

**EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE COAGULANTES  
LÍQUIDOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA NUEVA DOSIFICACIÓN EN  
LA PLANTA FLORIDABLANCA DEL A.M.B. S.A. E.S.P.**

**DAISY JOHANA PÉREZ MANCIPE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2012**

**EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE COAGULANTES  
LÍQUIDOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA NUEVA DOSIFICACIÓN EN  
LA PLANTA FLORIDABLANCA DEL A.M.B. S.A. E.S.P.**

**DAISY JOHANA PÉREZ MANCIPE**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniera  
Química**

**Director:**

**M.Sc. CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA**

**Codirector:**

**Dra. Yolanda Otero Rodríguez**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2012**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por todas las bendiciones recibidas, permitirme gozar de buena salud e iluminarme en el camino de mi formación como Ingeniera Química.

A mis padres por darme la vida, mis nonos por ser mi ejemplo a seguir, mi tía Patty y mi tío Rodolfo por ser esos segundos padres incondicionales y a toda mi familia por apoyarme, comprenderme y darme siempre todo su amor, como dice la canción, familia es familia y cariño es cariño.

Al profesor Crisóstomo Barajas por su orientación y colaboración en la realización de este proyecto.

Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. por permitirme la realización de este estudio. Especialmente a la Ingeniera Yolanda Otero por su orientación, consejos y colaboración durante la realización de este estudio.

A todos los empleados de la planta Floridablanca por el conocimiento aportado, por confiar en mí y ofrecer todo el apoyo necesario en los meses de práctica. Gracias por su cariño y darme esos consejos que quedan para la vida.

A mis amigas del colegio por su amistad y apoyo incondicional durante estos 6 años y estoy segura que serán más. LAS ADORO.

A Jhon E. Torres por ser una excelente persona, por su apoyo, cariño y palabras de aliento, pero sobre todo, por su GRAN PACIENCIA.

Por último, pero no menos importante, a mis amigos de Ingeniería Química por apoyarme en los momentos de angustia y acompañarme en los momentos de felicidad. Gracias a TODOS porque hicieron de esta etapa algo inolvidable y una de las mejores de mi vida. LOS QUIERO MUCHO Y POR SIEMPRE GRACIAS.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE FLORIDABLANCA.....	16
1.2 PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA.....	16
1.3 AGENTES COAGULANTES.....	20
1.3.1. Coagulantes Convencionales..	21
1.3.2. Coagulantes Alternativos (PAC).....	21
<b>2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....</b>	<b>22</b>
2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	23
2.3.PRUEBA EN PLANTA .....	24
2.4 TIPOS DE EVALUACIONES .....	24
2.4.1 Evaluación técnico-operacional.....	24
2.4.2 Evaluación económica.....	24
2.4.3 Evaluación ambiental y de salud ocupacional.....	24
<b>3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>25</b>
3.1 ESTUDIO EXPERIMENTAL .....	25
3.1.1 Caracterización del agua cruda en la planta Floridablanca..	25
3.1.2 Dosis mínima óptima de coagulante, turbiedad residual y color final..	26
3.1.3 Influencia del pH.....	28
3.1.4 Aluminio Residual.....	29

3.1.5 Volumen de lodos producidos.....	30
3.1.6 Relaciones de reemplazo entre coagulantes.....	31
3.2 PRUEBA EN PLANTA .....	32
3.3 EVALUACIÓN TÉCNICO – OPERACIONAL .....	33
3.3.1 Tanques aforadores y de almacenamiento.. ..	34
3.3.2 Bombas.. ..	35
3.3.3 Localización de equipos, dispositivos e infraestructura .....	35
3.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR .....	36
3.4.1 Costo promedio por m <sup>3</sup> de agua tratada con cada coagulante.. ..	36
3.4.2 Costo de los principales equipos.....	37
3.5 EVALUACIÓN AMBIENTAL Y DE SALUD OCUPACIONAL .....	37
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>39</b>
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>41</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>46</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama de la descripción de la metodología.....	22
<b>Figura 2.</b> Dosis mínima óptima vs. turbiedad inicial para las muestras de agua cruda estudiadas. ....	27
<b>Figura 3.</b> Promedio del color final en los ensayos realizados. ....	28
<b>Figura 4.</b> Promedio del valor final del pH con los diferentes coagulantes.....	29
<b>Figura 5.</b> Promedio de la cantidad de aluminio residual (mg/L) con los diferentes coagulantes. ....	30
<b>Figura 6.</b> Promedio de volumen de lodos producidos (mL) por cada coagulante.	31

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Valor promedio de las principales propiedades del agua cruda de la planta Floridablanca. ....	25
<b>Tabla 2.</b> Razón de reemplazo de coagulantes alternativos de acuerdo a la turbiedad.. ....	31
<b>Tabla 3.</b> Resultados obtenidos de la prueba en planta. ....	33
<b>Tabla 4.</b> Tiempo promedio de duración de los insumos. ....	34
<b>Tabla 5.</b> Caudal de dosificación mínimo y máximos de las bombas, junto a las respectivas dosis. ....	35
<b>Tabla 6.</b> Costo promedio por m <sup>3</sup> de agua tratada con cada coagulante .....	36
<b>Tabla 7.</b> Costo bombas dosificadoras y tanques de almacenamiento. ....	37

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> VARIACIÓN DE LOS VALORES DE TURBIEDAD MÁXIMA - AÑOS 2008 A 2011 .....	46
<b>ANEXO B.</b> ETAPAS DE TRATAMIENTO EN CADA SUB-PLANTA .....	47
<b>ANEXO C.</b> ESQUEMA GENERAL DE LA PLANTA.....	50
<b>ANEXO D.</b> FACTORES INFLUYENTES EN EL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN.....	51
<b>ANEXO E.</b> MÉTODOS ANALÍTICOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DEL A.M.B. S.A. E.S.P.....	52
<b>ANEXO F.</b> PRUEBA DE JARRAS .....	56
<b>ANEXO G.</b> DETERMINACIÓN DOSIS MÍNIMA ÓPTIMA DE COAGULANTE ...	59
<b>ANEXO H.</b> PARÁMETROS INTERNOS DE CALIDAD .....	60
<b>ANEXO I.</b> RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE JARRAS.....	61
<b>ANEXO J.</b> VALORES PROMEDIOS ANUALES DE TURBIEDAD DESDE 2008 HASTA 2011 .....	62

<b>ANEXO K.</b> CONSUMO Y DOSIS DEL SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO DURANTE EL 2010, 2011 Y PRIMER TRIMESTRE DE 2012 .....	63
<b>ANEXO L.</b> CONSUMO DIARIO Y DOSIS DE LOS DIFERENTES COAGULANTES A PARTIR DEL SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO .....	65
<b>ANEXO M.</b> LOCALIZACIÓN NUEVOS EQUIPOS.....	66
<b>ANEXO N.</b> COSTO PROMEDIO POR m <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA .....	67
<b>ANEXO O.</b> RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ETAPA EXPERIMENTAL.....	68
<b>ANEXO P.</b> COTIZACIONES DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS.....	69
<b>ANEXO Q.</b> LÍNEA DEL TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO.....	77

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE COAGULANTES LÍQUIDOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA NUEVA DOSIFICACIÓN EN LA PLANTA FLORIDABLANCA DEL A.M.B. S.A. E.S.P.\*

**AUTOR:** Daisy Johana Pérez Mancipe \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Coagulantes convencionales, coagulantes alternativos, clarificación, coagulación, floculación, sedimentación, dosis mínima óptima.

**DESCRIPCIÓN:** La función del tratamiento de agua es producir agua potable de buena calidad para uso doméstico y para aplicaciones industriales. Recientemente la disponibilidad de éste recurso se ha convertido en una problemática dada la contaminación cada vez más alta de los ríos, lagos e incluso del agua subterránea que hacen del tratamiento un reto más difícil.

En este trabajo se realizó un estudio del proceso de tratamiento de agua potable usando coagulantes alternativos como una nueva opción que se ha incrementado en las últimas décadas dado su mejor desempeño frente a los coagulantes convencionales.

Con el fin de averiguar la factibilidad de sustituir el coagulante actualmente utilizado, se realizaron ensayos de laboratorio para determinar si dan mejores resultados los coagulantes propuestos; las pruebas de laboratorio permitieron visualizar la excelente utilidad que poseen los coagulantes líquidos.

Se establecieron los conceptos de las etapas más importantes del proceso de potabilización de agua (coagulación, floculación y sedimentación) y se especificaron los aspectos técnico-operativos, económicos, ambientales y de riesgo profesional que se deben considerar en el momento de implementar estos coagulantes en el proceso de clarificación.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en el proceso de tratamiento de agua y se determinó que se reemplazaría el coagulante convencional (sulfato de aluminio sólido) por los coagulantes líquidos (sulfato de aluminio líquido y ultrafloc 110) quienes mostraron un mejor desempeño respecto a turbiedad residual, pH, color real, aluminio residual y volumen de lodos producidos, además, fueron los más económicos y mitigaban los problemas ambientales ocasionados por el coagulante actual.

---

\* Práctica empresarial.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector: Yolanda Otero Rodríguez.

## ABSTRACT

**TITLE:** TECHNICAL, ECONOMICAL AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF LIQUID COAGULANTS FOR THE IMPLEMENTATION OF A NEW DOSAGE IN THE AMB S.A. E.S.P. PLANT OF FLORIDABLANCA.\*

**AUTHOR:** Daisy Johana Pérez Mancipe \*\*

**KEYWORDS:** Conventional coagulants, alternative coagulants, clarification, coagulation, flocculation, sedimentation, optimum minimal dosage.

**DESCRIPTION:** Water treatment function is to obtain potable water with good quality to domestic use and industrial applications. Lately, the availability of this resource has become a problematic situation given the rivers, lakes and even groundwater higher and higher pollution, what makes the treatment an even harder challenge.

In this work, a study of the potable water treatment process was carried out using alternative coagulants as a new option that has increased in the last decades given their better performance in comparison to conventional coagulants.

In order to find out how plausible is to replace the coagulant currently used, laboratory essays were made in order to determine if the suggested coagulants give better results; the laboratory tests proved the great effectiveness these liquid coagulants have.

The concepts of the most important stages of the water purification process (coagulation, flocculation and sedimentation) were established and the technical operative, economic, environmental and professional risk issues that must be taken into consideration when implementing these coagulants to the process were specified.

Finally, the results obtained in the water treatment process were presented and it was determined that the conventional coagulant (solid aluminum sulfate) was going to be replaced by the liquid coagulants (liquid aluminum sulfate and ultrafloc 110) which showed a better performance in residual cloudiness, pH, real color, residual aluminum and produced sludge volume; besides, they are more economical and mitigate the environmental problems caused by the current coagulant.

---

\* Enterprise practice.

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector: Yolanda Otero Rodríguez.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del conjunto de necesidades que debe satisfacer el hombre, el uso y consumo del agua se encuentra entre las más importantes, ya que es una sustancia absolutamente indispensable para la vida. Ésta debe ser tratada siempre para que sea apta al consumo humano debido a la presencia de impurezas como sólidos suspendidos, materiales colorantes, microorganismos, materia orgánica, gases disueltos, minerales, entre otros, que pueden ser perjudiciales para la salud de las personas.

Por otro lado, condiciones extremas del clima como huracanes, el fenómeno conocido como “El Niño”, la creciente presencia de lluvias torrenciales que extreman el caudal de los ríos y aumentan la cantidad de sedimentos en estos, además de inundaciones con la prolongación de periodos secos, afectan la calidad y disponibilidad del agua. (En el Anexo A puede verse una gráfica de la variación de turbiedades máximas desde el 2008 hasta el 2011 en la planta Floridablanca).

Por lo tanto, el cambio climático es un factor que refuerza la necesidad de introducir cambios en los procesos de las plantas de tratamiento, para garantizar mejoras en su funcionamiento y en la calidad del agua tratada estando a la par en los avances del sector y cumpliendo con legislaciones gubernamentales cada día más exigentes [29]. La utilización de coagulantes comunes, como el sulfato de aluminio sólido – utilizado en la planta Floridablanca-, se ha venido cuestionando en los últimos tiempos, debido, entre otras causas, a la dificultad técnica para mantener estable el pH óptimo de coagulación durante la operación y a las altas dosis requeridas, generando un aumento en la concentración de aluminio en el agua tratada, el cual está relacionado con la aparición de enfermedades neurodegenerativas [17, 20, 26].

Una de las opciones consideradas para poder alcanzar altos niveles de calidad en el agua tratada y un buen desempeño del proceso es el uso de los coagulantes alternativos que han surgido en las últimas décadas. Éstos, son una nueva

generación de coagulantes inorgánicos prepolimerizados incluyendo policloruros de aluminio (PAC's), clorhidrato de aluminio (ACH) y polisulfatos de aluminio (PAS), los cuales han mostrado mejor desempeño que los coagulantes convencionales como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico y son, hoy día, ampliamente aplicados para tratamiento de aguas municipales y aguas residuales especialmente en Europa y Asia [19, 27].

En época de invierno cuando son constantes los derrumbes, caídas y flujos de materiales no consolidados, en la planta Floridablanca se reportan valores de turbiedad y color considerables, que sumados al valor atípico del pH, impiden que se obtenga una remoción de turbiedad y color adecuado con el coagulante usado actualmente, el cual presenta poca eficiencia en estas condiciones. Así mismo, la fuente de agua cruda presenta un rango<sup>1</sup> bajo de alcalinidad que dificulta el proceso de coagulación y por lo cual es necesaria la adición de un alcalinizante, como la cal, al inicio del tratamiento. En estas circunstancias de turbiedades altas, el sulfato de aluminio sólido no permite obtener turbiedades residuales con un valor aceptable, ocasionando que el uso de polímeros ayudantes de coagulación sea una constante y, por ende, se genere un incremento en el costo del tratamiento.

Pensando en mantener la buena calidad del agua tratada, por la que se caracteriza el a.m.b. S.A. E.S.P.<sup>2</sup>, pero en busca de mejoras operativas, se revisó el tratamiento llevado a cabo en la planta Floridablanca y se hizo la verificación técnica del desempeño de los coagulantes líquidos. Para esto, se realizaron ensayos comparativos con sulfato de aluminio sólido tipo B y los coagulantes líquidos como el sulfato de aluminio líquido tipo B y, los PAC's Mackenfloc II y Ultrafloc 110.

---

<sup>1</sup> Rangos de alcalinidad (mg/L CaCO<sub>3</sub>): Bajo: < 75. Medio: 75-100. Alto: > 150. [30]

<sup>2</sup> Siglas en español del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. Empresa de Servicios Públicos.

El objetivo de este estudio es abordar los principales aspectos técnico-operativos, económicos, ambientales y de seguridad industrial que se deben considerar al momento de implementar un proceso de clarificación de aguas usando coagulantes líquidos para el remplazo del coagulante convencional en uso, cumpliendo los requisitos físicos y químicos establecidos por el Ministerio de Ambiente, de manera que no cause perjuicio a la salud de las personas que la consumen.

### **1.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE FLORIDABLANCA**

La planta Floridablanca se localiza en la zona Sur-Oriental del Área Metropolitana de Bucaramanga, en la parte alta del Barrio Caracolí del municipio de Floridablanca y a una altura media de 1042 msnm<sup>3</sup>. Esta planta fue diseñada para tratar aguas provenientes del Río Frío y así poder abastecer la zona sur del Área Metropolitana y una parte de Girón. La capacidad de arrastre del río es alta, especialmente causada por el alto grado de meteorización de los suelos y la alta pendiente de su cauce. [1]

En la planta, la capacidad máxima de tratamiento de agua para potabilización es de 620 L/s, para esto cuenta con dos secciones: La original o planta Antigua y la de ampliación o planta Nueva. Las etapas que se llevan a cabo en cada sub-planta y una breve descripción de las estructuras implicadas, se encuentran en el Anexo B. El esquema general de la planta puede ser observado en el Anexo C.

### **1.2 PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA**

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga cuenta con tres fuentes proveedoras de agua cruda<sup>4</sup> para todas sus plantas: El Río Tona (plantas La Flora y Morrórico), el Río Frío (planta Florida) y el Río Suratá (planta Bosconia), las cuales se caracterizan por la permanencia del caudal, la calidad del agua y las facilidades de transporte hacia las plantas.

---

<sup>3</sup> Metros sobre el nivel del mar (msnm).

<sup>4</sup> Agua Cruda: Agua que no se ha sometido al debido proceso para su potabilización.

El proceso de potabilidad comienza en la *captación*<sup>5</sup>, la cual consiste en una estructura que se construye en las fuentes de suministro para derivar el caudal necesario a cada planta. Una vez captada el agua, es sometida a un proceso de retención de arenas y sólidos mediante la decantación que se lleva a cabo en los *desarenadores*. Seguido a esto, se transporta el agua hasta la planta de tratamiento por medio de canales y tubos de aducción (Sistema Río Frío: Flujo Libre). [1]

El primer proceso que se realiza cuando el agua entra a la planta de tratamiento es la *aireación*, donde se genera turbulencia en el agua para eliminar olores y sabores producidos por gases disueltos. Continuo a esto se efectúa la *medición del flujo* entrante en la canaleta Parshall<sup>6</sup>. Conocido el caudal se da inicio a los principales procesos en la potabilización del agua: Coagulación, floculación y sedimentación. [6, 18, 22, 24]

La **coagulación** es el proceso en el cual se aplica al agua el insumo químico coagulante en la cantidad necesaria con el objetivo de desestabilizar las partículas que dan la turbiedad y el color. En la entrada del agua a cada sub-planta se genera alta turbulencia, simulando así una mezcla rápida con el coagulante suministrado mediante flautas dosificadoras.

Las partículas que forman la turbiedad y el color de las aguas naturales, poseen cargas eléctricas que normalmente son negativas y determinan unas fuerzas de repulsión entre ellas, manteniéndolas suspendidas en el agua. Entre mayor sea la magnitud de las fuerzas de repulsión, más estable será el sistema coloidal y más difícil será obtener la aglomeración de las partículas para que puedan sedimentar.

---

<sup>5</sup> La captación se hace de dos formas: De *fondo* donde el agua es captada por medio de una reja con canal colector ubicado por debajo de la línea de agua y, *lateral* donde el agua entra a través de un vertedero con reja paralelo a la dirección de la corriente de agua.

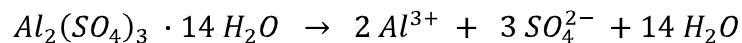
<sup>6</sup> Canaleta Parshall: Canal de paredes paralelas constituido por una sección de convergencia, una garganta y una sección de divergencia, el cual se usa para la medición del caudal mediante reglas colocadas en su interior y con ayuda de fórmulas matemáticas o bien, con sensores independientes al equipo colocados en la parte superior.

En el proceso de clarificación, la función de los coagulantes es neutralizar las cargas eléctricas proporcionando cargas positivas, desestabilizando el sistema coloidal y formando otras partículas de mayor tamaño que se separan en la sedimentación. La dosis de coagulante es un parámetro crítico, dado que si éste se adiciona por debajo de la cantidad requerida no se neutralizan totalmente las cargas de las partículas, si se adiciona en exceso se produce una inversión de cargas y en ambos casos la formación de flóculos es escasa y la turbiedad del agua tratada es elevada.

El agua requiere de cierta alcalinidad<sup>7</sup> para producir la coagulación, si no la posee, se debe agregar algún tipo de sustancia como el CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>, NaOH o NaCO<sub>3</sub>. Además, para cada tipo de agua<sup>8</sup> existe un pH óptimo de coagulación y en este punto el gasto de coagulante es mínimo.

El fenómeno de la desestabilización se da mediante una serie de reacciones químicas que se desarrollan como consecuencia de la adición del coagulante al agua cruda, así:

El coagulante, sulfato de aluminio [  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$  ], es una sal que se ioniza cuando se prepara en solución acuosa, de este modo:



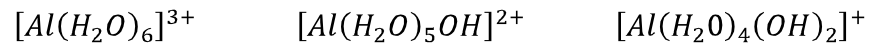
A medida que la reacción se lleva a cabo el pH va disminuyendo hasta un punto en que se hace estable. Si el agua contiene bicarbonatos, el pH puede mantenerse aproximadamente constante ya que estos actúan como amortiguadores.

---

<sup>7</sup> La alcalinidad del agua es la capacidad que esta tiene para mantener su pH frente a la adición de un ácido. Este parámetro determina el contenido de iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>), carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) y bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), y se toma como un indicador de dichas especies.

<sup>8</sup> El agua no es siempre la misma pues esta presenta cambios en la turbiedad, pH, alcalinidad, conductividad, color, entre otras.

El ión  $Al^{3+}$  se asocia con varias moléculas de agua y forma una serie de compuestos complejos, lo cual se denomina *hidrólisis del ión  $Al^{3+}$* . Los compuestos son de la forma:



Estos compuestos complejos reaccionan con las formas de la alcalinidad para dar lugar a otros compuestos, los cuales reaccionan con las partículas coloidales y producen la neutralización de las cargas eléctricas. Así, se permite la formación de partículas de mayor tamaño, llamadas *flóculos*, que se separan en la sedimentación y filtración. Además, algunas de estas reacciones producen  $CO_2$  que se combina con el agua para formar ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ). Aunque éste compuesto es inestable y se descompone fácilmente, incrementa la acidez del agua, disminuyendo el pH y provocando corrosión en los materiales con los que está en contacto, por lo tanto suele neutralizarse con cal. [5, 6, 18, 22, 23, 24]

La **floculación** es el proceso físico de mezcla lenta continuo a la coagulación, donde se incrementa la posibilidad de choque entre las partículas presentes en el agua, dándose la aglutinación de las más pequeñas formando otras de mayor tamaño (flóculos), que a su vez, son lo suficientemente grandes y pesadas como para sedimentar. El movimiento de las partículas depende de varios factores como la temperatura del agua, la concentración de las partículas, la presencia de cargas eléctricas, entre otros.

La floculación se realiza en dispositivos hidráulicos, donde se asegura la velocidad de agitación lenta para favorecer la formación de los flóculos y su transporte al proceso de sedimentación. La intensidad de la agitación no debe ser demasiado lenta porque las partículas que se van formando pueden sedimentarse en los floculadores; tampoco muy intensa porque podría romperse el floc formado y no sedimentaría en forma eficiente. [5, 6, 18, 22, 23, 24]

En la **sedimentación** se da la separación de los flóculos del agua, los cuales se decantan en el fondo de los tanques por acción de la fuerza de la gravedad, dando como resultado un fluido más claro. Este proceso depende del tipo de partícula, la velocidad de sedimentación, velocidad y temperatura del agua. La descripción sobre la influencia de estos factores se encuentra en el Anexo D.

Realizadas las operaciones anteriores se continúa con la *filtración*, cuyo objetivo es remover tras un medio poroso (compuesto por antracita y arena) las partículas (flóculos livianos) que no han sido eliminadas en la sedimentación. El agua que ha pasado por los filtros se lleva a *desinfección* donde se adiciona la cantidad de cloro gaseoso necesaria para destruir los microorganismos que puedan estar presentes. [6, 18, 22, 24]

Finalmente, el agua tratada sale de las plantas y se *almacena* en grandes tanques con el fin de regular la presión y así distribuirla de mejor manera a cada uno de los hogares.

### **1.3 AGENTES COAGULANTES**

Los coagulantes son sustancias químicas que se agregan al agua para lograr una desestabilización de las partículas coloidales presentes en ella, dando paso a la formación de flóculos (partículas más grandes) que pueden llegar a sedimentar más rápido.

Estos reactivos tienen un rango de pH óptimo de actuación, por lo cual es necesario un continuo control de esta variable con el fin de mejorar las condiciones idóneas de clarificación. Cuando no es posible modificar el pH del agua, es preciso aumentar la dosificación de los coagulantes para evitar deficiencias en la decantación pero con el inconveniente de que la cantidad excesiva de estos tiende a reducir el pH del agua en tratamiento.

**1.3.1. Coagulantes Convencionales.** En el tratamiento de aguas, los coagulantes más comunes son compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, entre otros. Estos coagulantes son sales ácidas que disminuyen el pH del agua a analizar. Es por esto que en los procesos de potabilización, es necesario agregar un álcali como cal o soda cáustica, generando mayores costos. [8]

**1.3.2. Coagulantes Alternativos (PAC).** En las últimas décadas se han desarrollado coagulantes inorgánicos poliméricos que presentan un mejor comportamiento ante los coagulantes convencionales en el proceso de clarificación. Los coagulantes poliméricos se consideran más eficientes que los convencionales, dada la baja dependencia de la temperatura y del pH. Sin embargo, su eficiencia puede verse afectada por la composición del agua cruda y su turbiedad, ya que estos coagulantes se desempeñan mejor en turbiedades altas, permitiendo así menores cantidades de producto coagulante en la dosificación.

Los flóculos formados por los PAC tienden a ser pequeñas esferas o cadenas compactas, mientras que los flóculos de sulfato de aluminio son usualmente estructuras porosas y esponjosas. Esta diferencia lleva a que los PAC permitan obtener menor turbiedad en el agua tratada que el sulfato de aluminio. [8, 25]

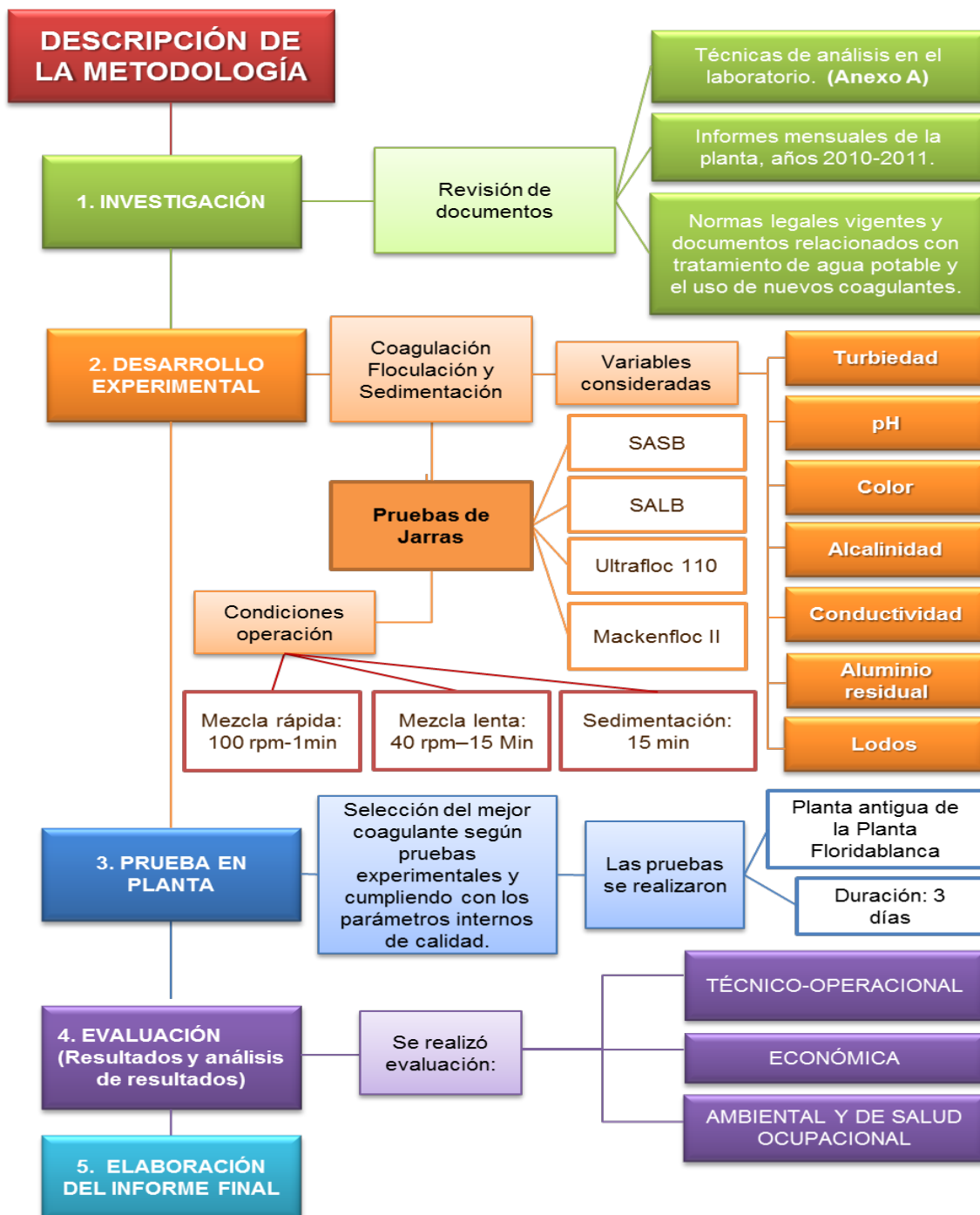
Entre otras ventajas están:

- ✓ Mayor velocidad de coagulación y floculación.
- ✓ No aportan aluminio disuelto al agua.
- ✓ Menor turbidez final en el proceso.
- ✓ Menor consumo o nulo de álcalis.
- ✓ Efectividad en un amplio rango de pH.
- ✓ Igual rendimiento con distintas temperaturas.
- ✓ Remoción de color.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

En la Figura 1 se resume la metodología utilizada en este proyecto.

**Figura 1.** Diagrama de la descripción de la metodología.



Fuente: Autor.

## 2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El estudio se realizó a nivel laboratorio donde se hicieron los respectivos análisis fisicoquímicos a las muestras de agua cruda proveniente de Río Frío y recolectadas al azar en la cámara de llegada de la planta Floridablanca, midiendo variables como turbiedad, color real, pH, temperatura, alcalinidad y conductividad. Los métodos para la medición de las variables se encuentran en el Anexo E.

Continuo a esto, los procesos de coagulación, floculación y sedimentación que se llevan a cabo en la planta, fueron simulados en el ensayo de prueba de jarras, el cual se describe detalladamente en el Anexo F. Conocidos los parámetros operacionales del equipo clarificador, se realizó un estudio comparativo entre 4 tipos de coagulantes mediante la obtención de la dosis mínima óptima<sup>9</sup> con cada uno de ellos (el instructivo para la determinación de esta dosis se halla en el Anexo G). Los productos utilizados fueron: Sulfato de aluminio sólido tipo B (SASB), sulfato de aluminio líquido tipo B (SALB) y Mackenfloc II del proveedor Quinsa<sup>10</sup>, Ultrafloc 110 de la empresa PQP S.A.<sup>11</sup>, en cuya selección se tuvo en cuenta el cumplimiento de la Norma Técnica Colombiana 4760 [16].

Finalizado cada ensayo, a las muestras de agua tratada se les determinó la turbiedad residual y el pH final para establecer cuál de ellas correspondía a la dosis mínima óptima (jarra óptima). Conociendo ésta, se evaluó el color real, el aluminio residual y el volumen de lodos producidos, dando por terminados los análisis en el laboratorio.

Con la información adquirida se hizo posible la fijación de relaciones de reemplazo entre los coagulantes.

---

<sup>9</sup> Dosis mínima óptima: Se obtiene cuando para cada muestra de agua cruda con un valor de turbiedad determinado se logran los valores más bajos de turbiedad y aluminio residual en el agua tratada, usando la menor cantidad posible de coagulante.

<sup>10</sup> Química Integrada S.A. (Quinsa), empresa del sector industrial productora de insumos químicos para el tratamiento de aguas.

<sup>11</sup> Productos Químicos Panamericanos S.A. (PQP S.A.), empresa líder en Colombia en el sector de tratamiento de aguas.

### **2.3. PRUEBA EN PLANTA**

De las pruebas experimentales se pudo escoger el mejor coagulante que permitiera obtener agua tratada cumpliendo con los parámetros internos de calidad<sup>12</sup> del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, los cuales se referencian en el Anexo H. La prueba se realizó en la planta antigua y tuvo una duración de tres (3) días consecutivos.

### **2.4 TIPOS DE EVALUACIONES**

**2.4.1. Evaluación técnico-operacional.** Se tuvo en cuenta el almacenamiento de coagulantes, elección y localización de nuevos equipos, infraestructura y parámetros de calidad del agua tratada.

**2.4.2 Evaluación económica.** Este estudio permitió comparar los valores por m<sup>3</sup> del agua tratada con cada uno de los coagulantes, además del costo de la infraestructura, principales dispositivos y equipos necesarios para el nuevo proceso de dosificación con coagulantes líquidos.

**2.4.3 Evaluación ambiental y de salud ocupacional.** Se analizaron los impactos ambientales directos e indirectos, incluyendo oportunidades para contribuir a la mejora del medio ambiente, sin que se provoque deterioro de ninguno de los demás componentes del sistema ambiental, esto con un alto sentido de responsabilidad social y sostenibilidad. Así mismo, se valoró el nivel de afectación al trabajador en las actividades actuales y las posteriores a la ejecución del nuevo proyecto.

---

<sup>12</sup> Los parámetros internos de calidad del a.m.b. S.A. E.S.P., se rigen por las normas y decretos establecidos por el *Ministerio de la Protección Social* y el *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial* para la calidad del agua para consumo humano. [10, 11].

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 ESTUDIO EXPERIMENTAL

**3.1.1 Caracterización del agua cruda en la planta Floridablanca.** Se estudiaron los datos registrados en los informes mensuales de operación de la planta durante los años 2010 y 2011 con el fin de tener una idea aproximada y general del comportamiento físico-químico del agua cruda [2]. La Tabla 1 muestra el promedio para los valores máximos y mínimos de las propiedades a tener en cuenta en este estudio.

**Tabla 1.** Valor promedio de las principales propiedades del agua cruda de la planta Floridablanca.

		VALOR PROMEDIO	
		Máximo	Mínimo
<b>Turbiedad</b>	[NTU]	15893,5	57,3
<b>Color</b>	[UPC]	203	43,32
<b>pH</b>	[Unidades]	7,5	6,8
<b>Alcalinidad</b>	[mg CaCO <sub>3</sub> /l]	30	24
<b>Conductividad</b>	[μS/cm]	66	34

Fuente: Autor.

Para la evaluación de los diferentes coagulantes se recolectaron 37 muestras de agua cruda al azar, a las cuales se les determinaron las propiedades mencionadas en la tabla anterior. El rango de turbiedad de las muestras trabajadas fue de 47,8 y 27730 NTU<sup>13</sup>. Por otra parte, se tuvo en cuenta que el período entre la toma de la muestra y el ensayo fuera mínimo dado que la actividad biológica u otros factores pueden alterar las características del agua por reposo prolongado, por ejemplo su pH; así mismo, para evitar interferencias con la sedimentación se controló la temperatura manteniendo los recipientes retirados de áreas iluminadas generadoras de calor.

<sup>13</sup> Unidad nefelométrica de turbidez, expresada con el acrónimo inglés Nefelometric Turbidity Unit (NTU). Es una unidad utilizada para medir la turbidez de un fluido, es decir, la falta de transparencia de un líquido debida a la presencia de partículas en suspensión.

**3.1.2 Dosis mínima óptima de coagulante, turbiedad residual y color final.** Se siguió el instructivo para la determinación de la dosis mínima óptima de los diferentes coagulantes a cada muestra de agua cruda.

Teniendo en cuenta que los filtros de la planta pueden remover turbiedades desde 10 NTU y así obtener agua tratada que cumpla con los parámetros internos de calidad, las dosis que se muestran en la Figura 2 corresponden a aquellas que permitían conseguir una turbiedad residual por debajo de este valor.

Se puede notar la eficiencia del Mackenfloc II y el Ultrafloc 110, pues permiten obtener agua de buena turbidez residual utilizando dosis menores que los coagulantes SASB<sup>14</sup> y SALB<sup>15</sup>. Los valores alcanzados con dichos coagulantes radican en que estos trabajan independientemente de la alcalinidad y con un rango amplio de pH en el agua cruda, lo que permite un mejor desempeño. Al trabajar con turbiedades iniciales superiores a 4000 NTU se observó una estabilización de la dosis en un rango de 30 a 70 ppm para el Mackenfloc II y 20 a 50 ppm para el Ultrafloc 110, dándole a este último ventaja pues el rango de gasto de coagulante a dosificar es menor.

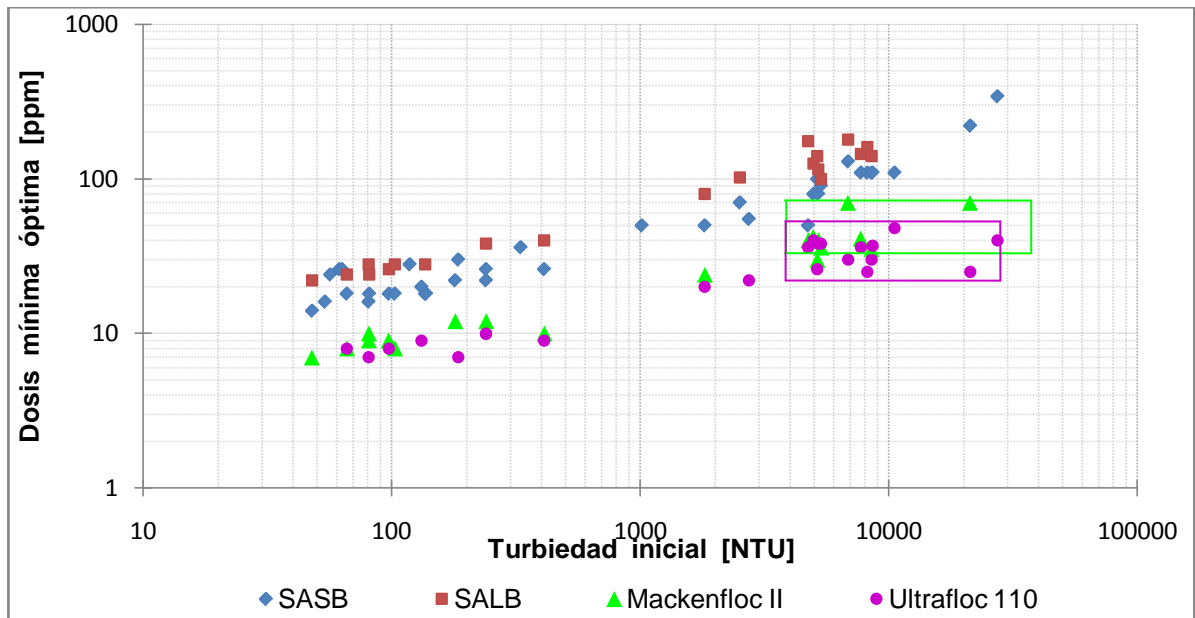
En los ensayos realizados en el laboratorio, se notó que para el SASB la formación de floc era de un tamaño relativamente grande, pero que precipitaba con lentitud ya que no se daba una desestabilización completa del material coloidal, quedando la jarra con un aspecto opaco. Contrario a esto, para el caso del Mackenfloc II y el Ultrafloc 110, se percató un aspecto muy interesante: la velocidad de formación del floc, su gran tamaño y peso. La velocidad de sedimentación con estos productos se alcanzó rápidamente, alrededor de un tiempo de 5 minutos.

---

<sup>14</sup> Sulfato de Aluminio Sólido tipo B (SASB).

<sup>15</sup> Sulfato de Aluminio Líquido tipo B (SALB).

**Figura 2.** Dosis mínima óptima vs. Turbiedad inicial para las muestras de agua cruda estudiadas.



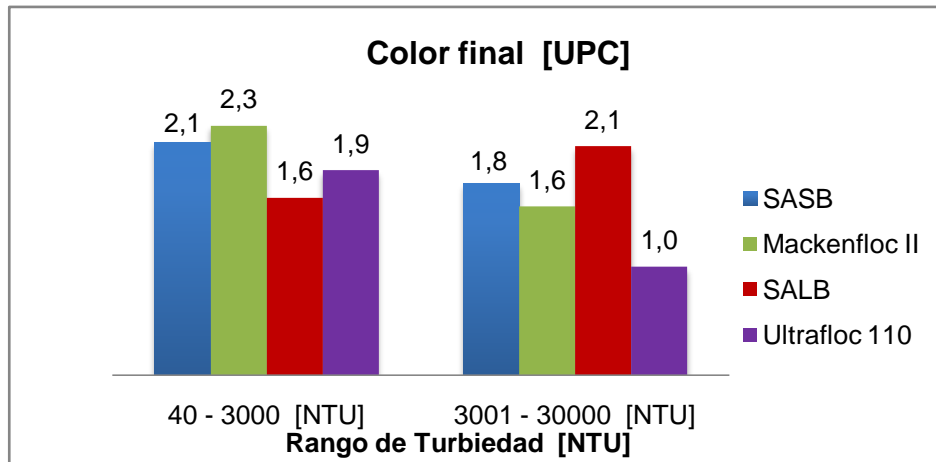
Fuente: *Autor.*

En la Figura 3 se muestra el desempeño de cada coagulante en cuanto a remoción de color de las diferentes muestras de agua cruda. Se puede observar que todos los coagulantes cumplen muy bien con lo estipulado por los parámetros internos, los cuales indican que el color final debe estar por debajo de 10 UPC<sup>16</sup>.

Para el rango de las turbiedades bajas, se ve que es el SALB el que permite mayor remoción de color frente a los otros coagulantes; para el segundo rango, fue el Ultrafloc 110 el que mostró superioridad, pues formaba con más rapidez y eficiencia flóculos con mayor velocidad de sedimentación y poder clarificante, logrando remociones altas de turbiedad y color proporcionando así una mejor calidad del agua. El uso de este coagulante permitiría la eliminación del polímero sintético como ayudante de floculación utilizado en la planta Floridablanca.

<sup>16</sup> Unidades de Platino Cobalto (UPC), es una medida del color que le confieren al agua los materiales contaminantes.

**Figura 3.** Promedio del color final en los ensayos realizados.



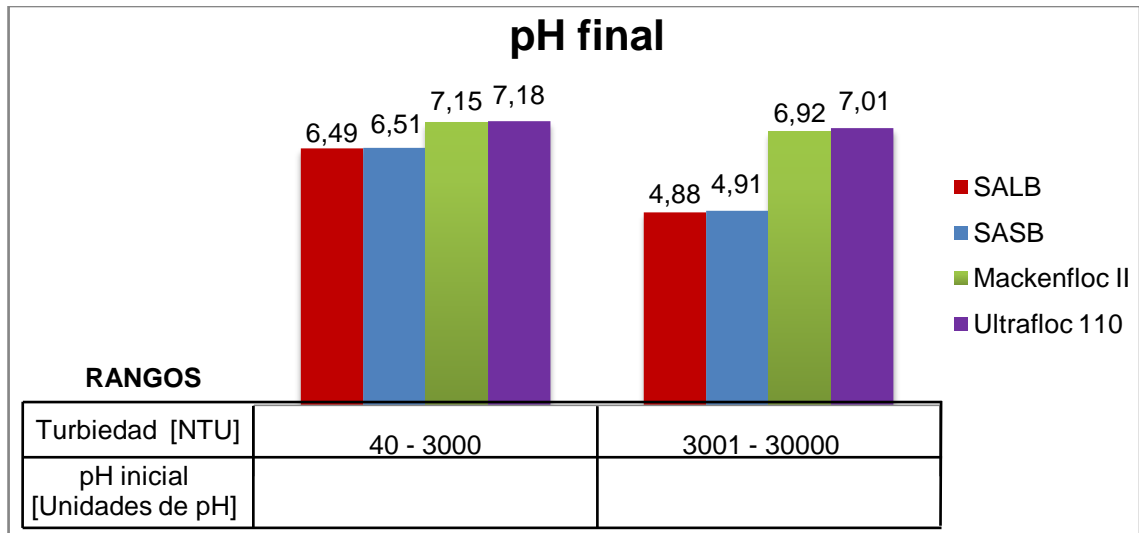
Fuente: *Autor.*

**3.1.3 Influencia del pH.** Uno de los problemas más importantes que causa el uso del coagulante actual (SASB) es la reducción del pH en el agua. Esto trae consigo una acción adicional que es la corrección de este parámetro al final del proceso con el suministro de un alcalinizante, en este caso, la cal.

En el segundo rango de turbiedades de la Figura 4, puede observarse como el SASB y el SALB afectan el pH considerablemente, lo que no sucede con el Mackenfloc II y el Ultrafloc 110. Estos dos últimos coagulantes permiten, en el caso de tener que corregir pH, una disminución en la utilización de cal o el no uso de ésta durante el proceso de potabilización, evitando el riesgo de incrementar la turbiedad en el agua de distribución. Además, los ensayos realizados mostraron, en algunos casos, cierta mejora en esta variable.

El sulfato de aluminio en su presentación sólida y líquida (SASB y SALB) muestra una similar variación en el pH. Lo mismo ocurre entre el Mackenfloc II y el Ultrafloc 110, siendo este último el mejor en los dos rangos de turbiedades.

**Figura 4.** Promedio del valor final del pH con los diferentes coagulantes.

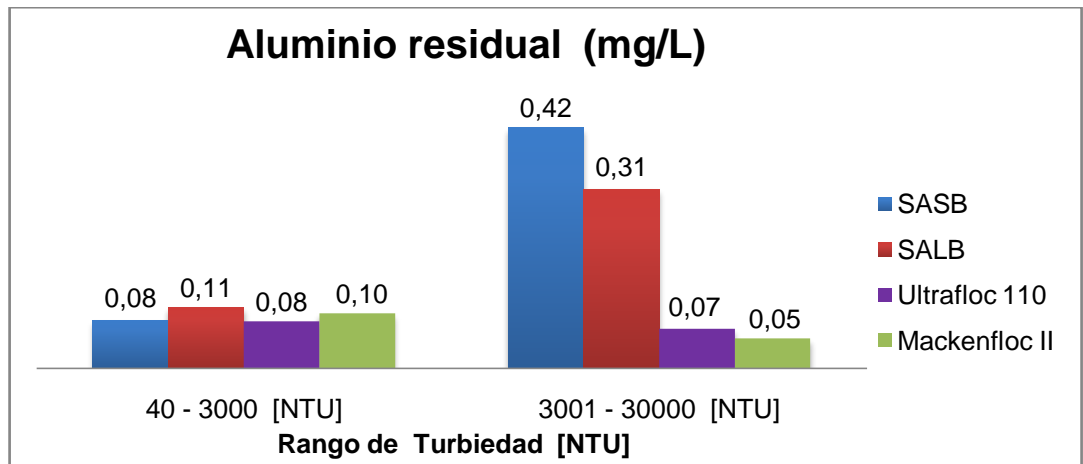


Fuente: *Autor.*

**3.1.4 Aluminio Residual.** La Reglamentación colombiana, basada en la Resolución 2115 de 2007 [11], establece para el aluminio una concentración máxima admisible de 0,2 mg/L. Así mismo, el a.m.b S.A. E.S.P. dentro de sus parámetros internos de calidad recomienda no sobrepasar dicha concentración en el agua potable, evitando también problemas de sabor y olor. Por lo tanto, determinar la cantidad de aluminio libre en el agua es algo muy importante y más aún si se tiene en cuenta que trabajos de investigación realizados anteriormente han mostrado la relación entre la tasa de aluminio en el cerebro y las enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer, demencia senil o Parkinson.

La Figura 5 muestra la variación de la cantidad de aluminio residual en el agua después del proceso de sedimentación en cada prueba. En el primer rango, los resultados obtenidos por cada coagulante no tuvieron una variación considerable y posibilitan obtener agua que cumpla con la concentración de aluminio establecida. En el segundo rango de turbiedades, el SALB no muestra valores altos como el SASB pero tampoco exhibe valores de concentración de aluminio bajos en comparación con los otros dos coagulantes, los cuales presentan los menores niveles de aluminio residual en el agua haciéndolos la mejor opción.

**Figura 5.** Promedio de la cantidad de aluminio residual (mg/L) con los diferentes coagulantes.



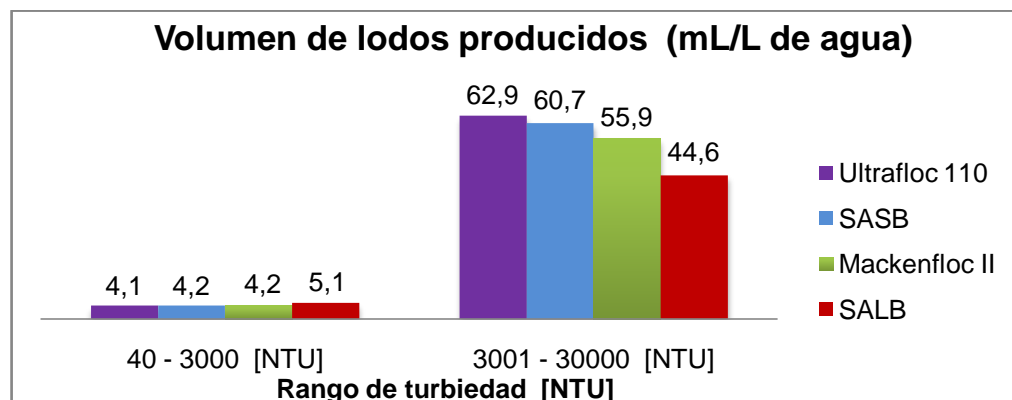
Fuente: *Autor.*

**3.1.5 Volumen de lodos producidos.** Los resultados obtenidos en éste análisis se muestran en la Figura 6. El volumen de lodos producidos es una apreciación subjetiva ya que todos los lodos no sedimentan a la misma velocidad, dado que el tamaño y el peso del floc formado es diferente. También es importante tener en cuenta que el paso del agua de la jarra al cono imhoff<sup>17</sup> ocasiona una ruptura involuntaria de los flóculos restando compactación a los lodos.

Para las turbiedades bajas, se observa que el volumen de lodos producidos por cada coagulante no varía significativamente. Para el segundo rango, se evidencia que el Ultrafloc 110 es el que produce mayor cantidad de lodos en la misma cantidad de tiempo, pero como se mencionó anteriormente, es el coagulante que forma flóculos que sedimentan con mayor velocidad evitando así la sobrecarga en los filtros y reduciendo la cantidad de retrolavados en éstos.

<sup>17</sup> Cono Imhoff: Recipiente cónico transparente de plástico rígido con graduación para medir los mililitros de sólidos sedimentables por litro de agua.

**Figura 6.** Promedio de volumen de lodos producidos (mL) por cada coagulante.



Fuente: Autor.

**3.1.6 Relaciones de reemplazo entre coagulantes.** Durante el desarrollo de los ensayos de jarras, se realizó la rutina de establecer como referencia la dosis óptima con el SASB que permitiera obtener una turbiedad residual por debajo de 10 NTU para cada valor de turbiedad del agua cruda. Teniendo ésta, se compararon diferentes dosis de los demás coagulantes para determinar cuál era la dosis con la que se obtenía un resultado semejante al del SASB.

De acuerdo a los resultados adquiridos con los diferentes ensayos, evaluando agua con distintas características fisicoquímicas, se llegaron a establecer razones de reemplazo del SASB para cada coagulante. Estas equivalencias, de acuerdo a la turbiedad, se presentan en la Tabla 2. El tiempo de seguimiento fue de 6 meses, obteniendo un total de 37 muestras para tratamiento. Los resultados de las pruebas de jarras con las respectivas dosis mínimas óptimas y cálculos se encuentran en el Anexo I.

**Tabla 2.** Razón de reemplazo de coagulantes alternativos de acuerdo a la turbiedad.

REEMPLAZO DE SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO A:		
Sulfato de aluminio líquido tipo B	Mackenfloc II	Ultrafloc 110
1,45	0,45	0,4

Fuente: Autor.

Como se puede observar en la tabla, el SALB es el que presenta la necesidad de mayores cantidades de producto en relación a las utilizadas con su presentación sólida (SASB), aunque lejanas de ser el doble. Seguido a este se encuentra el Mackenfloc II con el cual se reduce el consumo de materia prima aproximadamente a la mitad. Por último, el Ultrafloc 110 con el que se usaría alrededor de la tercera parte de producto coagulante.

El procedimiento de operación de la planta indica iniciar pretratamiento con ayudantes de floculación para aguas con turbiedades superiores a 3000 NTU y en el caso que sobrepase las 4000 NTU suspender el tratamiento [3].

Teniendo en cuenta lo anterior y analizando la respuesta de las variables fisicoquímicas de las muestras de agua recolectadas frente a las diferentes concentraciones de coagulantes utilizadas en las pruebas de jarras, se podría decir que el Ultrafloc 110 es la mejor opción de coagulante a usar<sup>18</sup>, además permite la eliminación del polímero ayudante de coagulación y la no suspensión del tratamiento de agua.

Es importante resaltar que los parámetros evaluados en el agua tratada con los tres coagulantes líquidos, conforme a la Resolución 2115 de 2007 y a los parámetros internos de calidad de la empresa [4], tuvieron un cumplimiento favorable, concluyendo que el proyecto es viable desde este punto de vista.

### **3.2 PRUEBA EN PLANTA**

Durante los días 15 al 18 de Diciembre del 2011, se realizó la prueba en la planta antigua, con el objetivo de mejorar el proceso de coagulación, floculación y sedimentación, reemplazando totalmente el coagulante actual por el coagulante Ultrafloc 110. Mientras tanto, en la planta nueva el tratamiento se continuó con el sulfato de aluminio sólido.

---

<sup>18</sup> La elección del Ultrafloc 110 como mejor opción se basó únicamente en los resultados obtenidos en el laboratorio, sin tener en cuenta el análisis económico.

Como se puede observar en la Tabla 3, los resultados obtenidos muestran que en la planta antigua, el coagulante logró siempre turbiedades residuales bajas cumpliendo con los parámetros de calidad.

**Tabla 3.** Resultados obtenidos de la prueba en planta.

<b>Turbiedad inicial [NTU]</b>		75 - 118	74 - 96	75 - 410	50 - 70
		<b>15 de Dic</b>	<b>16 de Dic</b>	<b>17 de Dic</b>	<b>18 de Dic</b>
<b>Dosis [ppm]</b>		7,97 a 8,01	6,82 a 7,65	7,27 a 12,06	7,74 a 8,01
<b>Turbiedad residual [NTU]</b>	<b>Máx.</b>	6,2	5,6	6,7	5,8
	<b>Mín.</b>	4,6	1,2	3,1	2,2

Fuente: *Autor.*

En las pruebas de laboratorio se observó que el producto tenía la propiedad de formar floc de muy buena contextura, homogéneo y de muy buena sedimentación debido a su peso. Un comportamiento similar se presentó en la planta, permitiéndose que en los sedimentadores el floc no se levantara tan fácil por arrastre del agua y obteniendo así mejor calidad de ésta después del proceso de sedimentación. También se contempló que la velocidad en la formación y sedimentación del floc permitía a la planta una mayor capacidad de tratamiento de agua en caso de que se llegara a necesitar, lo que representa un punto interesante para la empresa.

### **3.3 EVALUACIÓN TÉCNICO – OPERACIONAL**

En la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca, se pondrá en funcionamiento un nuevo sistema de dosificación de coagulantes líquidos más sencillo que el utilizado actualmente, pues se simplifica la operación y el manejo de la materia prima, no hay necesidad de preparación previa del coagulante y todo el producto logra ser utilizado, por consiguiente se evitan las pérdidas que se presentan con el producto actual.

Este sistema estará compuesto por tanques de almacenamiento para la provisión de los productos, tanques aforadores, bombas de desplazamiento positivo de diafragma reciprocante y bombas de trasvase.

**3.3.1 Tanques aforadores y de almacenamiento.** Son tanques cilíndricos verticales, para almacenamiento estático, de fondo plano y cabezal superior abombado, fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio que contrarresta el poder corrosivo presentado por los policloruros de aluminio (PAC). El sistema contará con tres tanques de 30000 L, situados en posición triangular, a la intemperie y apoyados sobre una base plana y uniforme (dique, usado como una medida de seguridad ante algún derrame).

Analizando el consumo de sulfato de aluminio sólido en el período comprendido entre 2010, 2011 y primer trimestre de 2012 (Anexo K) junto con las relaciones halladas en la Tabla 2, se determinó el consumo correspondiente de los coagulantes restantes en el mismo tiempo (Anexo L). Con estos datos y conociendo que cada tanque se llena con 30 toneladas de producto y considerando meses de 30 días, se calculó el tiempo promedio de duración de los insumos en los tanques. La Tabla 4 ilustra estos datos para cada coagulante.

**Tabla 4.** Tiempo promedio de duración de los insumos.

PROMEDIO CONSUMO MENSUAL [Ton]			
	SALB	Mackenfloc II	Ultrafloc 110
	48,77	14,53	13,00
TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL TANQUE			
Meses	0,62	2,06	2,31
Días	18,45	61,93	69,21

Fuente: *Autor.*

Los tanques aforadores son rectangulares de fondo y paredes planas con reborde superior estructural, tapa removible, diseñados para almacenamiento estático y fabricados en poliéster reforzado con fibras de vidrio. Su capacidad es de 3000 L y se contará con dos unidades, uno para cada sub-planta.

**3.3.2 Bombas.** El sistema tendrá dos bombas de dosificación para cada sub-planta, una para las turbiedades bajas y otra para las altas. En total, serán cuatro las bombas necesarias además de las dos bombas de trasvase del insumo químico.

Para la elección de estos equipos se hizo lo siguiente: Tomando la dosis (mg/L) y el caudal de agua a tratar (400 L/s, capacidad máxima de tratamiento de cada sub-planta) se obtuvo la cantidad de coagulante a emplear en mg/s; posteriormente, con éste valor (en unidades de g/s) y la densidad del producto (g/mL), se encontró el volumen de coagulante a dosificar en mL/s. La Tabla 5 ilustra el caudal de dosificación mínimo y máximo de las bombas para cada coagulante juntos a las respectivas dosis.

**Tabla 5.** Caudal de dosificación mínimo y máximos de las bombas, junto a las respectivas dosis.

Rango de Turbiedad	SALB				MACKENFLOC II				ULTRAFLOC 110			
	0 - 3000 [NTU]		3000 - 30000 [NTU]		0 - 3000 [NTU]		3000 - 30000 [NTU]		0 - 3000 [NTU]		3000 - 30000 [NTU]	
	Dosis [ppm]	Caudal [L/h]	Dosis [ppm]	Caudal [L/h]	Dosis [ppm]	Caudal [L/h]	Dosis [ppm]	Caudal [L/h]	Dosis [ppm]	Caudal [L/h]	Dosis [ppm]	Caudal [L/h]
<b>Mín.</b>	20	38,2	80	152,6	5	9,4	25	46,8	5	9,4	20	37,4
<b>Máx.</b>	80	152,6	340	648,7	25	46,8	70	131,0	20	37,4	60	112,3

Fuente: *Autor.*

**3.3.3 Localización de equipos, dispositivos e infraestructura.** Los tanques de almacenamiento estarán ubicados contiguos al taller electromecánico y las cuatro bombas de dosificación con los dos tanques aforadores estarán dispuestos en la terraza adyacente a la bodega de aseo. Las dos bombas de trasvase se ubicarán junto a los tanques de almacenamiento dada la facilidad de llegada a este punto de los carrotanques que contienen el insumo químico, como se observa en el Anexo M.

### 3.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR

**3.4.1 Costo promedio por m<sup>3</sup> de agua tratada con cada coagulante.** De las planillas de operación de la planta Floridablanca se tomaron los valores que corresponden a la cantidad de agua tratada con el SASB en el período comprendido entre el 2010, 2011 y primer trimestre del 2012, también el consumo de insumos químicos (sulfato, cal, cloro); con estos datos se calculó el costo de esas materias primas y con base a ello se dedujo el valor por m<sup>3</sup> de agua tratada con el coagulante actual<sup>19</sup>. El procedimiento se repitió para los otros coagulantes teniendo en cuenta las relaciones de reemplazo y colocando como condición principal que el consumo de cal con el Mackenfloc II y el Ultrafloc 110 es cero, pues en caso de requerirse sería muy mínimo en comparación a la cantidad necesaria con el SASB y el SALB. El resumen del costo promedio por m<sup>3</sup> de agua tratada se encuentra en el Anexo N. La Tabla 6 muestra los costos obtenidos en pesos moneda corriente para cada coagulante.

**Tabla 6.** Costo promedio por m<sup>3</sup> de agua tratada con cada coagulante.

	SASB	SALB	MACKENFLOC II	ULTRAFLOC 110
COSTO PROMEDIO [COP/m <sup>3</sup> ]	22,53	20,81	22,38	21,06

Fuente: *Autor*.

Teniendo en cuenta el resumen de los resultados obtenidos en la etapa experimental mostrado en el Anexo O y cumpliendo con el objetivo de usar coagulantes líquidos sin disminuir la calidad del agua tratada y ahorrando en gastos económicos, se estableció que en las turbiedades bajas (< 3000 NTU) se usará el SALB y para turbiedades altas (> 3000 NTU) el Ultrafloc 110, siendo el siguiente en costo pero en este rango el que permite obtener mejores resultados.

<sup>19</sup> Para el estudio comparativo de costos de tratamiento usando los distintos coagulantes, no se consideraron los costos de agua empleada en retrolavado de filtros, cobro de las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de vertimientos puntuales [9], consumo energético de los diferentes equipos utilizados en el proceso y gastos de transporte de insumos químicos. La evaluación económica preliminar es un análisis actual y no se tuvo en cuenta históricos de precios.

De los tanques de almacenamiento, dos se usarán para el SALB, ya que los valores promedios anuales de turbiedad en la planta Floridablanca se encuentran en el rango abarcado por este producto (Anexo J), y el tanque restante para el Ultrafloc 110.

**3.4.2 Costo de los principales equipos.** Los principales equipos del nuevo sistema de dosificación son los tanques de almacenamiento de los insumos químicos, las bombas dosificadoras y los tanques aforadores. Sus respectivas características de fabricación junto con la cotización hecha a las empresas *Serviclora* y *Fibratore S.A.* se presentan en el Anexo P. La mayor inversión se refleja en la compra de los equipos principales y la obra civil, como se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7.** Costo bombas dosificadoras<sup>20</sup> y tanques de almacenamiento.

EQUIPO	COSTO POR UNIDAD (COP)	CANTIDAD REQUERIDA	COSTO TOTAL (COP)
Bomba 12.1 l/h – 121 l/h	4'048.330	2	8'096.660
Bomba 23.6 l/h – 236 l/h	6'155.680	2	12'311.360
Tanques aforadores	7'609.600	2	15'219.200
Tanque 30000 L	20'242.000	3	60'726.000
Bombas de trasvase*	5'500.000	2	11'000.000
Obra civil	60'000.000	-	60'000.000
		<b>TOTAL</b>	<b>167'353.220</b>

\*El costo de las bombas de trasvase es un valor aproximado.

Fuente: Autor.

### 3.5 EVALUACIÓN AMBIENTAL Y DE SALUD OCUPACIONAL

A continuación, se describen las principales dificultades que presenta la planta Floridablanca respecto a sus insumos químicos:

- ✓ El sulfato de aluminio tipo sólido granular y la cal, poseen partículas muy finas que pueden crear un ambiente de trabajo perjudicial para la salud de los operarios que deben manejar estos insumos químicos, pues son sustancias

<sup>20</sup> El costo de las bombas dosificadoras cotizadas en € se expresó en COP según cierre del euro para el 30 de Marzo de 2012 (2390,37 COP).

irritantes, lesionan las mucosas del sistema respiratorio y pueden causar hemorragias severas. Por esto, los obreros encargados de colocar los productos en las respectivas tolvas de los dosificadores deben utilizar trajes especiales, máscaras y guantes de manera que estén permanentemente protegidos contra la acción de estos compuestos, medidas que no acatan en la mayoría de los casos.

- ✓ El coagulante y la cal están empacados en bolsas de 25 kg, que deben ser transportadas y depositadas en las tolvas por los operarios en cada turno. Para el caso del SASB, la cantidad de bultos aumenta considerablemente cuando las turbiedades son altas, aumentando el desgaste físico de los trabajadores.
- ✓ El SASB genera cierta cantidad de residuos sólidos después de preparadas las soluciones, con la subsiguiente necesidad de su disposición final y el riesgo de daño a los equipos, sumado a esto, los sacos vacíos (del SASB y la cal) son organizados en paquetes de 100 unidades y entregados a la empresa Ecorecicla Ltda. para su reciclaje.

Teniendo en cuenta lo anterior, los coagulantes líquidos se convierten en una alternativa viable, pues mitigan e incluso eliminan los conflictos ocasionados por el coagulante actual, debido a:

- ✓ Ambientalmente, el no uso del coagulante sólido granulado y la disminución del consumo de cal es una ventaja debido a la reducción del material particulado en el aire.
- ✓ El operador no tendrá contacto directo con los coagulantes líquidos, puesto que serán despachados del carrotanque al tanque de almacenamiento evitando accidentes y desgaste físico.
- ✓ El uso de estos productos líquidos evita la generación de desechos sólidos, por lo que no habrá que realizar el manejo de la disposición final de los mismos y se evitará que estos residuos puedan llegar a dañar los equipos dosificadores; únicamente se dispondrá de los sacos vacíos de cal, los cuales serán una menor cantidad a la generada actualmente.

#### 4. CONCLUSIONES

- El uso de coagulantes poliméricos trae como resultado la reducción marcada de la dosis de coagulante para producir agua de la misma o mejor calidad que la tratada con una dosis superior de sulfato de aluminio sólido. Además, en turbiedades altas, logran mantener el pH incluso con dosis elevadas de coagulante reduciendo o eliminando el suministro de cal para la neutralización, los valores de aluminio residual están muy por debajo de los obtenidos con el sulfato de aluminio sólido y la remoción de color es mejor. Estos productos son una excelente alternativa para el tratamiento de la fuente de la planta Floridablanca teniendo en cuenta sus problemas de bajo pH y alcalinidad, ya que estos productos son independientes de esas variables.
- Desde el punto de vista técnico, el almacenamiento y dosificación de coagulantes líquidos son de relativa facilidad, adicional a esto, la planta Floridablanca cuenta con el espacio necesario para la ubicación de los mismos.
- Económicamente, el costo por m<sup>3</sup> de agua tratada es más bajo cuando se usa para la potabilización el sulfato de aluminio líquido, seguido del Ultrafloc 110, lo cual resulta favorable pues son los coagulantes escogidos para los nuevos retos en tratabilidad de agua potable. Conjuntamente, el valor de la inversión del proyecto cercana a los 170'000.000 COP, es reducida al confrontarla con la contribución que genera en el mejoramiento del tratamiento del agua.
- En términos ambientales y de salud, los problemas que trae el uso del sulfato de aluminio sólido, como las partículas finas que se encuentran en el medio laboral y que constituyen un eminente riesgo para los trabajadores, sumado a la vulnerabilidad a la que se exponen de sufrir lesiones ocupacionales propias de su actividad, pueden llegar a ser eliminados con el uso de los coagulantes líquidos, ya que la interacción entre estos y los operadores es casi nula. Además, la disposición final de los sacos que contienen el insumo coagulante actual sería abolida.

## **5. RECOMENDACIONES**

Hoy en día las aguas naturales se han ido degradando por diversas circunstancias, y a la vez hay mayor conciencia y presión medioambiental y legislativa, es por esto que se recomienda el estudio o el tratamiento de los lodos obtenidos en las plantas de tratamiento (tanto en los sedimentadores como en el lavado de filtros), cuyo objetivo podría ser extraer la materia sólida y obtener efluentes sin lodos, los cuales podrán ser vertidos al cauce o bien enviados a la entrada de la planta de tratamiento de agua potable, junto al agua cruda. [14, 21, 28]

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A E.S.P. Instructivo de operación del sistema de captación y suministro de agua cruda del sistema Río Frío a la planta Floridablanca. IPT 702-001. Procesos para la potabilización del agua.
  
- [2] ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A E.S.P. Planillas de Operación de la planta Floridablanca. 2008-2012.
  
- [3] ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A E.S.P. “P TR 701-002. Procedimiento de operación planta de tratamiento”. Abril del 2009.
  
- [4] ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A E.S.P - Sistema de gestión integral. Plan de calidad. 2009.
  
- [5] ANDÍA, Yolanda; Tratamiento de agua coagulación y floculación, SEDAPAL, 2010.
  
- [6] ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Bogotá D.C : McGraw-Hill, 2000.
  
- [7] BARRENECHEA, Ada; Aspectos Físicoquímicos de la calidad del agua, Capítulo1, 3, 4. Disponible en la red global mundial:  
[www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/uno.pdf](http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/uno.pdf).

- [8] COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del Hidroxicloruro de Aluminio. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [9] COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto 901 (4 de Abril de 1997). Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se establecen las tarifas de éstas. Diario Oficial. Bogotá D.C., 1997.
- [10] COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto 1575 (9 de Mayo de 2007). Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Bogotá D.C, No. 46.632, 2007.
- [11] COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115 (4 de Julio de 2007). Por medio de la cual se señalan Características, Instrumentos Básicos y Frecuencias de Sistema de Control y Vigilancia paa la Calidad del Agua para Consumo Humano. Diario Oficial. Bogotá D.C., No. 46.679, 2007.
- [12] DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P. "G PT 706-001. Guía Métodos Analíticos Plantas de Tratamiento". 2009.

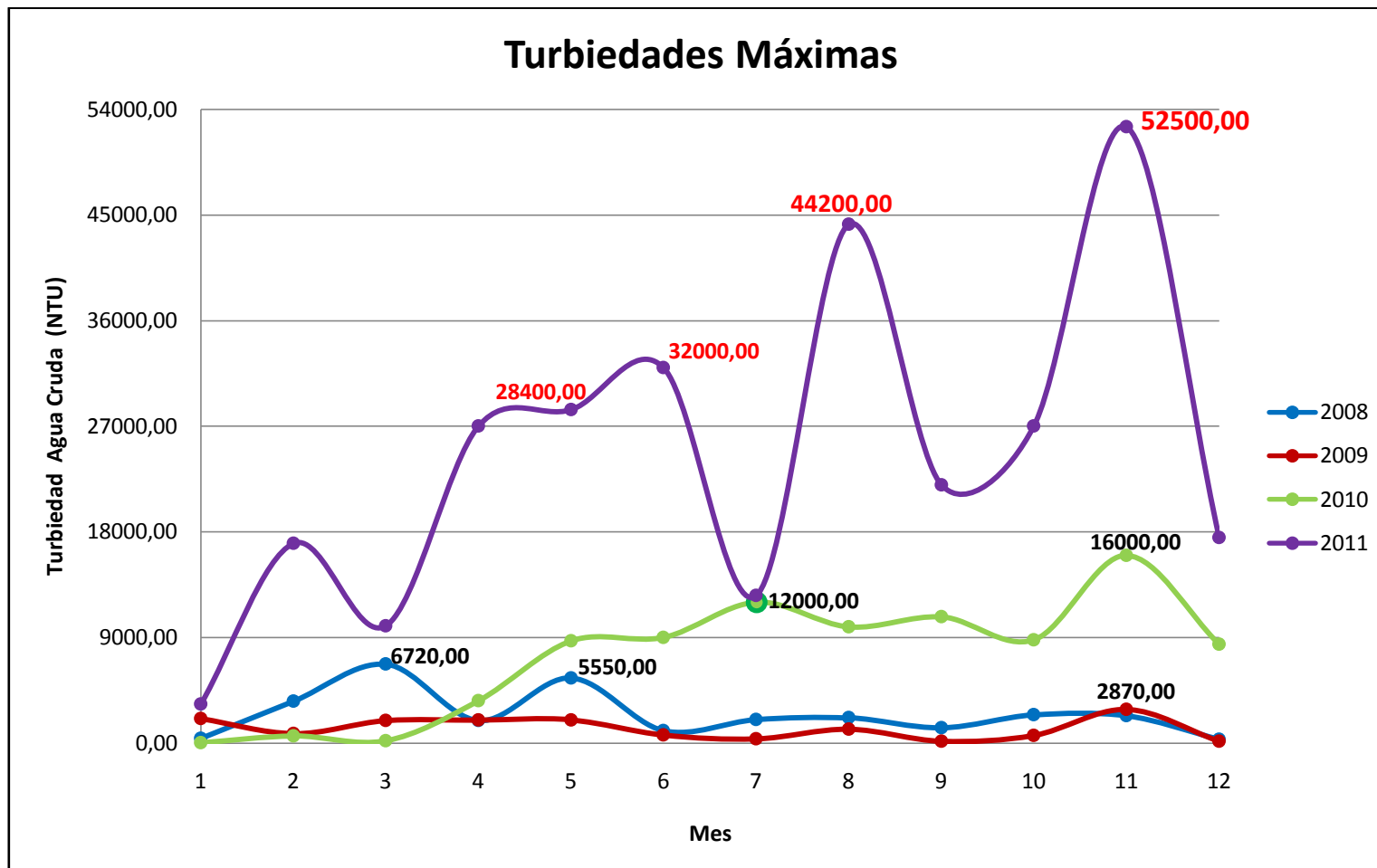
- [13] DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P. "I TR 705-006. Instructivo Determinación Dosis Óptima de Coagulante". 2004.
- [14] GARCÉS, Fernando; DÍAZ, Juan Carlos; DELLEPIANE, Oscar Manuel; Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable, Disponible en la red global mundial:  
[www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/mexico/02263e09.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/mexico/02263e09.pdf).
- [15] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. Procedimiento para el ensayo de Coagulación-Floculación en un recipiente con agua ó Método de Jarras. Bogotá D.C : Norma Técnica Colombiana 3903. ICONTEC, 2001.
- [16] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. Productos Químicos. Policloruro de aluminio líquido para tratamiento de Agua Potable. Bogotá D.C : Norma Técnica Colombiana 4760. INCONTEC, 2001.
- [17] KAWAHARA, Masahiro; Effects of aluminum on the nervous system and possible link with neurodegenerative diseases. EN: Journal of alzheimer's disease; 2005, P 171-182.
- [18] PEREZ, Jorge Arturo. Manual de Potabilización del Agua. Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 1990.

- [19] PERNITSKY, D.J. AND EDZWALD, J.K. Selection of alum and polyaluminum coagulants: Principles and applications. EN: Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 2006, P. 121–141.
- [20] PERRY, George, P.Perl and Sharon Moalem. Alzheimer's Disease: Aluminum and Alzheimer's disease, a personal perspective after 25 years. EN: A Century of Scientific and Clinical Research. 2006, P. 291-300.
- [21] RAMIREZ, Francisco; Lodos producidos en el tratamiento de agua potable, España, 2009.
- [22] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Sistemas de Potabilización. Aspectos Generales de los Sistemas de Potabilización. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Bogotá D.C : Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico –RAS, 2000.
- [23] RESTREPO, Hernán Alonso; Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable, Universidad Nacional De Colombia, 2009.
- [24] RODRÍGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Agua. Bogotá D.C, EN: Oficina de Publicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 1995.

- [25] ROMERO, Carlos; SOLÓRZANO, Rafael; ABREU, Omar; BRIZUELA, Luis y PÉREZ, Zuleima. Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua. EN: Revista INGENIERÍA UC, Vol. 14. Valencia, Venezuela. 2007.
- [26] SANGRADOR, Fontecha, R.; GUTIÉRREZ, Fernández, Y.; RIVAS, Gonzalo, J.C; Ensayos con distintos coagulantes para reducir el aluminio residual en agua potabilizada. EN: Revista Tecnología del agua, 1999.
- [27] TZOUPANOS, N.D., ZOUBOULIS, A.I. AND TSOLERIDIS, C.A. A systematic study for the characterization of a novel coagulant (polyaluminium silicate chloride). EN: Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Volume 342, Issues 1-3, 2009, P. 30-39.
- [28] VILLEGAS, Juan David; Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua, EN: Scientia et Technica Año XI No 28 UTP. ISSN 0122-1701, 2005.
- [29] ZBIGNIEW W., Kundzewicz; BRYSON, Bates; SHAOHONG WU, Jean Palutikof; El cambio climático y el agua. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 2008.
- [30] -----, -----. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS: ALCALINIDAD. Disponible en la red global mundial:  
<http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcalinidad.pdf>.

## ANEXO A. VARIACIÓN DE LOS VALORES DE TURBIEDAD MÁXIMA - AÑOS 2008 A 2011

Figura A.1 Valores de turbiedad máxima desde el 2008 hasta el 2011.

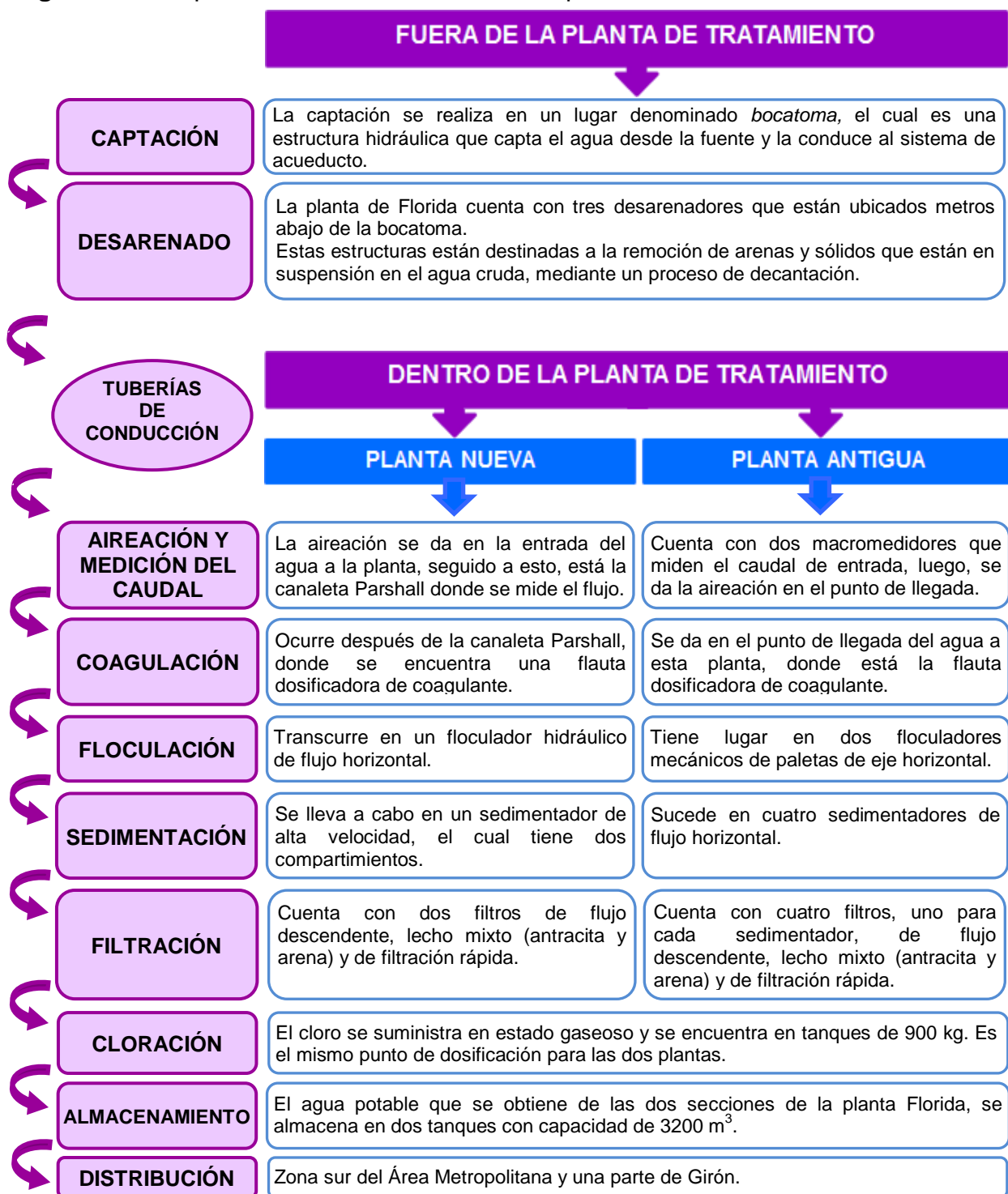


Fuente: Autor.

ANEXOS

## ANEXO B. ETAPAS DE TRATAMIENTO EN CADA SUB-PLANTA

Figura B.1. Etapas de tratamiento en cada sub-planta.



Fuente: Autor.

## DESCRIPCIÓN DE LAS PRÍNCIPALES ESTRUCTURAS

### **A. Desarenadores**

La mayoría de las corrientes de agua arrastran una gran variedad de materiales de diversos tamaños como piedra, arena, arenilla, entre otros. Es necesario separar o sedimentar estos materiales después de la captación, con el fin de evitar la obstrucción de las tuberías y su rápido deterioro debido al rozamiento producido con la superficie interna de la tubería (abrasión).

La eficiencia del desarenador depende principalmente de la repartición uniforme del caudal a todo lo ancho del tanque, del área superficial y del tamaño de las partículas que se desea sedimentar. Debe disponer de un sistema mecánico para extraer el sedimento cuando su volumen ha llegado a su valor máximo.

### **B. Canaleta Parshall – Flautas Dosificadoras**

Estructura hidráulica cuyo objetivo es servir como estructura de aforo, es decir, permitir medir el caudal de agua que ingresa diariamente a la planta con el fin de poder llevar una medición y a su vez un mejor control de los procesos. Está constituida por tres partes fundamentales que son la entrada, la garganta y la salida.

### **C. Floculador Hidráulico de Flujo Horizontal**

Es una estructura de concreto provista de una serie de tabiques o separaciones de concreto o de otro material, dispuestos de tal manera que forman una serie de canales a través de los cuales el agua hace un recorrido de ida y vuelta.

### **D. Floculador de paletas de eje horizontal**

Son tanques provistos de un sistema mecánico de agitación, el cual le comunica al agua la energía necesaria para asegurar una mezcla lenta.

### **E. Sedimentador de alta velocidad**

Consisten en una serie de tubos circulares o cuadrados, o de láminas planas paralelas colocadas en un tanque con un ángulo de inclinación. El agua fluye en forma ascendente por estos tubos o por los canales que forman las placas, con flujo laminar, de manera que los lodos se van depositando sobre la superficie de estos elementos. La inclinación de los tubos o de las placas es de 60° normalmente.

Debido a la fuerte inclinación de los tubos o de las placas, el floc sedimentado se desliza sobre la superficie y cae al fondo del tanque. Un sistema mecánico conduce los lodos al sitio de salida o de desagüe.

### **F. Sedimentador de flujo horizontal**

Son tanques en los cuales el agua entra por un extremo, se mueve longitudinalmente, y sale por el otro extremo. En general, la longitud de estos sedimentadores es grande en relación con las demás dimensiones. La velocidad del agua debe ser baja para impedir el arrastre de lodos.

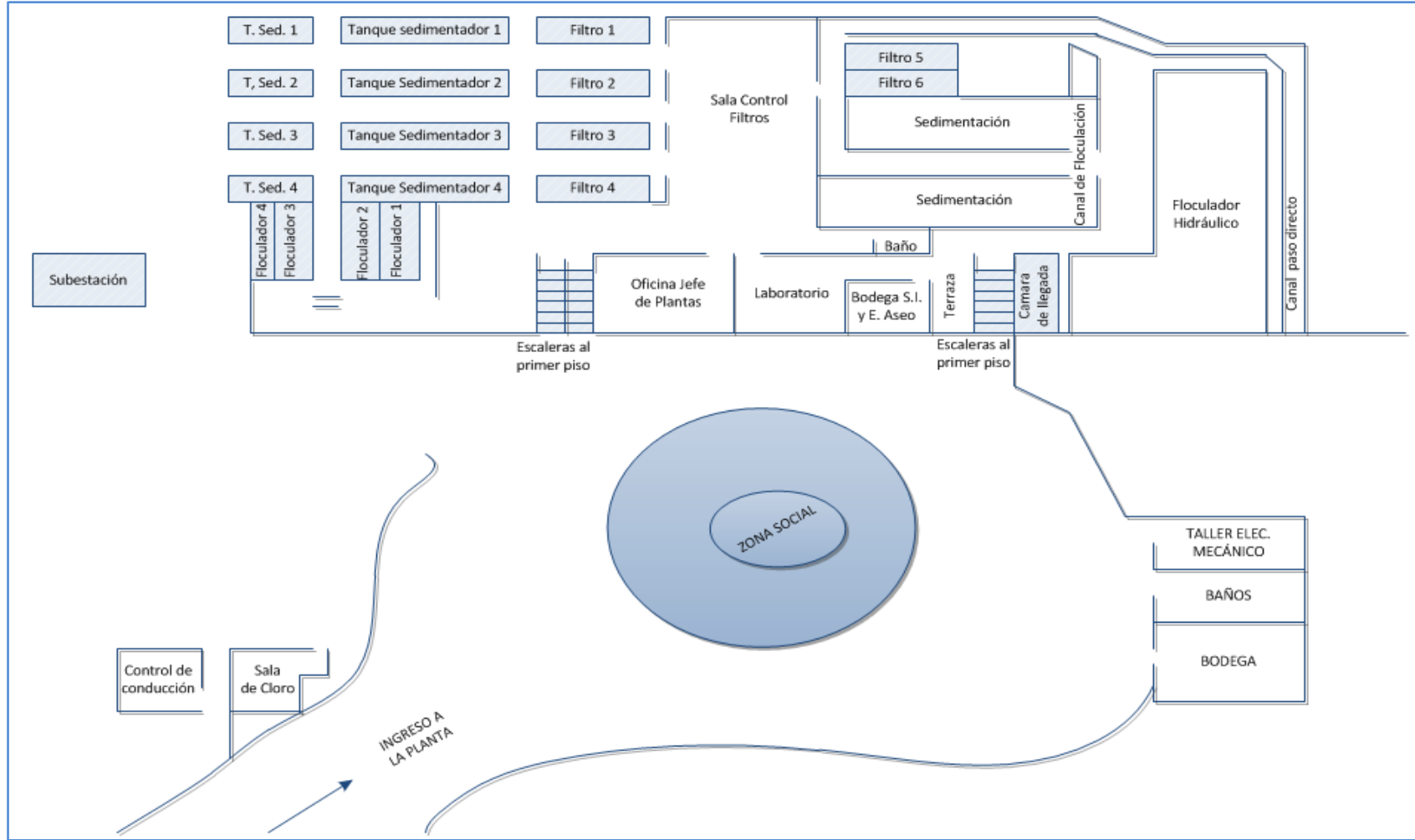
### **G. Filtros de flujo descendente, lecho mixto y filtración rápida.**

Son aquellos que utilizan el flujo del agua hacia abajo y poseen un medio filtrante formado por dos materiales, usualmente antracita y arena. Esto último es una de las razones por la cual el tiempo de filtración es más rápido.

Fuente: RODRÍGUEZ PEÑA, Carlos. *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Agua*. Bogotá D.C : Oficina de Publicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 1995. [24]

### ANEXO C. ESQUEMA GENERAL DE LA PLANTA

Figura C.1. Vista superior de las sub-plantas de tratamiento.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

## ANEXO D. FACTORES INFLUYENTES EN EL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN

### FACTORES INFLUYENTES EN EL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN

1. *Tipo de partícula* : En el caso del tratamiento de aguas naturales siempre se considerará que se trata de partículas *discretas*<sup>21</sup>, las cuales no presentan ninguna interacción entre ellas, no cambian de tamaño, forma o densidad, es decir, sedimentan de manera libre o independiente.
2. *Velocidad de sedimentación*: Existen fuerzas que determinan la velocidad de sedimentación de la partícula cuando el agua está en reposo: la fuerza debida a la acción de la gravedad y que determina el movimiento descendente; la fuerza de empuje, que experimenta todo cuerpo sumergido en un líquido y, la fuerza de rozamiento, debida a la fricción de la superficie de la partícula con el medio líquido, siendo estas dos últimas dirigidas hacia arriba. Además, en el sedimentador el agua fluye con una velocidad horizontal que trata de llevarse consigo las partículas, por lo cual la velocidad con la que sedimentan las partículas es la velocidad resultante de las antes mencionadas.
3. *Velocidad del agua*: En el sedimentador, el agua fluye a una velocidad horizontal que depende del caudal del agua que va entrando al tanque y las dimensiones de éste. Por consiguiente, entre mayor sea la velocidad del agua, arrastrará las partículas y va a ser más difícil que lleguen al fondo del tanque.
4. *Temperatura del agua*: La variación de algunas propiedades como la densidad y la viscosidad es determinada por la temperatura. Si la temperatura es baja, la viscosidad aumenta y la fuerza de rozamiento también aumenta, como consecuencia, la velocidad de sedimentación disminuirá. [24].

---

<sup>21</sup> Existen otro tipo de partículas denominadas *Floculentas* o *Precipitantes*, las cuales no sedimentan en forma independiente sino que tienden a formar partículas de mayor tamaño, conglomerados o masas de volumen bastante grande. Existe entonces una interacción entre las partículas y su forma de sedimentación.

## **ANEXO E. MÉTODOS ANALÍTICOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DEL A.M.B. S.A. E.S.P.**

Los métodos analíticos se aplican a las prácticas de determinaciones de los parámetros físico-químicos del agua a analizar y están estandarizados para los laboratorios de las Plantas de Tratamiento de Agua Potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

En este proyecto se hicieron análisis de parámetros como turbiedad, pH, conductividad, color, alcalinidad y aluminio residual. Los respectivos procedimientos para encontrar el valor de cada uno de ellos se describen a continuación.

### **DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD**

Se toma una muestra del agua a analizar (Sea cruda o tratada) en un vaso de precipitado y se agita, luego se transvasa la muestra a la celda del equipo hasta el aforo (Aproximadamente 30 ml).

Se toma la celda por la tapa y se agita por inmersión para eliminar las burbujas de aire, además, se debe limpiar la celda con un paño para evitar que las huellas o rastros dejados en la superficie alteren el resultado.

Se coloca la celda dentro del compartimiento del equipo y se cierra la tapa de este.

Se enciende el equipo, se presiona ENTER y el primer dato que aparezca en la pantalla es el valor de la turbiedad del agua.

La lectura es directa y los resultados se expresan en unidades NTU (Unidades de turbiedad nefelométricas).

Para valores mayores de 4000 NTU se deben hacer diluciones y multiplicar el resultado del equipo por el factor de dilución.

(Equipo: Turbidímetro HACH 2100 N).

## **DETERMINACIÓN DE pH**

Se enciende el equipo y se lava cuidadosamente el electrodo con agua destilada. Se toma una muestra de 100 ml del agua a analizar (Sea cruda o tratada) en un vaso de precipitado y se sumerge el electrodo del equipo. Cuando se estabilice la lectura, ese es el dato que se debe registrar y expresar en unidades de pH.

(Equipo: pHmetro ORION 3 Star, pH Benchtop).

## **DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD**

La conductividad solo se determina al agua sin tratar.

Se debe iniciar encendiendo el equipo y lavando cuidadosamente el electrodo con agua destilada.

Para determinar esta propiedad, se toma una muestra de 100 ml del agua cruda a analizar en un vaso de precipitado y se sumerge el electrodo del equipo.

Importante observar que en la cámara del electrodo no queden burbujas de aire atrapadas, para evitar esto se sugiere sumergirlo dos o más veces en la muestra.

En el equipo se selecciona el modo de medida de conductividad y se registra el dato proporcionado por este en unidades de  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

(Equipo: Conductímetro Orion 3 Star, Conductivity Benchtop).

## **DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD TOTAL**

La determinación de la alcalinidad total solamente se hace para el agua sin tratar.

En un vaso de precipitado (De 100 ml) se debe tomar una muestra de 50 ml del agua cruda. Se agregan 4 gotas de indicador mixto rojo de Metilo Bromocresol y se observa una coloración azul.

Lista el agua con el indicador, se somete el vaso de precipitado a agitación constante y se titula con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.02 N, hasta que se perciba un color durazno.

Para saber el valor de la alcalinidad, se aplica la siguiente fórmula:

$$mg\ CaCO_3/L = \frac{Vol.\ H_2SO_4 \times N \times 50 \times 1000}{Vol.\ Muestra\ agua\ cruda} = Vol.\ H_2SO_4 \times 20$$

La fórmula anterior es válida únicamente cuando se toman 50 ml de muestra.

### DETERMINACIÓN DE COLOR REAL

La determinación del color real se hace para el agua cruda y el agua tratada.

Se toma una muestra representativa en una jeringa (60 ml) del agua a analizar y se ajusta una membrana Millipore de 0.45 µm para hacer la filtración.

Mínimo 25 ml de muestra para cada determinación de color.

En el espectrofotómetro se elige el programa “Color. Longitud de onda: 455 nm” y en la celda del equipo se lee primero un *blanco* de agua destilada para ajustar el cero, luego, se bota el blanco y se transvasa la muestra del agua ya filtrada a la celda hasta el aforo de llenado, se coloca dentro del compartimiento del equipo y se cierra la tapa de este.

La lectura es directa y los resultados se expresan como UPC (Unidades Platino Cobalto).

Para valores mayores de 500 UPC se deben hacer diluciones.

***Para la determinación del color aparente, se realiza el mismo procedimiento pero la muestra del agua a analizar no se filtra.***

(Equipo: Espectrofotómetro HACH DR-2800).

### DETERMINACIÓN DE ALUMINIO RESIDUAL

La determinación del Aluminio Residual se hace por el método espectrofotométrico (Eriocromo Cianina R.).

Para iniciar, se deben tomar dos probetas de 25 ml. Una para usar como *blanco* y otra para la *muestra del agua tratada*.

En la probeta del blanco se miden 12.5 ml de agua destilada y en la otra se miden 12.5 ml de la muestra.

A cada recipiente se adiciona 1 ml de Ácido Sulfúrico 0.02 N, 1 ml de solución de Ácido Ascórbico 0.1% (recién preparado), 5 ml de solución buffer (Acetato de Sodio-Ácido Acético) y 2.5 ml de indicador Eriocromo Cianina, además de eso, a la probeta que contiene el blanco se le debe adicionar 1 ml de EDTA 0.02 N. Por último, se aforan los recipientes a 25 ml con agua destilada y se agitan.

Hecho lo anterior, se esperan de 8 a 10 minutos para el desarrollo del color.

Finalmente, se elige en el espectrofotómetro el programa “Aluminio Residual. Longitud de onda: 535 nm” y se transvasa primero el blanco a la celda del equipo hasta el aforo de llenado para ajustar el cero, después de vaciar la celda, se agrega la muestra del agua tratada y se toma el dato que indica el equipo.

La lectura es directa y los resultados se expresan como mg/L  $Al_2$  residual.

(Equipo: Espectrofotómetro HACH DR-2800).

### **DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LODOS PRODUCIDOS**

Se realiza con el fin de conocer la cantidad de sólidos suspendidos que el agua pueda contener y los cuales se remueven durante el proceso de tratamiento.

Una vez encontrada la jarra a la cual pertenece la dosis mínima óptima de coagulante (jarra óptima), se procede a verter el contenido de la misma en un cono imhoff. Se espera una hora y se lee el volumen de lodos producidos por litro de agua directamente en la graduación del cono.

(Cono Imhoff: Recipiente cónico transparente de plástico rígido con graduación para medir los mililitros de sólidos sedimentables por litro de agua.).

Fuente: Departamento de control de calidad del agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. “G PT 706-001. Guía Métodos Analíticos Plantas de Tratamiento”. Enero del 2009. [7, 12]

## ANEXO F. PRUEBA DE JARRAS

La prueba de jarras es una herramienta fundamental en el proceso de potabilización, ya que permite determinar la dosis adecuada de productos químicos con mejor resultado respecto a la calidad del agua, para aplicar en la planta. Además, es posible conocer el valor del pH óptimo de coagulación (El cual permite la formación de los flóculos y no es igual para todas las aguas).

Este ensayo de laboratorio tiene como objetivo simular las condiciones de operación en que se realizan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en la planta.

El equipo para la prueba de jarras consta de un agitador múltiple de velocidad variable que puede crear turbulencia simultánea en seis (6) vasos de precipitados cuyo volumen puede ser de 1000 ml ó 2000 ml. (*Equipo clarificador PHIPPS & BIRD*).

Además del equipo, se debe disponer de una solución madre (Concentración al 10% p/v de coagulante) la cual se prepara con el coagulante usado en la planta. A partir de esta solución, se prepara la solución de trabajo (Concentración al 1% p/v), la cual es utilizada en el ensayo de jarras. (Norma Técnica Colombiana 3903 [15]). Para el caso de los coagulantes líquidos, no es necesaria la preparación de soluciones previas al ensayo ya que estos productos se encuentran listos para dosificar directamente a las jarras.

En la planta Floridablanca, donde se dosifica sulfato de aluminio sólido, la *solución madre al 10%* se prepara de la siguiente manera:

1. Pesar 10 g de sulfato sólido.
2. Disolver con agua destilada y agitar.
3. Aforar con agua destilada en una probeta hasta completar un volumen de 100 ml.

El tiempo máximo de preservación de la solución madre de Sulfato de Aluminio es de un (1) mes.

Para obtener la *solución de trabajo al 1%* se procede de la siguiente manera:

1. Agitar la solución madre de sulfato de aluminio.
2. Tomar 10 ml de la solución madre de Sulfato de Aluminio en una pipeta.
3. Aforar con agua destilada en una probeta hasta completar un volumen de 100 ml.

El tiempo máximo de preservación de la solución de trabajo es de ocho (8) horas.

En caso de necesitar un volumen mayor de solución de trabajo se debe tener en cuenta la proporcionalidad de las cantidades anteriores.

Antes de iniciar el ensayo de jarras se debe hacer el análisis físico-químico a la muestra del agua cruda (mínimo 7 litros), el cual consiste en la determinación de turbiedad, color, pH, alcalinidad y conductividad. A partir de este análisis se establecen las cantidades aproximadas de coagulante que se aplicarán en el ensayo. Los recipientes en los cuales se vierten las muestras de agua cruda deben lavarse previamente con esa misma agua.

A continuación, se mide el volumen de la jarras (1 ó 2 L) cuidando que todas tengan el mismo volumen. Se encienden los deflectores y se introducen las paletas del equipo de manera que los ejes de las paletas bajen totalmente y estén bien centradas, luego se ponen a funcionar durante un (1) minuto a 100 rpm con el fin de simular la etapa de agitación del agua a la entrada de la planta.

Pasado el minuto se dosifica la solución de trabajo (con jeringas desechables que correspondan a cada jarra del ensayo) en cantidades progresivas, profundamente dentro de la muestra junto al eje de las paletas. Los coagulantes deben suministrarse en el mismo orden en que se agregan en la planta de tratamiento (Coagulante – Ayudante de coagulación cuando es necesario) y simultáneamente a todas las jarras.

Hecha la dosificación, se contabiliza un (1) minuto con la misma velocidad de agitación (100 rpm) para simular la mezcla rápida. Es importante asegurar que la solución del coagulante no se deje caer en la superficie del agua al momento de dosificar pues esto desmejora la eficiencia de la mezcla rápida.

Finalizada la mezcla rápida, se disminuye la velocidad de los agitadores a 40 rpm durante quince (15) minutos con el fin de representar el proceso de floculación. Transcurrido ese tiempo, se suspende la agitación y se extraen los agitadores, dejando sedimentar el agua durante quince (15) minutos.

Realizado lo anterior se da por terminado el ensayo y se procede a tomar muestras a cada una de las jarras para determinar el valor de turbiedad, pH u otro parámetro (De acuerdo a los requerimientos de la planta). Para obtener las muestras se usan jeringas desechables (60 ml) y se debe asegurar que estas sean tomadas a la misma altura para todas las jarras.

No se deben dejar los recipientes sobre la base con el deflector prendido, ya que por su poco volumen la temperatura del agua cambia rápidamente y puede causar resultados inconsistentes en el ensayo.

Los tiempos usados en la prueba de jarras se determinan a partir de los tiempos que gastan los procesos de agitación (Mezcla rápida), floculación (Mezcla lenta) y sedimentación en la planta de tratamiento.

Fuente: Departamento de control de calidad del agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. "I TR 705-006. *Instructivo Determinación Dosis Óptima de Coagulante*". Noviembre del 2004. [13, 15]

## ANEXO G. DETERMINACIÓN DOSIS MÍNIMA ÓPTIMA DE COAGULANTE

La dosis óptima de coagulante es aquella con la cual se produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales del agua en la planta, favoreciendo la formación de floc y su posterior retención en los sedimentadores y filtros.

Esta dosis se puede determinar una vez realizado el ensayo de jarras para cierta muestra de agua.

Para iniciar se toma muestra de agua cruda en el sitio de entrada a la planta y se determinan sus propiedades fisicoquímicas (Turbiedad, pH, color, conductividad y alcalinidad). Conociendo los datos anteriores se dispone a hacer la prueba de jarras. Finalizado el ensayo, se determina a cada jarra los valores de turbiedad, pH, color y aluminio residual.

Se tomará como *jarra óptima* aquella que presente un floc que sedimente totalmente dejando el sobrenadante cristalino en el menor tiempo posible, y que presente una *turbiedad alrededor de 5 NTU y un pH de 7*. Además, sus valores de *color y aluminio residual* no pueden exceder de *10 UPC y 0.2 mg/L* respectivamente (Parámetros internos de calidad).

Los datos de color y aluminio residual solo se pueden tomar cuando el agua ha completado su proceso de tratamiento, de tal forma, una vez finalizado el ensayo de jarras se debe simular el proceso de filtración. Para esto se toma una muestra de cada jarra y se pasan por un medio filtrante (Membranas Millipore de 0.45  $\mu\text{m}$ ), a continuación se mide el color y se prepara cada muestra para la determinación del aluminio residual.

Fuente: Departamento de control de calidad del agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. "I TR 705-006. *Instructivo Determinación Dosis Óptima de Coagulante*". Noviembre del 2004. [13]

## ANEXO H. PARÁMETROS INTERNOS DE CALIDAD

**Figura H.1.** Parámetros internos de calidad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.



Fuente: ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A E.S.P. *Sistema de gestión integral. Plan de calidad.* [4]

Los parámetros internos de calidad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, se rigen por las normas y decretos establecidos por el *Ministerio de la Protección Social* y el *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial* para la calidad del agua para consumo humano. [10]

## ANEXO I. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE JARRAS

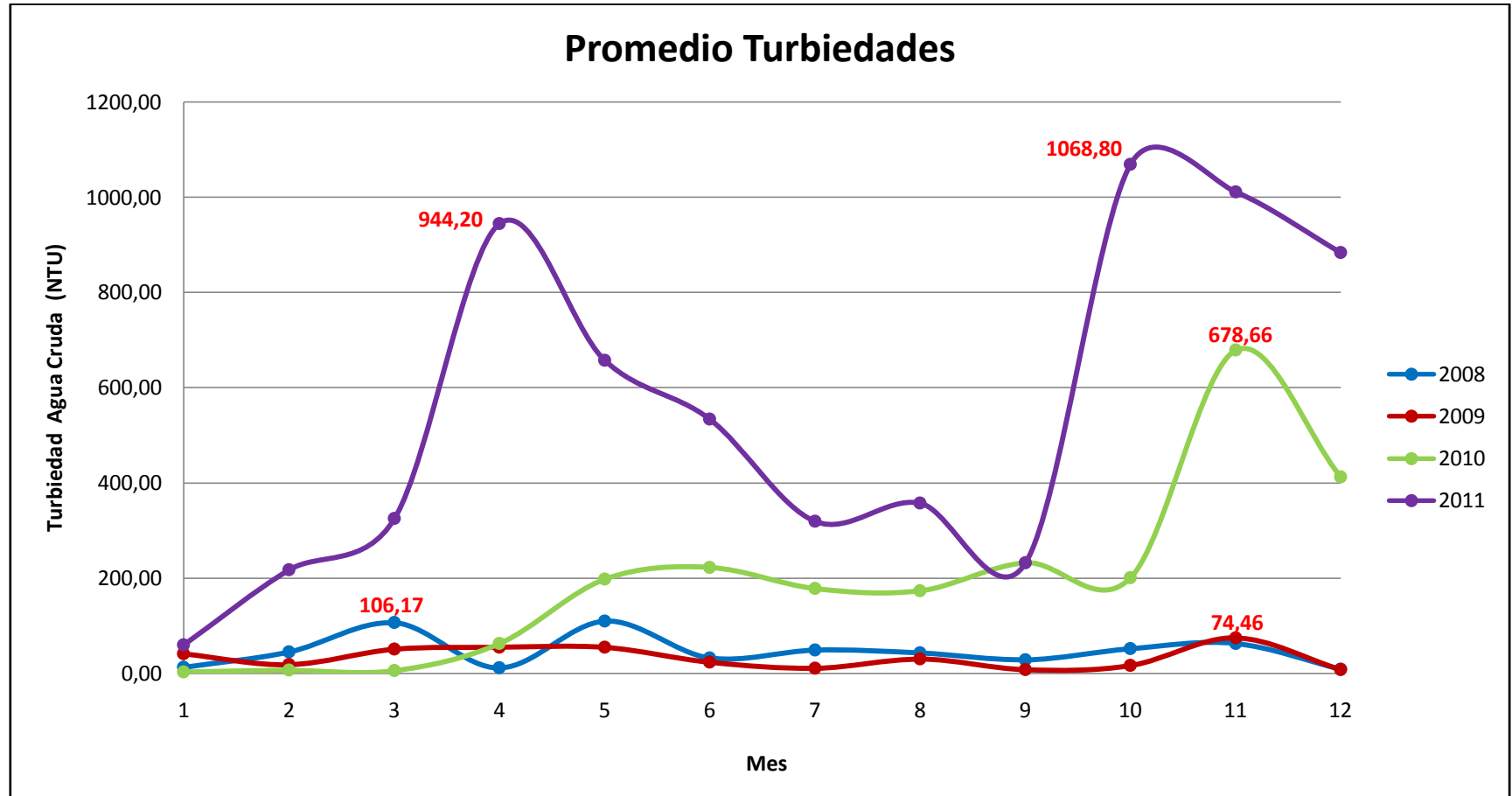
**Tabla I.1** Razón de reemplazo de coagulantes líquidos de acuerdo a la turbiedad.

AGUA CRUDA		DOSIS ÓPTIMAS DE COAGULANTES				RAZÓN DE REEMPLAZO DE SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO A:		
TURBIEDAD INICIAL	pH INICIAL	SASB	SALB	MACKEN-FLOC II	ULTRA-FLOC 110	SALB	MACKEN-FLOC II	ULTRA-FLOC 110
47,8	7,40	14	22	7		1,57	0,50	
53,8	7,29	16						
56,5	7,09	24						
61,4	6,99	26						
63,0	7,31	26						
66,1	7,47	18	24	8	8	1,33	0,44	0,44
80,9	7,36	16	28	9	7	1,75	0,56	0,44
81,1	7,58	18	24	10		1,33	0,56	
97,4	7,56	18	26	9	8	1,44	0,50	0,44
103,0	7,24	18	28	8		1,56	0,44	
118,0	7,34	28						
132,0	7,27	20			9			0,45
136,0	7,42	18	28			1,56		
138,0	7,53	18						
180,0	7,48	22		12			0,55	
185,0	7,15	30			7			0,23
239,0	7,16	22			10			0,45
240,0	7,01	26	38	12	10	1,46	0,46	0,38
330,0	6,93	36						
411,0	7,47	26	40	10	9	1,54	0,38	0,35
1011,0	7,37	50						
1817,0	6,93	50	80	24	20	1,60	0,48	0,40
2519,0	6,87	70	102			1,46		
2734,0	6,83	55			22			0,40
4744,0	6,97	50	175	40	36	3,50	0,80	0,72
4964,0	6,97	80	125	42	40	1,56	0,53	0,50
5156,0	6,87	100	140	30	26	1,40	0,30	0,26
5204,0	6,79	80	115	40	38	1,44	0,50	0,48
5342,0	7,10	90	100	36	38	1,11	0,40	0,42
6840,0	6,90	130	180	70	30	1,38	0,54	0,23
7702,0	6,57	110	145	41	36	1,32	0,37	0,33
8172,0	6,99	110	160		25	1,45		0,23
8511,0	7,14	110	140	35	30	1,27	0,32	0,27
8625,0	7,08	110			37			0,34
10530,0	6,70	110			48			0,44
21250,0	6,91	220		70	25		0,32	0,11
27370,0	6,61	340			40			0,12
<b>PROMEDIO DE LA RAZÓN DE REEMPLAZO</b>						<b>1,45</b>	<b>0,45</b>	<b>0,40</b>

Fuente: Autor.

## ANEXO J. VALORES PROMEDIOS ANUALES DE TURBIEDAD DESDE 2008 HASTA 2011

Figura J.1 Promedio de turbiedades desde 2008 hasta 2011.



Fuente: Autor.

## ANEXO K. CONSUMO Y DOSIS DEL SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO DURANTE EL 2010, 2011 Y PRIMER TRIMESTRE DE 2012

**Tabla K.1** Consumo y dosis del sulfato de aluminio sólido durante el 2010, 2011 y primer trimestre de 2012.

AÑO		2010											
MES		ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
DOSIS [p.p.m]	Min.	16,01	12,10	15,01	13,89	14,61	15,64	13,85	16,00	12,44	11,81	10,55	15,95
	Max.	22,26	44,00	42,15	95,02	160,09	150,01	185,09	132,06	200,09	302,00	206,21	259,74
	Prom.	18,14	20,21	17,65	22,70	28,34	25,91	22,15	23,85	24,65	24,64	35,92	29,80
CONSUMO [kg]	Min.	363,48	97,38	61,20	365,34	341,34	782,28	667,14	813,06	733,14	734,04	834,96	810,78
	Max.	447,12	1205,88	931,32	1661,28	2285,34	2138,82	2023,44	2364,60	1717,50	2271,96	3152,64	2154,60
	Prom.	405,30	673,82	389,69	1049,48	1267,99	1171,64	975,84	1063,65	1072,33	1082,90	1437,64	1281,99
CONSUMO TOTAL [kg]		810,60	13476,48	6624,72	31484,35	39397,56	35149,20	30251,04	32973,30	32169,84	33569,88	43129,26	39741,54
CONSUMO TOTAL [Ton]		0,81	13,48	6,62	31,48	39,40	35,15	30,25	32,97	32,17	33,57	43,13	39,74
AÑO		2011											
MES		ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
DOSIS [p.p.m]	Min.	12,58	10,02	16,00	15,88	15,79	11,94	5,63	0,36	10,13	7,67	14,92	6,82
	Max.	178,97	179,25	137,77	325,00	599,90	220,06	122,01	250,14	681,00	200,07	245,00	225,10
	Prom.	17,93	21,50	27,42	35,86	31,43	26,37	23,63	24,25	23,01	38,83	34,00	35,45
CONSUMO [kg]	Min.	665,70	612,72	846,30	863,10	848,10	823,14	743,70	757,14	791,94	374,70	971,58	624,00
	Max.	1225,38	1730,94	2031,72	2979,66	2440,98	2356,02	1726,68	1912,20	1767,96	3005,16	2947,44	3252,18
	Prom.	851,73	992,01	1239,34	1569,53	1396,46	1192,40	1061,80	1110,65	1051,65	1560,08	1441,17	1485,84
CONSUMO TOTAL [kg]		26403,72	27776,28	38419,53	45516,24	43290,18	35772,12	32915,94	34430,08	31549,50	48362,40	43235,10	46060,92
CONSUMO TOTAL [Ton]		26,40	27,78	38,42	45,52	43,29	35,77	32,92	34,43	31,55	48,36	43,24	46,06

AÑO		2012		
MES		ENERO	FEBRERO	MARZO
DOSIS [p.p.m]	Min.	1,79	7,32	11,43
	Max.	840,00	85,08	299,03
	Prom.	23,15	17,07	24,28
CONSUMO [kg]	Min.	695,58	591,96	706,50
	Max.	1871,46	1203,72	2157,84
	Prom.	1015,86	811,98	1080,84
CONSUMO TOTAL [kg]		31491,78	23547,36	30263,46
CONSUMO TOTAL [Ton]		31,49	23,55	30,26

Fuente: Autor.

**Tabla K.2** Resumen del consumo y dosis del sulfato de aluminio sólido durante el 2010, 2011 y primer trimestre de 2012.

SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO	DOSIS [p.p.m]	CONSUMO DIARIO	
		[kg]	[Ton]
Min.	0,36	61,20	0,06
Max.	840,00	3252,18	3,25
Prom.	25,86	1101,24	1,10

Fuente: Autor.

Fuente: ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A E.S.P. *Planillas de Operación de la planta Floridablanca.* [2]

## ANEXO L. CONSUMO DIARIO Y DOSIS DE LOS DIFERENTES COAGULANTES A PARTIR DEL SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO

**Tabla L.1** Resumen del consumo y dosis de los diferentes coagulantes estudiados en la planta Floridablanca en 2010 y primer semestre de 2011.

SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO	DOSIS [p.p.m]	CONSUMO DIARIO	
		[kg]	[Ton]
Min.	0,54	91,80	0,09
Max.	1260,00	4878,27	4,88
Prom.	38,79	1651,87	1,65

Fuente: *Autor.*

MACKENFLOC II	DOSIS [p.p.m]	CONSUMO DIARIO	
		[kg]	[Ton]
Min.	0,16	27,36	0,03
Max.	375,48	1453,72	1,45
Prom.	11,56	492,26	0,49

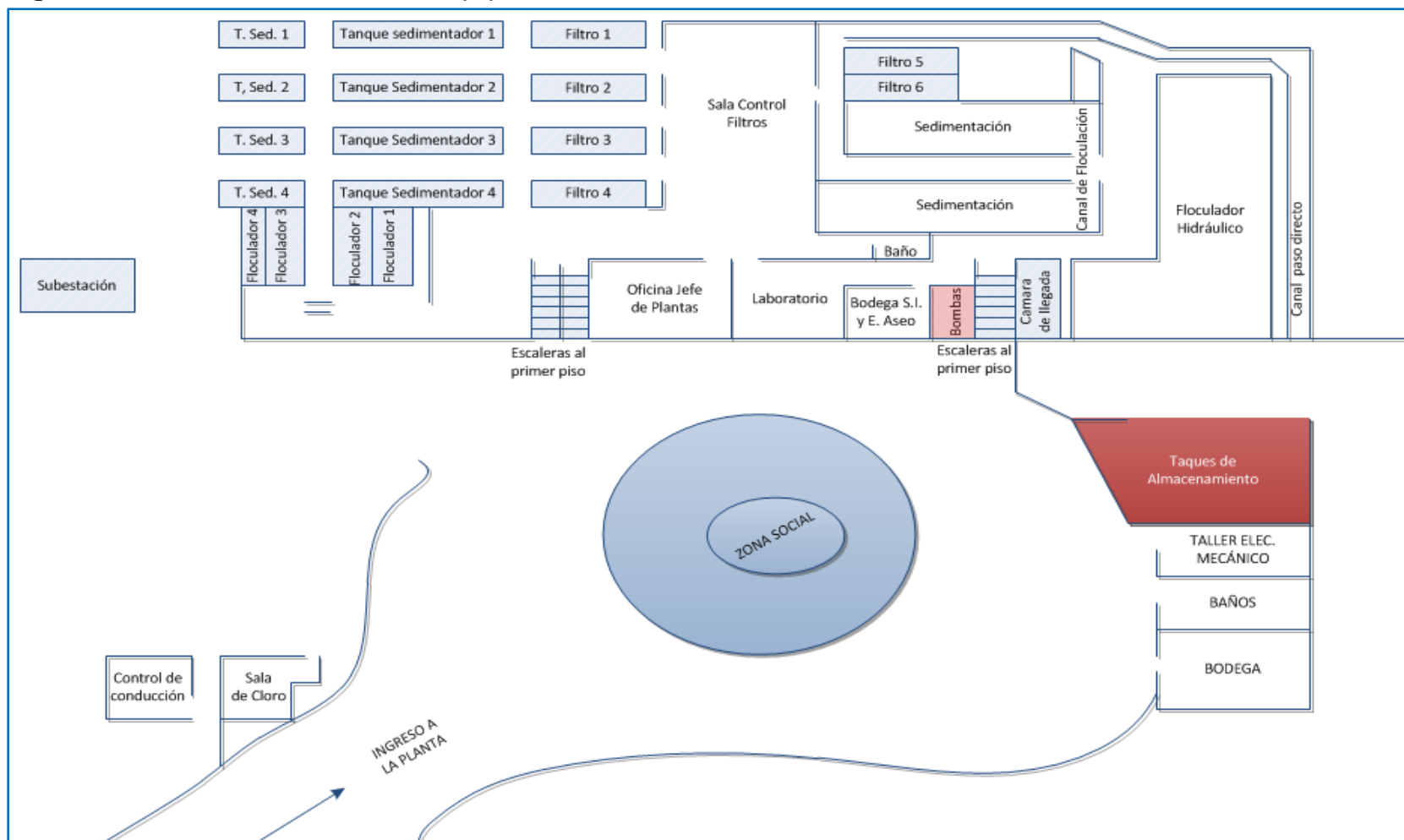
Fuente: *Autor.*

ULTRAFLOC 110	DOSIS [p.p.m]	CONSUMO DIARIO	
		[kg]	[Ton]
Min.	0,14	24,48	0,02
Max.	336,00	1300,87	1,30
Prom.	10,34	440,50	0,44

Fuente: *Autor.*

## ANEXO M. LOCALIZACIÓN NUEVOS EQUIPOS

Figura M.1 Localización de nuevos equipos.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

## ANEXO N. COSTO PROMEDIO POR m<sup>3</sup> DE AGUA TRATADA

**Tabla N.1** Resumen costo promedio por m<sup>3</sup> de agua tratada.

		SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO	SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO	MACKENFLOC II	ULTRAFLOC 110
<b>2010</b>	<i>Enero</i>	5,71	5,69	5,72	5,69
	<i>Febrero</i>	13,19	12,45	13,60	12,70
	<i>Marzo</i>	9,12	8,77	9,32	8,90
	<i>Abril</i>	22,63	21,03	23,20	21,25
	<i>Mayo</i>	25,40	23,58	25,68	23,48
	<i>Junio</i>	24,34	22,65	24,14	22,09
	<i>Julio</i>	20,42	19,05	20,43	18,76
	<i>Agosto</i>	23,07	21,45	23,14	21,18
	<i>Septiembre</i>	23,65	21,99	23,65	21,63
	<i>Octubre</i>	23,60	21,91	23,88	21,83
	<i>Noviembre</i>	28,18	26,10	28,32	25,80
	<i>Diciembre</i>	26,08	24,20	26,05	23,77
<b>2011</b>	<i>Enero</i>	18,60	17,35	18,66	17,15
	<i>Febrero</i>	20,34	18,93	20,70	18,99
	<i>Marzo</i>	26,14	24,25	26,16	23,88
	<i>Abril</i>	28,25	26,21	27,99	25,52
	<i>Mayo</i>	24,43	22,72	24,21	22,14
	<i>Junio</i>	23,53	21,86	23,68	21,66
	<i>Julio</i>	21,33	19,84	21,47	19,67
	<i>Agosto</i>	21,20	19,73	21,38	19,60
	<i>Septiembre</i>	20,57	19,13	21,00	19,26
	<i>Octubre</i>	30,66	28,31	31,44	28,60
	<i>Noviembre</i>	28,02	25,88	28,77	26,19
	<i>Diciembre</i>	28,35	26,24	28,68	26,12
<b>2012</b>	<i>Enero</i>	24,20	21,11	21,61	25,00
	<i>Febrero</i>	21,31	18,72	18,78	21,61
	<i>Marzo</i>	25,91	22,62	22,64	26,24
<b>COSTO PROMEDIO [COP/m<sup>3</sup>]</b>		<b>22,53</b>	<b>20,81</b>	<b>22,38</b>	<b>21,06</b>

Fuente: Autor.

## ANEXO O. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ETAPA EXPERIMENTAL

**Tabla O.1** Resumen de los resultados obtenidos en la etapa experimental.

Turbiedad Inicial	Turbiedad residual < 10 NTU		7 < pH final < 8	
	Turbiedades bajas [0-3000 NTU]	Turbiedades altas [3001-30000 NTU]	Turbiedades bajas [0-3000 NTU]	Turbiedades altas [3001-30000 NTU]
<b>Coagulante</b>				
<b>SASB*</b>	Dosis: 14 - 70 ppm	Dosis: 80 - 340 ppm	Prom. 6,51	Prom. 4,91
<b>SALB**</b>	Dosis: 22 - 100 ppm	Dosis: 102 - 180 ppm	Prom. 6,49	Prom. 4,88
<b>MACKENFLOC II</b>	Dosis: 7 - 24 ppm	Dosis: 30 - 70 ppm	Prom. 7,15	Prom. 6,92
<b>ULTRAFLOC 110</b>	Dosis: 7 - 22 ppm	Dosis: 25 - 50 ppm	Prom. 7,18	Prom. 7,01

Fuente: Autor.

Turbiedad Inicial	Color final < 10 UPC		Aluminio residual < 0,2 mg/L		Costos por m <sup>3</sup> de agua tratada (pesos mcte)
	Turbiedades bajas [0-3000 NTU]	Turbiedades altas [3001-30000 NTU]	Turbiedades bajas [0-3000 NTU]	Turbiedades altas [3001-30000 NTU]	
<b>Coagulante</b>					
<b>SASB*</b>	Prom. 2,1	Prom. 1,8	Prom. 0,08	Prom. 0,42	22,53
<b>SALB**</b>	Prom. 1,6	Prom. 2,1	Prom. 0,11	Prom. 0,31	20,81
<b>MACKENFLOC II</b>	Prom. 2,3	Prom. 1,6	Prom. 0,10	Prom. 0,07	22,38
<b>ULTRAFLOC 110</b>	Prom. 1,9	Prom. 1,0	Prom. 0,08	Prom. 0,05	21,06


Fuente: Autor.

## ANEXO P. COTIZACIONES DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS

Figura P.1 Cotización de bombas dosificadoras.

 <p><b>SERVICLORO</b></p> <p>NIT 860.353.061-4</p>		<p><b>EQUIPOS - SUMINISTROS - ASESORIA</b>  <b>MANTENIMIENTO - INSTALACIÓN - CAPACITACIÓN</b></p> <p>Carrera 47A N° 103 - 40 PBX: 623 5670                  Fax: 621 3852 - www.servicloro.com                  E-mail: info@servicloro.com - Bogotá, D.C.</p>	
<p><b>SEÑORES:</b>                  Acueducto metropolitano de Bucaramanga (AMB)                  Ing. Yolanda Otero Rodríguez  <a href="mailto:yotero@amb.com.co">yotero@amb.com.co</a>                  Cel: 300-2748832                  Bucaramanga-Santander</p>		<p><b>Fecha:</b> marzo 30 de 2012</p> <p><b>Oferta #</b> 0505/03/2011      <b>PAG.</b> 1/1</p> <p><b>Validez de la Oferta:</b>                  Treinta (30) días</p> <p><b>Entrega:</b> Inmediata salvo venta previa</p>	
<p><b>Solicitado por:</b>                  Ing. Yolanda Otero Rodríguez</p>		<p><b>F. de pago:</b> Anticipado para proceder al despacho</p>	
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR	
1	<p><b>Según requerimiento de AMB: 100 L/h PAC</b></p> <p>Bomba dosificadora de productos químicos líquidos para trabajo industrial tipo diafragma mecánica, marca OBL modelo MB121PP32 de fabricación europea. Combina las características de una bomba de pistón (tasa de flujo lineal a cualquier contrapresión) con la exactitud en la dosificación de una bomba de diafragma.</p> <p><b><u>Características técnicas:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Caudal de dosificación:                          Mínimo - 12,1 litros/hora                          Máximo - 121 litros/hora</li> <li>* Presión máxima de descarga: 6 bar (87 PSI)</li> <li>* Precisión: 2%</li> <li>* Motor eléctrico trifásico, tipo jaula de ardilla industrial de 0,3 H.P., 60 Hz, 220 VAC y grado de protección IP 55.</li> <li>* Material del diafragma: PTFE (Teflón)</li> <li>* Cabezal en PP reforzado en fibra de vidrio.</li> <li>* Guía de la válvula en polipropileno PP.</li> <li>* Válvula en esfera de Hastelloy C.</li> <li>* Asiento de la válvula en Incoloy 825</li> <li>* Sellos de la válvula en Vitón</li> <li>* Conexión 3/8 "</li> <li>* Un (1) frasco de aceite para la caja reductora.</li> <li>* Peso: 10 kg.</li> </ul>	€1.460	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                  La tasa del Euro se liquidará a la fecha de facturación y entrega del equipo.  <b><u>Adicional el IVA</u></b></p>			
Gerencia	Ing. Mauricio Pinzon J. <b>Gerente Comercial</b>	Ing. Willi Laiton <b>Asesor Tecnico Comercial</b>	

Figura P.2 Cotización de bombas dosificadoras.

 <p><b>SERVICLORO</b></p> <p>NIT 860.353.061-4</p>		<p><b>EQUIPOS - SUMINISTROS - ASESORIA</b>  <b>MANTENIMIENTO - INSTALACIÓN - CAPACITACIÓN</b></p> <p>Carrera 47A N° 103 - 40 PBX: 623 5670          Fax: 621 3852 - www.servicloro.com          E-mail: info@servicloro.com - Bogotá, D.C.</p>	
<p><b>SEÑORES:</b>  <b>Acueducto metropolitano de Bucaramanga (AMB)</b>          Ing. Yolanda Otero Rodríguez  <a href="mailto:yotero@amb.com.co">yotero@amb.com.co</a>          Cel: 300-2748832          Bucaramanga-Santander</p>		<p><b>Fecha:</b> marzo 30 de 2012</p>	
		<p><b>Oferta #</b> 0505/03/2011 <b>PAG.</b> 1/1</p>	
		<p><b>Validez de la Oferta:</b>          Treinta (30) días</p>	
		<p><b>Entrega:</b>          sesenta (60) días</p>	
<p><b>Solicitado por:</b>          Ing. Yolanda Otero Rodríguez</p>		<p><b>F. de pago:</b> Anticipado para proceder al despacho</p>	
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR	
1	<p>Bomba dosificadora de productos químicos líquidos para trabajo industrial tipo diafragma para una mayor exactitud en la dosificación, marca OBL modelo MC236PP32 de fabricación europea con indicación análoga del caudal del flujo instantáneo.</p> <p><b><u>Características técnicas:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Caudal de dosificación:                  Mínimo - 23,6 litros/hora                  Máximo - 236 litros/hora</li> <li>* Presión máxima de descarga: 6 bar (87 PSI).</li> <li>* Precisión: 2%.</li> <li>* Motor eléctrico trifásico, tipo jaula de ardilla industrial de 0,4 H.P., 60 Hz, 220 VAC, 1700 rpm y grado de protección IP 55.</li> <li>* Material del diafragma: PTFE (Teflón).</li> <li>* Cabezal en PP reforzado en fibra de vidrio.</li> <li>* Guía de la válvula en polipropileno PP.</li> <li>* Válvula en esfera de Hastelloy C.</li> <li>* Asiento de la válvula en Incoloy 825.</li> <li>* Sellos de la válvula en Vitón.</li> <li>* Conexión roscada 3/4 ".</li> <li>* Succión Máx.: 1,5 mWc.</li> </ul>	<p><b>€2.220</b></p>	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>          La tasa del Euro se liquidará a la fecha de facturación y entrega del equipo.  <b>Adicional el IVA</b></p>			
Gerencia	Ing. Mauricio Pinzon J. <b>Gerente Comercial</b>	Ing. Willi Laiton <b>Asesor Técnico Comercial</b>	

**Figura P.3** Cotización de tanques de almacenamiento.



Medellín, 13 de Febrero de 2012



0385-12

## REFERENCIA

---

Tanques para almacenamiento de Sulfato de Aluminio y PAC, en Poliéster Reforzado con Fibras de Vidrio, PRFV.

## GENERALIDADES

---

Tanque cilíndrico vertical de fondo plano y cabezal superior semiesférico, diseñado para operar totalmente apoyado sobre una base plana y uniforme de concreto.

### **Materiales:**

- Barrera Corrosiva: Resina Poliéster Bisfenol A con velo de superficie.
- Laminado Estructural: Resina Poliéster Tereftalica, ref.: Cristalan 30847 de Andercol.
- Refuerzo: Reforzado con fibras de vidrio tipo Mat de 450 g/m<sup>2</sup> y Woven Roving de 800 g/m<sup>2</sup>, por el método de moldeo Hand Lay up
- Fabricado por el método de moldeo por contacto Hand Lay-up y Spray-up, según normas: ASTM D 4097, ASTM C 582, ICONTEC 2890. ICONTEC 2888.
- Post-curado interior con inyección de aire caliente seco a 80 °C.
- Superficie interior lisa. Acabado exterior en pintura poliéster blanca, con estabilizador U.V., a base de Tinuvin.

## ACCESORIOS INCLUIDOS

---

- Un manhole superior de 50 cm con tapa removible.
- Un manhole inferior de 50 cm, con tapa y tornillos inox.
- Accesorios tipo brida norma ANSI B 16.5, para entrada, salidas y drenaje.
- Un venteo superior en PVC tipo cuello de ganso.
- Banda traslúcida de control de nivel, con tabla de aforo.
- Accesorios para izaje y manipulación en acero galvanizado en caliente
- Cuatro platinas de anclaje en acero galvanizado en caliente.
- Escalera, guarda, baranda superior en hierro protegidos con pintura epoxica.

NOTA : No son parte del alcance de esta oferta:

Bases, instalación, válvulas, contrabridas, instrumentos de control o medición, soporte para tuberías externas o internas, instalación, pernos de anclaje, obras civiles, prueba hidrostática, instrumentos de control o medición, o cualquier otro que no esté expresamente descrito como incluido.

### **PARÁMETROS DE DISEÑO**

---

Producto: Sulfato Aluminio B, PAC

Concentración: Saturación

Densidad: 1.33 ton/m<sup>3</sup>

Temperatura: Ambiente

Presión: Atmosférica

### **TANQUE 30 m<sup>3</sup>**

---

Diámetro interior: 280 cm

Altura del cilindro: 490 cm

Altura del cabezal: 28 cm

Volumen: 30.000 litros

**\$ 17'450.000.00 / unidad, mas IVA del 16%**

### **FORMA DE PAGO**

---

50 % anticipo, 50 % contra entrega.

### **LUGAR DE ENTREGA**

---

Instalaciones Acueducto metropolitano de Bucaramanga, sobre plataforma de camión.

### **TIEMPO DE ENTREGA**

---

30 días después de confirmada la orden de compra.

### **GARANTIA**

---

Dos años por defectos de fabricación o falla en la materia prima, operando en las condiciones solicitadas.

Dejamos expresa constancia que nuestra responsabilidad está limitada a la reposición o reparación de los equipos suministrados, previa demostración de que el daño tiene por

causa algún defecto en nuestra fabricación o montaje, en caso que éste último sea una labor a nuestro cargo.

No asumimos responsabilidad alguna por los daños consecuenciales, tales como, la pérdida o afectación de los contenidos de los tanques o equipos suministrados, u otros bienes del comprador, o por los cuales sea responsable o de terceros, o por la suspensión de labores o lucro cesante, como tampoco por las lesiones, muerte u otro perjuicio patrimonial o extra patrimonial a las personas, sean dependientes, contratistas, subcontratistas o terceros, salvo que se demuestre el dolo o culpa de nuestros empleados o contratistas.

### **VALIDEZ DE OFERTA**

---

30 días.

Para mayor información sobre nuestros productos, visite nuestra página web:  
[www.fibratoresa.com](http://www.fibratoresa.com)

Cordialmente,

**NATACHA GIRALDO ANGEL**  
**Comercial UEN Corrosión**

---

AFILIADOS A ICONTEC

CALLE 100 B SUR N°51-10 LA ESTRELLA - TELS: 278 17 90 - 278 17 36 - 278 39 40 e-mail: [fibratore@fibratoresa.com](mailto:fibratore@fibratoresa.com) Web site: [www.fibratoresa.com](http://www.fibratoresa.com) FAX: 278 14 38 MEDELLÍN - COLOMBIA

**Figura P.4** Cotización de tanques aforadores.



Medellín, 13 de Febrero de 2012



0385-12

## REFERENCIA

---

Cotización de tanque rectangular, fabricado en Poliéster Reforzado con Fibras de Vidrio, PRFV.

## GENERALIDADES

---

Tanque rectangular de fondo y paredes planas con reborde superior estructural, y tapa removible, sujeta al tanque con tornillos plásticos, está diseñado para almacenamiento estático y para ser apoyado sobre una base plana y uniforme.

### **Materiales:**

Tanque fabricado en la barrera corrosiva en resina Vinilester Bisfenol A con velo de superficie. Laminado estructural en resina poliéster Ortoftalica.

Fibras de vidrio de refuerzo tipo Matt de 450 gr/ m<sup>2</sup> y Woven Roving. Acabado exterior en pintura poliéster con estabilizadores de rayos U.V.

## ACCESORIOS INCLUIDOS

---

- Manhole superior de inspección de 50 cm de diámetro, con tapa.
- Tres accesorios tipo brida norma ANSI B 16,5 fabricados en PRFV del diámetro sugerido.
- Accesorios de izaje incorporados al laminado del tanque.

NO son parte del alcance de esta oferta:

Válvulas, contrabridas, equipos o dispositivos complementarios diferentes a los descritos.

## PARÁMETROS DE DISEÑO

---

Producto: PAC

Temperatura: Ambiente

Presión: Atmosférica

### **DIMENSIONES Y VALOR**

---

Largo: 145 cm

Ancho: 145 cm

Altura: 145 cm

Volumen: 3.000 Litros

**VALOR: \$ 6'560.000.00 / Unidad, Mas IVA (16 % régimen común).**

### **FORMA DE PAGO**

---

50 % anticipo, 50 % contra entrega.

### **LUGAR DE ENTREGA**

---

Instalaciones Acueducto metropolitano de Bucaramanga, sobre plataforma de camión.

### **TIEMPO DE ENTREGA**

---

30 días después de confirmada la orden de compra.

### **GARANTIA**

---

Dos años por defectos de fabricación o falla en la materia prima, operando en las condiciones solicitadas.

Dejamos expresa constancia que nuestra responsabilidad está limitada a la reposición o reparación de los equipos suministrados, previa demostración de que el daño tiene por causa algún defecto en nuestra fabricación o montaje, en caso que éste último sea una labor a nuestro cargo.

No asumimos responsabilidad alguna por los daños consecuenciales, tales como, la pérdida o afectación de los contenidos de los tanques o equipos suministrados, u otros bienes del comprador, o por los cuales sea responsable o de terceros, o por la suspensión de labores o lucro cesante, como tampoco por las lesiones, muerte u otro perjuicio patrimonial o extra patrimonial a las personas, sean dependientes, contratistas, subcontratistas o terceros, salvo que se demuestre el dolo o culpa de nuestros empleados o contratistas.

### **VALIDEZ DE OFERTA**

---

30 días.

Para mayor información sobre nuestros productos, visite nuestra página web:  
[www.fibratoresa.com](http://www.fibratoresa.com)

Cordialmente,

**NATACHA GIRALDO ANGEL**  
**Comercial UEN Corrosión**

---

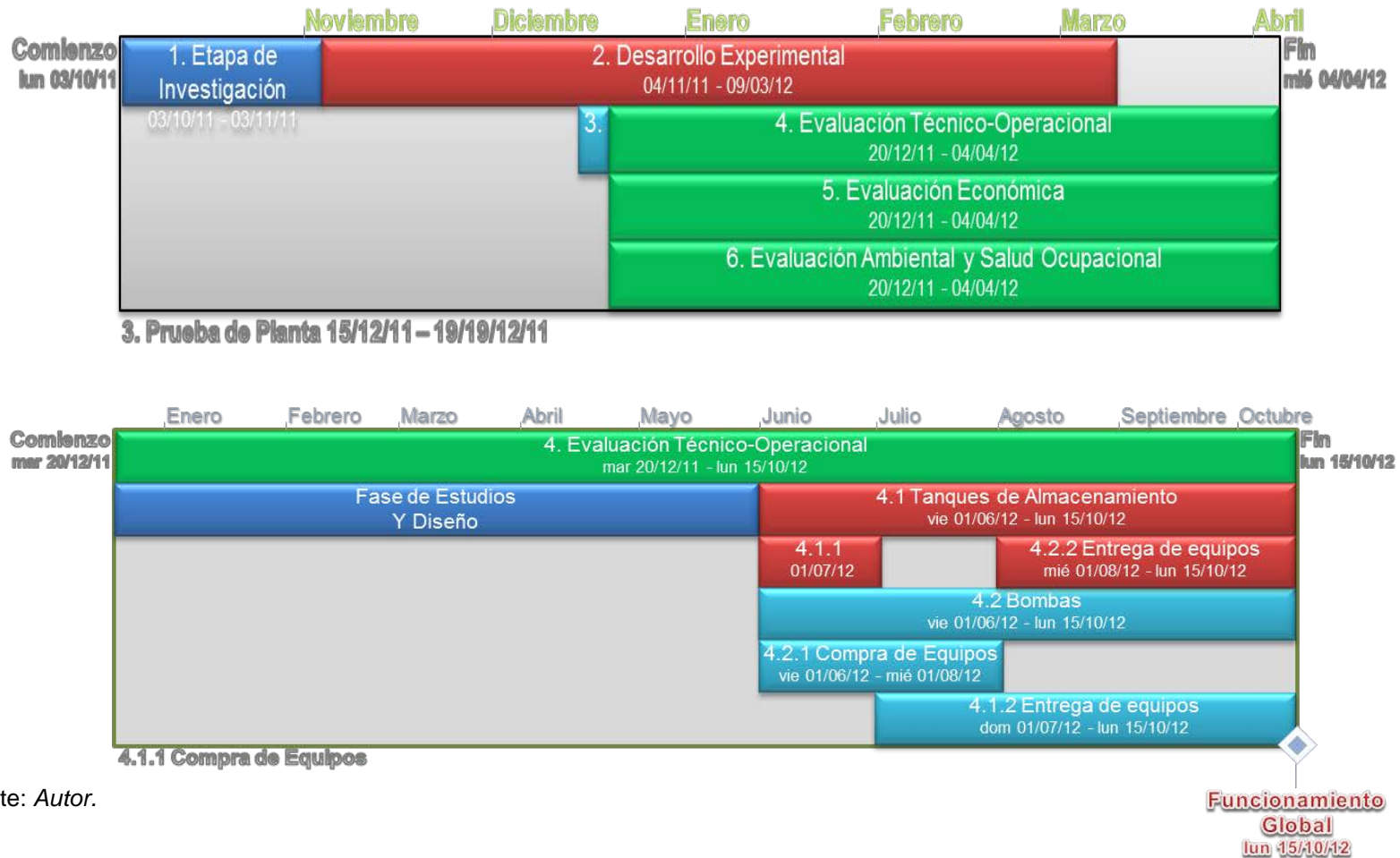
AFILIADOS A ICONTEC

CALLE 100 B SUR N°51-10 LA ESTRELLA - TELS: 278 17 90 - 278 17 36 - 278 39 40 e-mail: [fibratore@fibratoresa.com](mailto:fibratore@fibratoresa.com) Web site: [www.fibratoresa.com](http://www.fibratoresa.com) FAX: 278 14 38 MEDELLIN - COLOMBIA

## ANEXO Q. LÍNEA DEL TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Se construye un cronograma de actividades que representa todas las etapas de realización del proyecto, finalizando con la puesta en marcha de los diferentes resultados obtenidos.

Figura Q.1 Línea del tiempo de ejecución del proyecto.



Fuente: Autor.