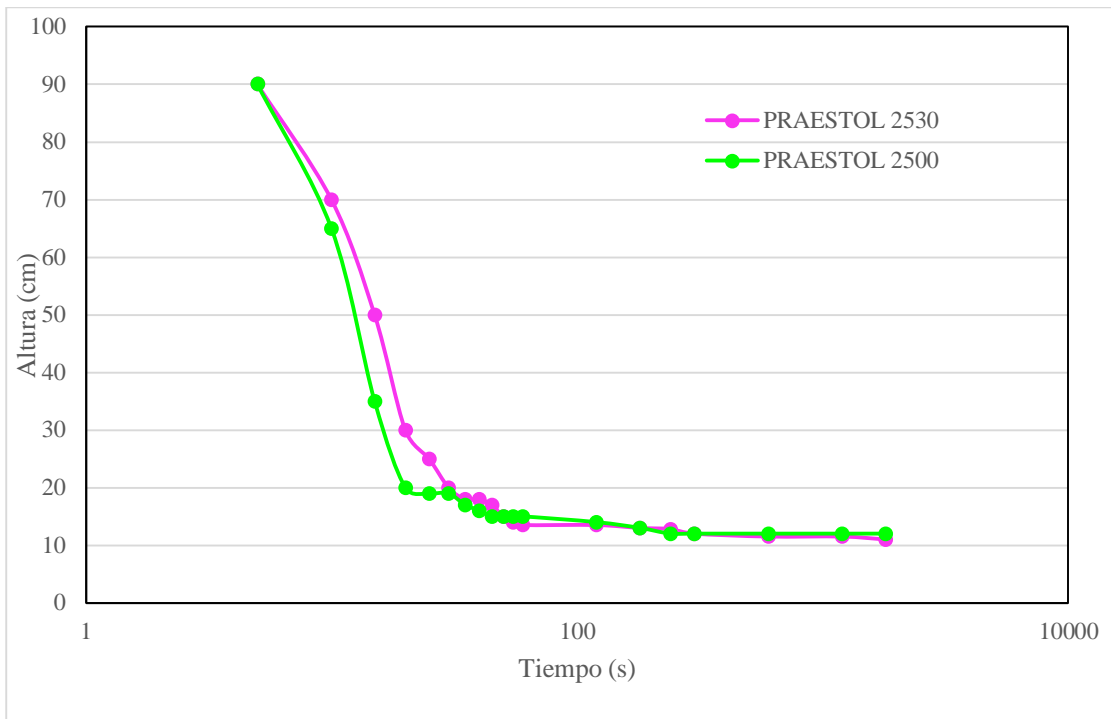
Gráfica 16. Prueba de espesamiento polímeros EXRO



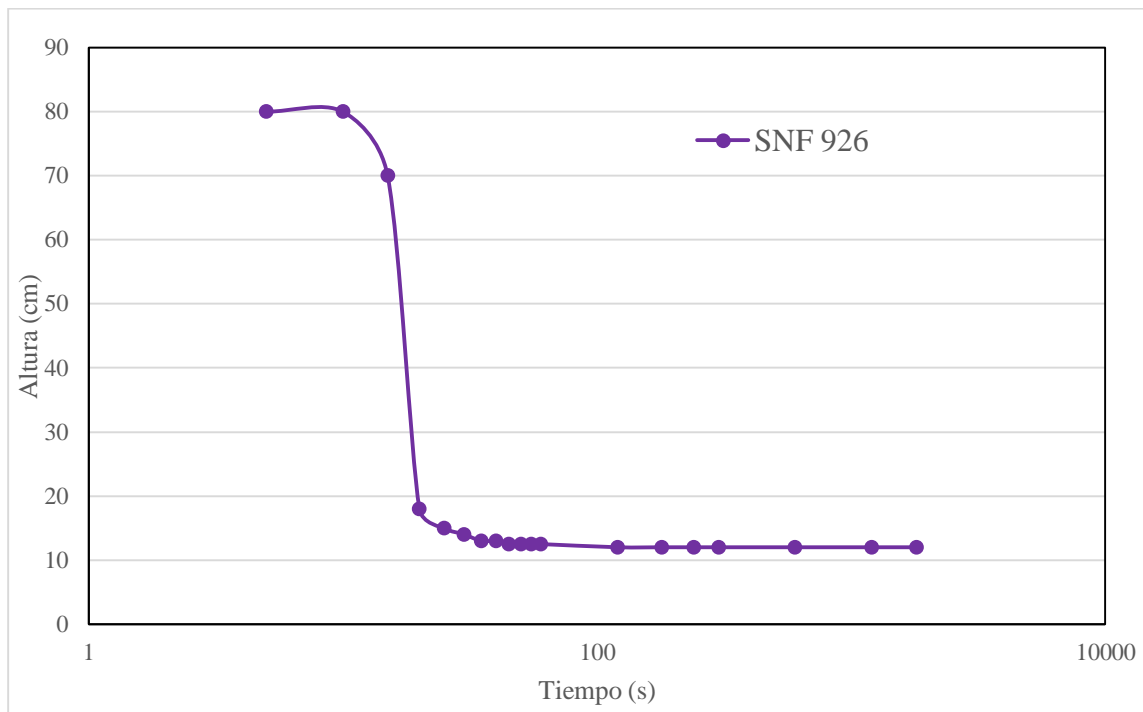
Gráfica 17. Prueba de espesamiento SQ A110 HMW



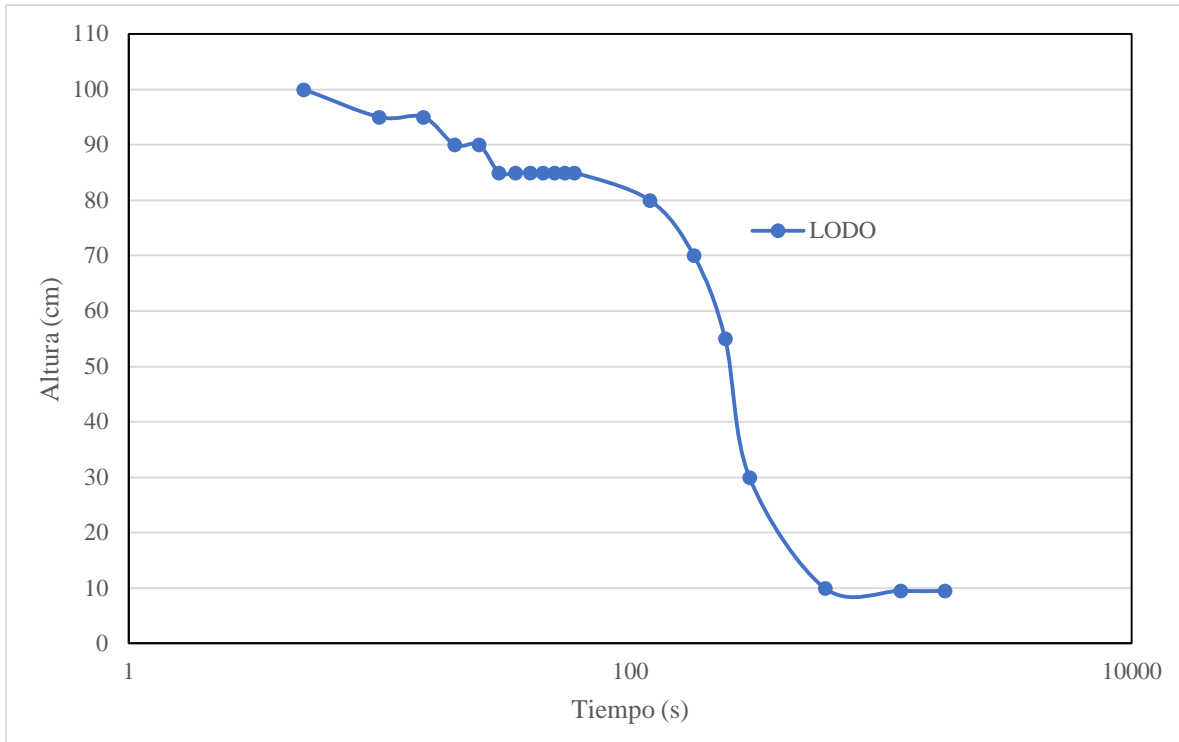
Gráfica 18. Prueba de espesamiento polímeros PRAESTOL



Gráfica 19. Prueba de espesamiento SNF 926



Gráfica 20. Prueba de espesamiento Lodo crudo



De acuerdo con las gráficas se observa que los polímeros EXRO 651, PRAESTOL 2500 y SNF 926 lograron una sedimentación mucho más rápida que los otros polímeros, ya que en los primeros 20 segundos se logró una altura de la interfaz inferior a 20 cm, lo cual se debe a la alta velocidad de sedimentación que se alcanza. Posteriormente, se presenta las velocidades de sedimentación en la prueba de espesamiento para cada uno de los polímeros, teniendo en cuenta el tiempo en el que se alcanzó una altura de interfaz inferior a 20 cm.

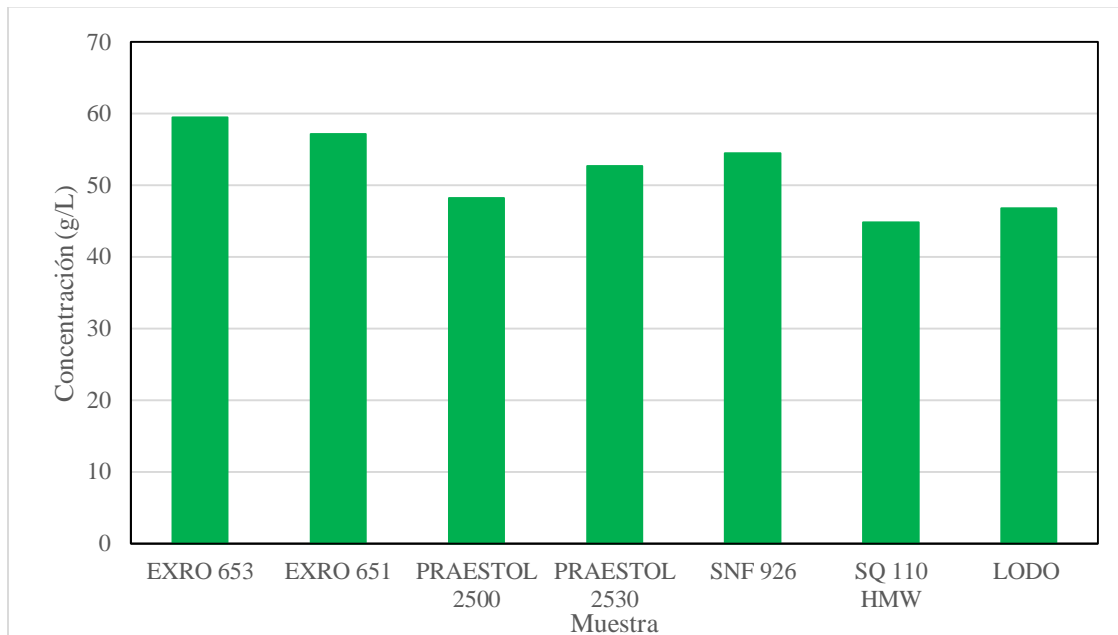
Tabla 8. Velocidad de sedimentación para los polímeros en un determinado tiempo

| POLÍMEROS | Tiempo (s) | | Vs (cm/s) |
|---------------|------------------|------|-----------|
| | Praestol 2500 TR | 20 | 4,80 |
| Praestol 2530 | 30 | 2,89 | |
| SQ A110 HMW | 45 | 1,96 | |
| EXRO 651 | 15 | 7,5 | |
| EXRO 653 | 45 | 2,1 | |
| SNF 926 | 20 | 3,92 | |
| Lodo Natural | 600 | 0,15 | |

Teniendo en cuenta estos resultados, se observa que el lodo natural posee la velocidad de sedimentación más baja, lo cual se ve representado en un requerimiento de mayor tiempo de sedimentación para lograr resultados óptimos. Para lograr un mejor espesamiento, es recomendable utilizar polímeros como el EXRO 651 o el PRAESTOL 2500 TR, con los cuales se obtiene un efluente clarificado y un lodo espesado en tiempos inferiores a un minuto.

Una vez finalizada la prueba de espesamiento, se realizó análisis a los sólidos suspendidos a los lodos sedimentados para comparar el grado de espesamiento logrado. En la gráfica 21 se presentan los resultados obtenidos.

Gráfica 21. Sólidos Suspendidos Totales De la Muestra espesada.



En la gráfica 19, se puede observar los resultados procedentes de la prueba de sólidos suspendidos totales de lodo acondicionado vs el lodo natural, dónde sobresalen los polímeros de EXRO que son de naturaleza catiónica, los cuales alcanzaron un porcentaje de 27% y 22% de sólidos suspendidos por encima del lodo natural. Además, se observa que el SQ 110 HMW arrojó un valor menor que el lodo natural, lo cual se puede deber a su baja velocidad de sedimentación que puede afectar la efectividad al momento de compactar los sólidos contenidos en la muestra. Los tres polímeros de

cargas aniónica y no iónica presentaron solo 16%, 12% y 3% con respecto a lodo natural esto debido posiblemente a la carga contenida en la muestra tratada ya que los polímeros catiónicos desestabilizaron mejor las partículas para el segundo muestreo por contener cargas contrarias al lodo.

10. Conclusiones

- Los polímeros que mejor respondieron a las pruebas de espesamiento según las condiciones del lodo fueron los de EXRO, de naturaleza catiónica y con un alto peso molecular, ya que se obtuvieron un 27% y 22% más de sólidos totales concentrados en el sedimento que los sedimentos provenientes del lodo sin acondicionar. Los otros 4 polímeros de naturaleza aniónica y no iónica pueden ser utilizados como floculantes, ya que reducen los residuos remanentes después de la coagulación, como en el caso de la adición de sales de aluminio en exceso y que quedan suspendidas en un agua con poca turbiedad.
- Se lograron hallar los parámetros óptimos para el acondicionamiento del lodo por medio del uso de polímeros, donde los aniónicos sobresalieron por encima de los catiónicos y no iónicos, arrojando así una dosis optima de polímero entre 9,5 y 2,5 mg/L, un tiempo de floculación óptimo entre 0-12 minutos y finalmente un tiempo de sedimentación óptimo entre 3 y 10 minutos, y se alcanzaron velocidades promedio en la columna de sedimentación de casi 1 cm/s esto los convierte en una muy buena alternativa para el acondicionamiento de los lodos provenientes de la PTAP.
- No es necesaria la floculación con esta muestra de lodo debido a que en el tiempo 0 después de la mezcla rápida de 30 segundos, los polímeros mostraron un buen desempeño en la reducción de turbiedad para ambos muestreos, es decir solo se necesita una mezcla rápida adecuada para ver resultados aceptables.
- En cuanto a la sedimentabilidad de los lodos, se evidenció que las muestras de lodos acondicionadas con polímeros aniónicos, catiónicos y no iónicos tienen una mayor capacidad de sedimentarse en un menor tiempo que los lodos sin acondicionar y a su vez se notaron

reducciones de turbidez que pasan de más de mil unidades nefelométricas a valores inferiores a 10 UNT.

11. Recomendaciones

- Se recomienda hacer un estudio con dosis más bajas de polímeros y realizar pruebas para conocer el tiempo y el gradiente óptimo de la mezcla rápida para obtener los resultados deseados.
- Se sugiere realizar una caracterización de los lodos para conocer sus propiedades físicas, químicas y biológicas antes y después del tratamiento conociendo así a profundidad su disminución o aumento.

12. Bibliografía

Almeida Naranjo, C. E. (2015). *Ecaluacion del uso de Polimeros en la Concentracon de Biomasa en un Reactor de lodos Activados*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.

Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2010). *Primer informe de avance estudios y diseños del sistema de extracción y conducción de lodos de la planta de tratamiento de agua potable Bosconia hasta la planta de lodos*. Bucaramanga.

Alamo Sparrow, E. (2009). *El Desarenador*. Nuevo Chimbote: Escuela Academica Profesional ingenieria Civil.

AMB. (2004). *Manual de operacion de la planta de tratamiento de agua potable Bosconia*. Bucaramanga.

AMB. (02 de noviembre de 2017). *Gestion integral del agua* . Obtenido de

http://www.amb.com.co:8081/wp_gestionagua/2017/11/02/plantas-de-tratamiento/

- Ascencio, M. T. (2012). *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*. Juitepec, Morelos, Mexico: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua .
- Avendaño Mendoza, J. F. (2010). *Diseño de un sistema SCADA para la dosificación eficiente de coagulante*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Bassan, P.-H. D. (2014). *Manejo de Lodos Fecales*. Londres: IWA Publishing.
- Cárdenas, Y. A. (2000). *Tratamiento de Agua: Coagulación y floculación*. Lima: SEDAPAL.
Obtenido de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Corredor, C., & Hernandez, E. (2017). *Diseño y construcción de una planta modelo de tratamiento para la potabilización de agua, se dispondrá en el laboratorio de aguas de la universidad católica de Colombia*. Bogotá.
- Di Bernardo Dantas, A. (2015). *Método E Técnicas de Tratamiento de Agua* (Vol. 2). Rio de Janeiro, Brasil: RIMA.
- Dodane, P.-H. (2014). Obtenido de https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/FSM_Libro_low_res/manejo_fsm_cap6_120ppi.pdf
- Fernandez, G. A. (2003). *Manejo de Lodos Producidos En la Planta de Tratamiento de Agua Potable, Planta II, del Municipio de Cartago, Valle*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia .
- Gutierrez, J. (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso de potabilización de agua. *UDEM*.
- Gutiérrez, J., & Ramírez, A. (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. *Scielo*, 15-16.

- Hazen, J., Sawyer, J., & Nippon Koei, S. (2011). *Espesamiento de Lodos*. Bogota: Corporacion Autonoma de Cundinamarca.
- Kaggwa, R., Mulatelo, C., Patrick, D., & Okurutu, T. (2001). *The impact of alum discharges on a natural tropical* (Vol. 35). Uganda.
- Lusardi, P. J., & Consonery Jones, P. (1999). Factors affecting filter water turbidity. *Journal AWW*, 28-40.
- Morales Rozo, J. D., & Mora Abril, A. M. (2019). *Desarrollo de parámetros operativos para tratamiento de lodos en la planta de potabilización de agua Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga*. Bucaramanga: UPB.
- Moreno Capacho, J. A., & Delgado Aguilar, C. A. (2009). *Evaluacion Del Proceso de coagulación en la planta de tratamiento Bosconia, Utilizando coagulantes inorgánicos y polimeros organicos*. Bucaramanga: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
- Ongley, E. (1997). *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. Burlington: Canada.
- Quirós, F. R. (2008). Lodos producidos en el tratamiento de agua potable. *Fundación Dialnet*, 46-52.
- Rice, E., Baird, R., Eaton, A., & Clescerl, L. (2015). *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Enviroment Federation.
- Rodríguez, Q. R. (2015). *Revision de la normatividad ambiental vigente para el manejo y abastecimeinto en Viotá, cundinamarca*. BOGOTÁ: UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.
- Sandoval Yoval, L., Montellano Palacios, L., Piña Soberanis, M., & Sanchez Guzman, L. O. (2015). *POTENCIAL ZETA COMO UNA HERRAMIENTA PARA DETERMINAR LA*

AGLOMERACIÓN DE LAS PARTICULAS EN LA REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DEL LODO A DISPONER.

Sastoque Perilla, J. E. (2015). *Estrategias para el reusó de los lodos en la zona dos de la Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá y plantas de tratamiento de aguas potables y residuales . Bogotá.* Bogota: Acueducto y alcantarillado de Bogotá.

Torres Rodríguez, N. J. (2013). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA TRATAMIENTO DE LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE POTABILIZACIÓN EN LA SABANA DE BOGOTÁ (ESTUDIO DE CASO MADRID, CUNDINAMARCA).* BOGOTA: UNIVERSIDAD LIBRE FACULTAD DE INGENIERÍA.

Zuleta Romero, D. M. (2017). *EVALUAR EL USO DEL POLIMERO FLOQUAT 2565 PARA TRATAMIENTO DE AGUAS NATURALES EN LA PLANTA FRANCISCO WEINER.* Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

ANEXOS

Anexo 1. Pruebas de dosis óptima preliminares

| | | DOSIS (mg/L) | | | | | |
|-------------|------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 0.5 (0.1 ml) | 1.5 (0.3ml) | 2.5 (0.5ml) | 3.5 (0.7ml) | 4.5 (0.9ml) | 5.5 (1.1ml) |
| POLÍMEROS | EXRO 663 | 11,4 | 1,86 | 2,7 | 2,59 | 3,31 | 2,43 |
| | PQP 2174 | 5,98 | 3,73 | 2,18 | 2,15 | 1,94 | 2,5 |
| | PRAESTOL 2500 TR | 5,5 | 2,64 | 2,24 | 5,74 | 5,87 | 4,02 |
| | SNF 934 | 3,57 | 3,05 | 2,87 | 3,69 | 2,22 | 1,85 |
| | SQ C494 | 5,21 | 2,92 | 2,35 | 2,26 | 2,20 | 2,67 |
| | SQ A110HMW | 2,22 | 1,76 | 1,98 | 2,63 | 2,6 | 3,09 |
| | SQ A150 | 2,55 | 3,21 | 1,94 | 3,23 | 2,29 | 2,52 |
| | SQ C496 | 6,2 | 7,06 | 2,96 | 3,63 | 3,2 | 2,74 |
| | PRAESTOL 2515 | 2,9 | 5,32 | 3,47 | 3,29 | 4,90 | 4,28 |
| | PRAESTOL 2530 | 2,78 | 2,23 | 2,93 | 3,03 | 3,24 | 4,42 |
| | PRAESTOL 851 TR | 3,18 | 2,97 | 3,01 | 2,71 | 2,59 | 2,48 |
| | SNF 4190 | 1,45 | 1,13 | 1,54 | 1,52 | 1,76 | 1,60 |
| | EXRO 653 | 2,62 | 4,52 | 3,22 | 3,12 | 3,11 | 2,43 |
| | EXRO 651 | 1,62 | 3,19 | 2,8 | 2,43 | 1,58 | 2,49 |
| | EXRO 656 | 4,81 | 5,77 | 4,38 | 1,93 | 1,9 | 1,86 |
| | SNF 4190 | 1,45 | 1,13 | 1,54 | 1,52 | 1,76 | 1,60 |
| | SQ C492 | 5,6 | 6,73 | 4,71 | 4,04 | 3,02 | 2,36 |
| | SQ C498 | 2,18 | 2,47 | 2,47 | 2,12 | 2,3 | 3,07 |
| | SQ A130 | 2,87 | 3,31 | 2,65 | 3,08 | 3,87 | 2,89 |
| | SQ A130HMW | 2 | 3,25 | 2,06 | 3,15 | 2,5 | 2,26 |
| SQ C498 HMW | 4,41 | 5,54 | 3,63 | 3,09 | 3,74 | 1,96 | |
| SQ C494HMW | 4,07 | 5,47 | 3,72 | 2,78 | 3,04 | 2,42 | |

Anexo 2. Prueba de dosis óptima para los polímeros de PRAESTOL

| | DOSIS (mg/L) EN 1 L DE MUESTRA | | | | | |
|--------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | 5.5 (1.1 ml) | 6.5 (1.3ml) | 7.5 (1.5ml) | 8.5 (1.7ml) | 9.5 (1.9ml) | 10.5 (2.1ml) |
| PRAESTOL 2500 TR 1 | 6,79 | 5,66 | 5,04 | 6,46 | 8,39 | 7,04 |
| PRAESTOL 2500 TR 2 | 5,11 | 6,72 | 16,7 | 10,7 | 13,8 | 13,0 |
| PRAESTOL 2530 1 | 6,65 | 6,23 | 5,95 | 11,5 | 12,3 | 9,42 |
| PRAESTOL 2530 2 | 22,1 | 12,2 | 11,1 | 11,8 | 8,44 | 11 |

Anexo 3. Prueba de dosis óptima para los polímeros EXRO 651

| DOSIS (mg/L) | | | | | |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 4.5 (0.9 ml) | 5.5 (1.1ml) | 6.5 (1.3ml) | 7.5 (1.5ml) | 8.5 (1.7ml) | 9.5 (1.9ml) |
| | | | | | |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| EXRO 651 1 | 4,31 | 3,58 | 4,92 | 5,15 | 5,95 | 6 |
| EXRO 651 2 | 9,92 | 6,43 | 3,92 | 4,7 | 4,96 | 6,56 |

Anexo 4. Prueba de dosis óptima para los polímeros EXRO 653

| | DOSIS (mg/L) | | | | | |
|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | 5.5 (1.1 ml) | 6.5 (1.3ml) | 7.5 (1.5ml) | 8.5 (1.7ml) | 9.5 (1.9ml) | 10.5 (2.1ml) |
| EXRO 653 1 | 4,21 | 5,25 | 4,79 | 4,94 | 3,24 | 4,12 |
| EXRO 653 2 | 2,37 | 2,69 | 2,32 | 3,29 | 2,47 | 4,78 |

Anexo 5. Prueba de dosis óptima para los polímeros SNF 926

| | DOSIS Optima EN mg/L EN 1 L DE MUESTRA | | | | | |
|-----------|--|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | 3.5(0.7ml) | 4.5 (0.9) | 5.5 (1.1ml) | 6.5(1.3 ml) | 7.5 (1.5 ml) | 8.5 (1.7ml) |
| SNF 926 1 | 8,66 | 3,93 | 4,66 | 3,0 | 4,46 | 4,92 |
| SNF 926 2 | 22,1 | 11,4 | 10,3 | 7,3 | 10,5 | 27,1 |

Anexo 6. Prueba de dosis óptima para los polímeros SQ A110HMW

| | DOSIS EN mg/L EN 1 L DE MUESTRA | | | | | |
|---------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | 1.5(0.3ml) | 2.5 (0.5ml) | 3.5 (0.7ml) | 4.5(0.9 ml) | 5,5 (1.1 ml) | 6.5 (1.3ml) |
| SQ A110 HMW 1 | 3,23 | 2,22 | 3,25 | 3,67 | 4,27 | 4,35 |
| SQ A110 HMW 2 | 20,4 | 19,2 | 10 | 8,02 | 5,57 | 6,91 |

Anexo 7. Prueba de floculación óptima para el muestreo #1

| |
|--------------------|
| Floculación optima |
|--------------------|

| | T=0 | T=3 | T=6 | T=9 | T=12 | T=15 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| PRAESTOL 2500 TR 1 | 6,86 | 3,97 | 3,81 | 3,02 | 6,62 | 5,4 |
| PRAESTOL 2530 1 | 2,7 | 2,1 | 1,31 | 2,49 | 3,38 | 3,71 |
| EXRO 651 1 | 5,32 | 4,21 | 4,01 | 3,74 | 3,14 | 2,86 |
| EXRO 653 1 | 4,71 | 7,5 | 4,38 | 5,7 | 4,04 | 3,98 |
| SNF 926 1 | 7,2 | 6,15 | 8,36 | 4,55 | 3,84 | 3,16 |
| SQ A110 HMW 1 | 4,52 | 1,76 | 1,6 | 3,05 | 5,27 | 2,74 |

Anexo 8. Prueba floculación óptima para el muestreo #2

| | Floculación óptima | | | | | |
|--------------------|--------------------|------|------|------|------|------|
| | T=0 | T=3 | T=6 | T=9 | T=12 | T=15 |
| PRAESTOL 2500 TR 2 | 7,14 | 6,62 | 10,8 | 18,9 | 12,3 | 26,5 |
| PRAESTOL 2530 2 | 17,1 | 13,8 | 11,2 | 15 | 19,3 | 7,56 |
| EXRO 651 2 | 9,03 | 9,19 | 6,36 | 11,6 | 12,2 | 25,5 |
| EXRO 653 2 | 11,1 | 12,5 | 9,54 | 10,2 | 9,01 | 10,4 |
| SNF 926 2 | 21,7 | 19 | 21,1 | 17,7 | 9,03 | 12,8 |
| SQ A110 HMW 2 | 16,2 | 12,6 | 11,3 | 8,16 | 7,16 | 5,08 |

Anexo 9. Prueba de sedimentación óptima PRAESTOL 2500 TR 1

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 10,2 | 3,47 | 6,03 | 6,57 |
| | 2 | 2,24 | 1,63 | 4,25 | 2,71 |
| | 3 | 1,82 | 1,94 | 3,11 | 2,29 |
| | 4 | 1,65 | 1,68 | 2,37 | 1,90 |
| | 5 | 2,1 | 1,6 | 3,01 | 2,24 |
| | 10 | 2,37 | 2,84 | 4,04 | 3,08 |
| | 15 | 2,53 | 2,25 | 3,57 | 2,78 |
| | 25 | 1,98 | 2,44 | 5,59 | 3,34 |
| | 35 | 1,91 | 1,77 | 2,44 | 2,04 |

Anexo 10. Prueba de sedimentación óptima PRAESTOL 2530 1

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 4,92 | 4,21 | 5,53 | 4,565 |
| | 2 | 2,96 | 3,06 | 2,23 | 3,01 |
| | 3 | 3,68 | 2,82 | 2,96 | 3,25 |
| | 4 | 2,76 | 2,58 | 1,86 | 2,67 |
| | 5 | 2,52 | 2,92 | 2,24 | 2,72 |
| | 10 | 2,4 | 3,06 | 2,32 | 2,73 |
| | 15 | 2,3 | 1,9 | 1,67 | 2,1 |
| | 25 | 2,3 | 2,38 | 2,2 | 2,34 |
| | 35 | 2,71 | 2,59 | 1,87 | 2,65 |

Anexo 11. Prueba de sedimentación óptima SQ A110HMW 1

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 2,92 | 4,86 | 14,9 | 7,56 |
| | 2 | 2,33 | 1,88 | 2,57 | 2,26 |
| | 3 | 2,71 | 2,01 | 2,1 | 2,27 |
| | 4 | 12,2 | 1,21 | 1,17 | 4,86 |
| | 5 | 1,19 | 0,89 | 1,17 | 1,083 |
| | 10 | 1,28 | 0,95 | 1,01 | 1,080 |
| | 15 | 1,08 | 1,3 | 1,21 | 1,20 |
| | 25 | 1,45 | 1,01 | 1,24 | 1,23 |
| | 35 | 1,9 | 0,97 | 1,1 | 1,32 |

Anexo 12. Prueba de sedimentación óptima EXRO 651 1

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 4,82 | 5,67 | 4,75 | 5,08 |
| | 2 | 4,17 | 4,29 | 2,75 | 3,74 |
| | 3 | 4,13 | 3,26 | 2,42 | 3,27 |
| | 4 | 3,16 | 2,83 | 2,61 | 2,87 |
| | 5 | 2,49 | 2,75 | 2,31 | 2,52 |
| | 10 | 2,46 | 2,08 | 2,86 | 2,47 |
| | 15 | 2,79 | 2,28 | 2,4 | 2,49 |
| | 25 | 2,56 | 2,4 | 2,2 | 2,39 |
| | 35 | 2,3 | 2,14 | 2,64 | 2,36 |

Anexo 13. Prueba de sedimentación óptima EXRO 653 1

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 8,83 | 5,17 | 8,38 | 7,46 |
| | 2 | 4,96 | 4,61 | 6,12 | 5,23 |
| | 3 | 4,84 | 5,07 | 4,79 | 4,9 |
| | 4 | 4,41 | 4,78 | 4,2 | 4,46 |
| | 5 | 3,62 | 3,93 | 3,86 | 3,80 |
| | 10 | 3,64 | 3,7 | 4,42 | 3,92 |
| | 15 | 4,49 | 3,75 | 3,84 | 4,03 |
| | 25 | 4,29 | 3,8 | 4,33 | 4,14 |
| | 35 | 3,89 | 4,28 | 4,3 | 4,16 |

Anexo 14. Prueba de sedimentación óptima SNF 926 1

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 2,61 | 2,33 | 2,16 | 2,367 |
| | 2 | 3,05 | 1,64 | 2,63 | 2,440 |
| | 3 | 2,83 | 2,16 | 1,94 | 2,310 |
| | 4 | 2,63 | 2,66 | 2,41 | 2,567 |
| | 5 | 2,45 | 2,29 | 2,24 | 2,327 |
| | 10 | 3,22 | 1,68 | 2,32 | 2,407 |
| | 15 | 2,28 | 1,88 | 2,4 | 2,187 |
| | 25 | 2,85 | 1,71 | 2,38 | 2,313 |
| | 35 | 12,9 | 7,35 | 3,13 | 7,793 |

Anexo 15. Prueba de sedimentación óptima PRAESTOL 2500 TR 2

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 8,5 | 10,7 | 22,2 | 13,80 |
| | 2 | 5,82 | 15,2 | 21,2 | 14,07 |
| | 3 | 5,02 | 9,85 | 16 | 10,29 |
| | 4 | 4,45 | 8,64 | 17,7 | 10,26 |
| | 5 | 4,86 | 7,85 | 16,8 | 9,84 |
| | 10 | 4,23 | 7,17 | 12 | 7,80 |
| | 15 | 4,01 | 8,73 | 14,4 | 9,05 |
| | 25 | 4,86 | 7,91 | 14,4 | 9,06 |
| | 35 | 5,22 | 9,25 | 16,3 | 10,26 |

Anexo 16. Prueba de sedimentación óptima PRAESTOL 2530 2

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 11,1 | 7,49 | 5,63 | 8,073 |
| | 2 | 6,23 | 4,93 | 4,63 | 5,263 |
| | 3 | 6,63 | 4,49 | 4,49 | 5,203 |
| | 4 | 5,34 | 4,37 | 4,16 | 4,623 |
| | 5 | 5,09 | 4,89 | 4,21 | 4,730 |
| | 10 | 4,88 | 5,39 | 4,47 | 4,913 |
| | 15 | 5,21 | 5,03 | 4,18 | 4,807 |
| | 25 | 4,35 | 3,5 | 3,01 | 3,620 |
| | 35 | 4,2 | 3,85 | 2,7 | 3,583 |

Anexo 17. Prueba de sedimentación óptima SQ A110HMW 2

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 13,9 | 25,2 | 28,5 | 22,533 |
| | 2 | 10,9 | 26,3 | 11,8 | 16,333 |
| | 3 | 8,59 | 22,4 | 10,6 | 13,863 |
| | 4 | 11 | 23,8 | 10,7 | 15,167 |
| | 5 | 8,75 | 26,6 | 12 | 15,783 |
| | 10 | 5,56 | 20,4 | 7,5 | 11,153 |
| | 15 | 6,36 | 18,7 | 8,45 | 11,170 |
| | 25 | 6,95 | 19,2 | 7,85 | 11,333 |
| | 35 | 6,26 | 17,9 | 7,63 | 10,597 |

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|-------|-------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 14,30 | 10,90 | 10,60 | 11,93 |
| | 2 | 10,20 | 6,60 | 7,75 | 8,18 |
| | 3 | 9,91 | 6,97 | 8,41 | 8,43 |
| | 4 | 9,31 | 6,46 | 9,47 | 8,41 |
| | 5 | 9,44 | 6,50 | 7,37 | 7,77 |
| | 10 | 7,60 | 5,83 | 8,36 | 7,26 |
| | 15 | 13,30 | 7,06 | 9,86 | 10,07 |
| | 25 | 10,60 | 7,23 | 9,11 | 8,98 |
| | 35 | 11,30 | 7,96 | 9,29 | 9,52 |

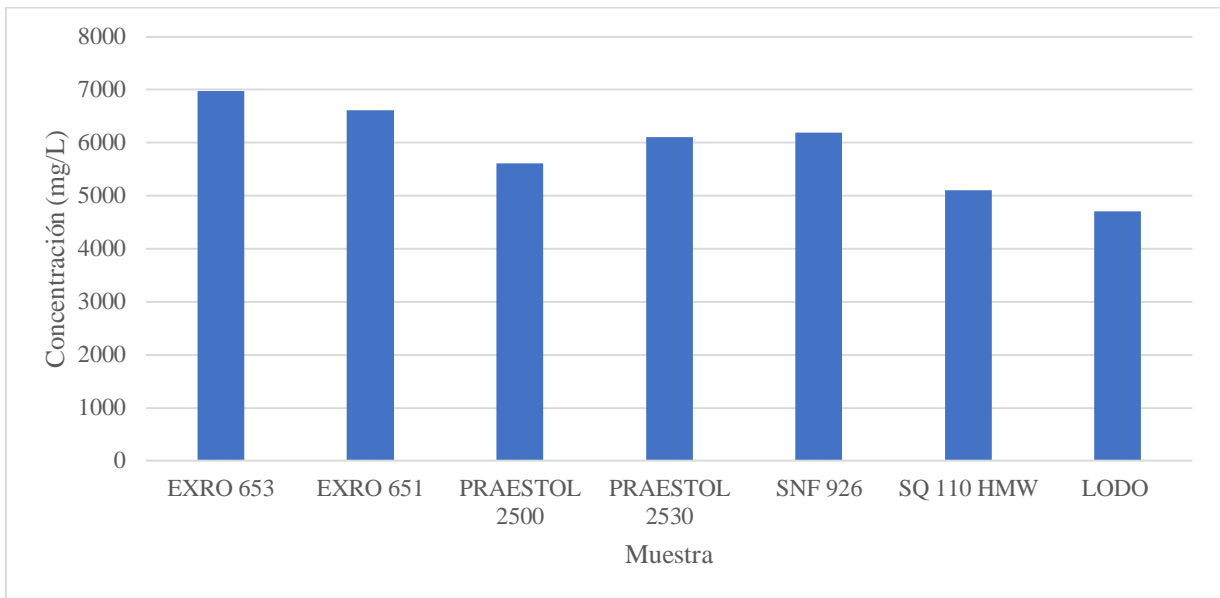
Anexo 18. Prueba de sedimentación óptima EXRO 653 2

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 11 | 12,1 | 7,02 | 10,04 |
| | 2 | 7,83 | 5,89 | 6,05 | 6,59 |
| | 3 | 6,71 | 8,49 | 6,57 | 7,2567 |
| | 4 | 8,02 | 7,03 | 6,73 | 7,26 |
| | 5 | 8,45 | 7,06 | 5,64 | 7,05 |
| | 10 | 6,73 | 5,08 | 4,76 | 5,523 |
| | 15 | 4,55 | 5,98 | 4,24 | 4,923 |
| | 25 | 4,53 | 4,82 | 5,2 | 4,85 |
| | 35 | 5,51 | 5,84 | 5,04 | 5,463 |

Anexo 19. Prueba de sedimentación óptima SNF 926 2

| SEDIMENTACION | | TURBIEDAD | | | Turb promedio |
|-------------------|----|-----------|------|------|---------------|
| Tiempo en minutos | 1 | 14,8 | 11,8 | 6,91 | 11,17 |
| | 2 | 6,3 | 6,74 | 4,25 | 5,76 |
| | 3 | 6,47 | 4,73 | 5,18 | 5,46 |
| | 4 | 4,74 | 4,94 | 4,19 | 4,62 |
| | 5 | 4,87 | 4,99 | 9,74 | 6,53 |
| | 10 | 5,09 | 4,78 | 4,13 | 4,67 |
| | 15 | 5,4 | 4,48 | 4,42 | 4,77 |
| | 25 | 4,45 | 4,98 | 3,77 | 4,40 |
| | 35 | 4,52 | 4,26 | 3,82 | 4,20 |

Anexo 20. Solidos Sedimentables Volátiles



Anexo 21. Solidos Sedimentables Fijos

