

**ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE TRATABILIDAD DEL AGUA
CRUDA PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA
EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE TIMBÍO EMTIMBIO E.S.P.,
DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

NYDIA MARTÍNEZ AGREDO



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN-CAUCA
2018**

**ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE TRATABILIDAD DEL AGUA
CRUDA PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA
EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE TIMBÍO EMTIMBIO E.S.P.,
DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

NYDIA MARTÍNEZ AGREDO

TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE PASANTÍA

**DIRECTOR JAVIER ERNESTO FERNÁNDEZ MERA
Ingeniero Sanitario, MSc. Ph.D.**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN-CAUCA
2018**

NOTA DE ACEPTACIÓN

El Director y los Jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por su autor y lo encuentran aprobado.

Director

Jurado

Jurado

Popayán, octubre de 2018

DEDICATORIA

A Dios

Por mantener viva la fe en mi mente y mi corazón de que con su amor, bondad e infinita misericordia puedo alcanzar todos mis propósitos.

A mi esposo

Pablo Emilio, por su amor, por ser mi compañero de vida, por su dedicación conmigo y nuestro hogar, por sus palabras de motivación, por su comprensión, por estar presente tanto en las victorias como en los fracasos y por creer en mí que si lo lograra, este triunfo es de los dos.

A mis hijos

Pablo Andrés y Joseph Alejandro, mis dos más preciados regalos de Dios, quienes han sido mi mayor motivación para cumplir mis metas y me colman cada día con su sincero amor, este logro es por ustedes mis más grandes amores, los amo.

A mis padres

Por darme la vida, en especial a mi madre y amiga, Nydia quien siempre me brinda todo su amor, su apoyo incondicional y está a mi lado en las etapas más importantes de mi existencia.

A mi hermano

Alberto, por ser ese acompañante que desde niños siempre ha estado pendiente de mí y dispuesto a ayudarme cuándo más lo necesito.

A mi suegra

Doña Marina, por alentarme siempre y enseñarme que con la perseverancia se alcanzan todas las metas propuestas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a dios por permitirme hacer realidad este sueño tan anhelado y llenar mi vida de tantas bendiciones.

Infinitas gracias doy a mi esposo, por toda su entrega, voluntad y sacrificio, por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia se llega a la satisfacción, además sin su ayuda nada de esto fuera posible.

Le agradezco especialmente al ingeniero Javier Ernesto Fernández Mera, por su interés en dirigir mi trabajo de grado, por su entereza, cooperación y apoyo en mi proceso de realización de la práctica empresarial.

Este estudio fue posible gracias al recurso humano de la Planta de Tratamiento de agua potable de la Empresa de Servicios Públicos EMTIMBIO E.S.P, a la Gerente General Ing. Deisy Alejandra Aguirre Tosne, al personal técnico y administrativo de la empresa, en especial a la ingeniera Yamile Molano Solarte por su colaboración durante todo el estudio e hizo posible que mi trabajo se desarrollara de manera satisfactoria a nivel personal y académico.

A todos los docentes del programa de ingeniería ambiental de la Universidad del Cauca que gracias a sus conocimientos suministrados permitieron mi formación profesional.

A mis compañeros y amigos, con los cuales compartí momentos gratos y no gratos, quienes estuvieron trabajando a mi lado por obtener nuestra formación profesional, durante todo el tiempo dedicado en la universidad.

A mis familiares, seres queridos, y a todas las personas que de una u otra forma participaron en el desarrollo de este estudio, lo que me ha permitido, aumentar mis conocimientos, mejorar como persona y como ser humano.

CONTENIDO

RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. OBJETIVOS	13
3.1 OBJETIVO GENERAL	13
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
4. MARCO TEÓRICO	14
4.1 AGUA POTABLE O AGUA PARA CONSUMO HUMANO	14
4.1.1 Características Físicas	14
4.1.1.1 Color.....	14
4.1.1.2 Olor y sabor.....	15
4.1.1.3 Turbiedad.....	15
4.1.1.4 Temperatura	16
4.1.1.5 Potencial de Hidrogeno pH	16
4.1.2 Características Químicas	17
4.1.2.1 Alcalinidad	17
4.2 TEORIA DE LA COAGULACIÓN DEL AGUA.....	17
4.2.1 Coagulación.....	17
4.2.2 Coagulantes	17
4.2.3 Proceso de coagulación	18
4.2.4 Etapas de la coagulación.....	18
4.2.5 Diagramas de coagulación	18
4.2.6 Efectividad de la coagulación.....	20
4.3 PROCESO DE FLOCULACIÓN.....	20
4.3.1 Floculación	20
4.3.2 Propósito de la Floculación	20
4.3.3 Clases de Floculadores	20
4.3.3.1 Floculador de flujo horizontal.....	21
4.3.3.2 Floculador de flujo vertical	21
4.3.3.3 Floculador de flujo helicoidal.....	21
4.3.3.4 Floculador Alabama	22
4.3.4 Eficiencia de la floculación.....	22
4.3.4.1 Factores de mayor influencia en el proceso de la floculación	22
4.4 PROCESO DE SEDIMENTACIÓN	22
4.4.1 Sedimentación	22
4.4.2 Propósito de la sedimentación	22
4.4.3 Mecanismo de la sedimentación	23
4.4.3.1 Sedimentación de partículas discretas	23
4.4.3.2 Sedimentación de partículas floculentas	23

4.4.3 Sedimentación por caída libre e interferida	23
4.4.4 Tipos de sedimentadores.....	24
4.4.4.1 Características de los sedimentadores	24
4.4.5 Eficiencia de la sedimentación.....	24
5 METODOLOGÍA	25
5.1 MARCO CONTEXTUAL, PLANTA DE TRATAMIENTO "EMTIMBIO"	25
5.2 DESARROLLO METODOLÓGICO ESPECÍFICO	25
5.2.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS Y FISCOQUÍMICAS DEL AGUA CRUDA.	26
5.2.1.1 Determinación de la Temperatura.....	26
5.2.1.2 Determinación de la Turbiedad	26
5.2.1.3 Determinación de pH.....	26
5.2.1.4 Determinación de la Alcalinidad	26
5.2.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE COAGULACIÓN	27
5.2.2.1 Determinación de la solución madre óptima	27
5.2.2.2 Determinación de dosis óptima.....	27
5.2.2.3 Determinación del pH de Coagulación	27
5.2.2.4 Tiempo de Mezcla Rápida.....	28
5.2.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE FLOCULACIÓN.....	28
5.2.4 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE SEDIMENTACIÓN	28
5.2.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP) DE EMTIMBIO	29
5.2.6 COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE TRATABILIDAD Y LOS ENCONTRADOS EN EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA	29
6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	30
6.1 Determinación de los parámetros óptimos del proceso de coagulación	30
6.1.1 Determinación de la Dosis Óptima de coagulante.....	30
6.1.2 Determinación del rango de pH óptimo de Coagulación.....	31
6.1.3 Tiempo de Mezcla Rápida.....	31
6.1.4 Determinación de la Alcalinidad	32
6.1.5 Determinación de los Parámetros Óptimos del Proceso de Floculación	33
6.1.6 Determinación de los Parámetros Óptimos del Proceso de Sedimentación	36
6.2 Determinación de los Parámetros de funcionamiento en la PTAP EMTIMBIO.....	37
6.2.1 Determinación de los Parámetros de funcionamiento en el floculador hidráulico.....	37
6.2.2 Determinación de los Parámetros de funcionamiento en los sedimentadores	44
6.2.2.1 Carga superficial de los sedimentadores	45
6.2.2.2 Determinación de la eficiencia del sedimentador con base en las curvas de sedimentación.....	46
6.3 COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE TRATABILIDAD CON LOS ENCONTRADOS EN EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA	47
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFIA.....	51

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro N.º 1 Características Físicas del agua potable	14
Cuadro N.º 2 Alcalinidad del agua en las pruebas de jarras con diferentes turbiedades	32
Cuadro N.º 3 tiempo de mezcla y gradiente de floculación	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Determinación de la dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio a ciertos niveles de Turbiedad	30
Figura 2. Determinación del pH óptimo de coagulación para sulfato de aluminio a ciertos niveles de Turbiedad	31
Figura 3. Determinación del tiempo óptimo de mezcla rápida para sulfato de aluminio a ciertos niveles de Turbiedad	32
Figura 4. Determinación del Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta con Gradiente de $20s^{-1}$ para Sulfato de Aluminio a Ciertos Niveles de Turbiedad	33
Figura 5. Determinación del Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta con Gradiente de $30s^{-1}$ para Sulfato de Aluminio a Ciertos Niveles de Turbiedad	34
Figura 6. Determinación del Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta con Gradiente de $40s^{-1}$ para Sulfato de Aluminio a Ciertos Niveles de Turbiedad	34
Figura 7. Determinación del Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta con Gradiente de $50s^{-1}$ para Sulfato de Aluminio a Ciertos Niveles de Turbiedad	35
Figura 8. Determinación del Gradiente y Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta para Sulfato de Aluminio a Ciertos Niveles de Turbiedad	35
Figura 9. Determinación de la curva de sedimentabilidad con Sulfato de Aluminio con Ciertos Niveles de Turbiedad	36
Figura 10. Tendencia de las curvas de sedimentabilidad para Sulfato de Aluminio con Ciertos Niveles de Turbiedad	37

RESUMEN

El motivo de este trabajo es el estudio de tratabilidad en la planta de potabilización del casco urbano del municipio de Timbío, Departamento del Cauca.

Este estudio se fundamentó en unos métodos de diagnóstico para determinar las condiciones físicas y químicas del agua, así mismo la evaluación de los parámetros óptimos de tratabilidad para el control en las operaciones de potabilización, los cuales fueron basados en ensayos de pruebas de jarras.

Se determinó el funcionamiento existente en la planta, en cuanto a los parámetros verdaderos de operación en los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, estimados matemáticamente teniendo en cuenta las dimensiones reales en cada unidad.

Con los resultados obtenidos se llevó a cabo la comparación de los parámetros teóricos de tratabilidad con los parámetros de funcionamiento en la planta de tratamiento.

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua con que cuenta una determinada comunidad depende en gran medida de las variadas características ambientales propias del lugar, ya que estas influyen en la naturaleza y particularidades de la fuente de agua destinada para uso de sus habitantes, de esta manera se precisa que las PTAP (plantas de tratamiento de agua potable) evalúen constantemente su sistema de potabilización, de acuerdo a la normatividad vigente como mecanismo de control que obligatoriamente deben ejercer para garantizar la calidad del agua potable. De este modo las plantas de tratamiento de agua para consumo humano que actualmente están en funcionamiento para la selección de sus procesos de tratamiento deben de realizar ensayos en el laboratorio siendo obligatorio entre estos, el de pruebas de jarras, para determinar el tratamiento óptimo al que debe ser sometida el agua (RAS,2017). La vigilancia de las PTAP a través de la evaluación en su sistema conlleva a minimizar los factores de riesgo que conduce al deterioro de la calidad del agua y al mejoramiento o modernización de las prácticas de operación, mantenimiento, diseño y construcción de los distintos procesos empleados al tratar el agua cruda, y así asegurar la calidad del agua apta para el consumo humano (OMS, 2006).

La cabecera municipal de Timbío cuenta con la Empresa de Servicios Públicos EMTIMBIO E.S.P para el suministro de agua potable, la cual cuenta con una PTAP de tipo convencional en la que se realizan los diferentes procesos para convertir el agua cruda a agua apta para el consumo de la población, es por esto que una evaluación pertinente a la planta de tratamiento contribuirá a encontrar algunos de los factores que estén interfiriendo con el óptimo funcionamiento y eficiencia de la planta tanto en su operación como en los diferentes procesos utilizados en el sistema de potabilización, y permitir el cumplimiento de los requisitos físico-químicos y microbiológicos establecidos en las normas que debe poseer el agua para ser segura al consumo del ser humano.

El presente documento contiene el estudio de tratabilidad de la PTAP del acueducto de la cabecera municipal de Timbío, Departamento del Cauca, mediante la realización de pruebas de jarras a nivel de laboratorio, para encontrar los parámetros óptimos de tratabilidad, además de los parámetros utilizados en el manejo real dentro de la planta, todo esto con el objetivo de analizar el funcionamiento actual de la planta y contribuir al potencial de aplicación del proceso de tratamiento de la PTAP apoyando al óptimo funcionamiento de la planta de manera que genere un mejor servicio y operación en cuanto a la calidad del agua suministrada a los usuarios.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El 96% de la población mundial urbana utiliza fuentes de agua potable mejoradas, frente al 84% de la población rural (OMS, 2015), en Latinoamérica y el Caribe el 97% de la población urbana tiene acceso a agua mejorada y se estima que es del 82% para las poblaciones rurales (BID, 2013), el 89,9% de los hogares en Colombia cuenta con servicio de acueducto, los centros poblados y rural disperso 61,2% (DANE, 2016), en el sector urbano 97.3 % (CONPES 3810, 2014). A pesar de los avances en la cobertura de este servicios y los planes nacionales para el control y vigilancia del agua para consumo humano (DNP, 2014), se siguen presentando problemas de eficiencia en este servicio, que se manifiestan en la alteración de la salud y la calidad de vida de la población, según la Organización Mundial de la salud (2018), se calcula que unas 842000 personas mueren cada año de enfermedad diarreica aguda (EDA) como consecuencia de la insalubridad del agua, ya que hay microorganismos patógenos que se vehiculizan mediante este elemento vital del consumo (MinSalud-INCA, 2014), afectando principalmente a la primera infancia en el país, aproximadamente el 85% de las muertes por EDA ocurren en niños menores de un año (MinSalud-Guía de atención de EDA, 2014).

Las personas pueden considerar que el agua muy turbia, con mucho color, o que tiene un sabor u olor desagradable es insalubre y rechazarla (OMS-guías para la calidad de agua potable). Para garantizar el cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas, se establece en Colombia el Índice de Riesgo de Calidad del Agua para consumo humano IRCA, definiendo unos rangos para el consumo humano, que van desde (0-5)% sin riesgo, a (80.1-100)% sanitariamente inviable (decreto 1575, 2007), según el informe nacional de la calidad del agua para consumo humano (2014) de 1.122 municipios del país, solo 266 municipios 40.66% de la población, consumieron agua sin riesgo y 278 municipios 12.72% de la población, consumieron agua de riesgo alto (MinSalud-INCA, 2014), además, dentro del IRCA reportado por los municipios no constatan el análisis microbiológico para *giardia* y *cryptosporidium* (Resolución 2115 de 2007).

Dentro de los factores y sucesos más frecuentes que afectan el rendimiento del tratamiento del agua están: las variaciones del caudal que superan los límites de diseño, las operaciones de tratamiento incluida la floculación, coagulación y desinfección, inadecuadas o insuficientes, medios de reserva insuficientes (infraestructuras, personal), averías y funcionamiento deficiente de los sistemas de control de las operaciones o escasa fiabilidad de los equipos (OMS guías para la calidad de agua potable). Precisamente la PTAP de EMTIMBIO no es ajena a esta realidad y lo más evidente es la variación del caudal, además el canal que conduce al sedimentador presenta una curva excesiva deshaciendo el Floc, disminuyendo la eficiencia de la floculación, conjuntamente durante los periodos ambientales secos, la turbiedad del agua cruda es menor a 5 UNT, inhibiendo la dosificación del coagulante, reduciendo la eficacia en los procesos posteriores de sedimentación, filtración y cloración (OMS-Guías para la calidad del agua, 2008).

2. JUSTIFICACIÓN

Los servicios de agua y saneamiento inexistentes, insuficientes o gestionados de forma inapropiada exponen a la población a riesgos prevenibles para su salud, dado que el agua salubre y fácilmente accesible que se utiliza para beber, para uso doméstico, para producir alimentos o para fines recreativos, mejora la salud pública especialmente se reduce el contagio de enfermedades en los niños, al mismo tiempo impulsa el crecimiento económico y contribuye en gran medida al mejoramiento de la calidad de vida de las personas (OMS, 2018).

La prestación del servicio de acueducto en la zona urbana del municipio de Timbío, la realiza EMTIMBIO, por medio de su PTAP de tipo convencional en la cual se utiliza como fuente abastecedora de agua cruda el Río Timbío, que tiene parámetros (color aparente, coliformes totales, E coli) por encima de la norma de agua potable (Resolución 2115 de 2007), los cuales pueden ser manejados sin inconvenientes por la tecnología de potabilización existente; su índice BMWP (Biological Monitoring Working Party score) es 119 y el ASPT (Average Score per Taxon) de 7,9 de calidad aceptable, aguas ligeramente contaminadas (AQUARisc, 2017). La planta dispone de una infraestructura de más de 50 años en uso conformada principalmente por una canaleta Parshall en concreto en la cual se realiza la mezcla rápida para la aplicación de coagulante (sulfato de aluminio granulado tipo B ($Al_2(SO_4)_3$)), un floculador hidráulico de flujo vertical con 45 cámaras, dos unidades de sedimentación convencionales ajustados con placas paralelas de asbesto cemento al final de la estructura, tres unidades de filtración rápida, un tanque de contacto para desinfección con cloro gaseoso, y un tanque de almacenamiento de 600 m^3 (EMTIMBIO-Inventario de Infraestructura, 2016).

Con el paso del tiempo y el cambio en las condiciones ambientales la PTAP presenta deterioro en su infraestructura y en los equipos, afectando en cierto modo los procesos, variando la eficiencia y la calidad en el servicio del acueducto que se manifiesta en el aumento del IRCA de 0,7 en 2016 a 1,7 en 2017 (Minvivienda, 2018). Dada las dificultades de operación, es importante tratar de establecer una posible solución, como primer lugar se requiere un estudio que permita determinar los parámetros óptimos para el tratamiento de la calidad del agua (dosis del coagulante, pH coagulación, tiempo de mezcla rápida, tiempo y gradiente de mezcla lenta y velocidades de sedimentación) a escala de laboratorio por medio de pruebas de jarras y en segundo lugar verificar los parámetros reales de operación del sistema, determinando, tiempo de mezcla lenta, gradiente de floculación y cargas superficiales del sedimentador (RAS,2017); Finalmente, comparar estos parámetros y efectuar recomendaciones para el mejoramiento del sistema de tratamiento. Para lograr la optimización en los diferentes procesos y operaciones de una planta potabilizadora, es conveniente un estudio de tratabilidad del agua con el fin de alcanzar la máxima eficiencia en el tratamiento (RAS, 2017).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el sistema de tratamiento de la planta potabilizadora del acueducto municipal EMTIMBIO de Timbío, Departamento del Cauca, a través de un estudio de tratabilidad del agua para consumo humano.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar los parámetros operacionales óptimos del agua cruda utilizada por la Planta de Tratamiento EMTIMBIO, a escala de laboratorio realizando pruebas de jarras con el coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo B.
- Determinar los parámetros de operación utilizados en la planta de tratamiento de EMTIMBIO.
- Generar las recomendaciones pertinentes a los resultados obtenidos, para mejorar el proceso de tratamiento de potabilización y lograr a futuro la solución de los inconvenientes del momento.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 AGUA POTABLE O AGUA PARA CONSUMO HUMANO

El desarrollo de la vida del ser humano está fundamentado en la utilización del agua, esencialmente el agua para consumo humano con la cual se satisfacen las necesidades básicas de toda persona es por esto por lo que el agua potable o agua de consumo inocua, no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud cuando se consume durante toda una vida, teniendo en cuenta las diferentes vulnerabilidades que pueden presentar las personas en las distintas etapas de su vida (OMS, 2006), así mismo debe cumplir con las características físicas, químicas y microbiológicas, condiciones señaladas en las normas que la reglamenten, y que pueda ser utilizada en bebida directa, en la higiene personal, en la preparación de alimentos y en todos los usos domésticos (decreto 1575, 2007).

Para la identificación de las características que reúne el agua potable, se tienen en cuenta algunos criterios y valores máximos aceptables.

4.1.1 Características Físicas

Según la resolución 2115 de 2007, el agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación:

Cuadro N.º 1 Características Físicas del agua potable

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2
pH	Unidades	6,5 – 9,0

4.1.1.1 Color

Idóneamente, el agua de consumo no debe tener ningún color apreciable. Generalmente, el color en el agua de consumo se debe a la presencia de materia orgánica coloreada (principalmente ácidos húmicos y fúlvicos) asociada al humus del suelo. Asimismo, la presencia de hierro y otros metales, bien como impurezas naturales o como resultado de la corrosión, también tiene una gran influencia en el color del agua. También puede proceder de la contaminación de la fuente de agua

con vertidos industriales y puede ser el primer indicio de una situación peligrosa. Si el agua de un sistema de abastecimiento tiene color, se debe investigar su origen, sobre todo si se ha producido un cambio sustancial. La mayoría de las personas puede percibir niveles de color mayores que 15 unidades de color verdadero (UCV) en un vaso de agua. Un nivel de color alto también puede indicar una gran propensión a la generación de subproductos en los procesos de desinfección (OMS, 2006).

4.1.1.2 Olor y sabor

El sabor y el olor del agua pueden tener su origen en contaminantes químicos naturales, orgánicos e inorgánicos, y fuentes o procesos biológicos (por ejemplo, microorganismos acuáticos), o en la contaminación debida a sustancias químicas sintéticas, o pueden ser resultado de la corrosión o del tratamiento del agua (por ejemplo, la cloración). También pueden desarrollarse durante el almacenamiento y la distribución. Los sabores u olores del agua de consumo pueden revelar la existencia de algún tipo de contaminación, o el funcionamiento deficiente de algún proceso durante el tratamiento o la distribución del agua. Por lo tanto, puede indicar la presencia de sustancias potencialmente dañinas. Se debe investigar la causa y consultar a las autoridades de salud pertinentes, sobre todo si el cambio experimentado es sustancial o repentino. Los consumidores también pueden percibir en el agua de consumo turbiedad, color, partículas u organismos visibles, lo que afecta a su aceptabilidad y puede generar preocupación por su calidad (OMS, 2006).

4.1.1.3 Turbiedad

La turbiedad en el agua es causada por materia suspendida y coloidal tal como arcilla, sedimento, materia orgánica e inorgánica dividida finamente, plancton y otros microorganismos microscópicos. La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que causa la luz al ser dispersada y absorbida en vez de transmitida sin cambios en la dirección del nivel de flujo a través de la muestra: en otras palabras, es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión; a mayor intensidad de dispersión de la luz, la turbiedad será mayor. La correlación de la turbiedad con el peso o concentración del número de partículas de material suspendido es difícil debido a que el tamaño, forma e índice de refracción de las partículas afecta las propiedades de dispersión de la luz de la suspensión.

La determinación de turbiedad es de gran importancia en aguas para consumo humano y en un gran número de industrias procesadoras de alimentos y bebidas. Los valores de turbiedad sirven para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y consecuentemente, la tasa de

filtración más adecuada, la efectividad de procesos de coagulación, sedimentación y filtración, así como para determinar la potabilidad del agua (IDEAM, 2007).

4.1.1.4 Temperatura

La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como la aptitud del agua para ciertos usos útiles. La temperatura es un indicador de la calidad del agua, que influye en el comportamiento de otros indicadores de la calidad del recurso hídrico, como el pH, el déficit de oxígeno, la conductividad eléctrica y otras variables fisicoquímicas, según la legislación canadiense para agua de consumo la concentración máxima aceptable de temperatura es 15°C (DIGESA, 2006), en la Resolución 2115 de 2007 de la legislación colombiana, si esta alcanza los 35°C ya se convierte en un indicador de contaminación microbiológica del agua para consumo humano. El agua fría tiene, por lo general, un sabor más agradable que el agua tibia, y la temperatura repercutirá en la aceptabilidad de algunos otros componentes inorgánicos y contaminantes químicos que pueden afectar al sabor. La temperatura alta del agua potencia la proliferación de microorganismos y puede aumentar los problemas de sabor, olor, color y corrosión (OMS, 2006).

4.1.1.5 Potencial de Hidrogeno pH

El término pH es una forma de expresar la concentración de ión hidrógeno o, más exactamente, la actividad del ión hidrógeno. En general se usa para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución, sin que esto quiera decir que mida la acidez total o la alcalinidad total. En el suministro de aguas es un factor que debe considerarse con respecto a la coagulación química, la desinfección, el ablandamiento y el control de corrosión (IDEAM, 2007). Se mide en una escala de 0 a 14, en la escala 7, la sustancia es neutra. Los valores de pH por debajo de 7 indican que una sustancia es ácida y los valores de pH por encima de 7 indican que es básica. Cuando una sustancia es neutra el número de los átomos de hidrógeno y de oxhidrilos son iguales. Cuando el número de átomos de hidrógeno (H^+) excede el número de átomos del oxhidrilo (OH^-), la sustancia es ácida. El pH no ejerce efectos directos en los consumidores, es uno de los parámetros indicadores de la calidad del agua. Para que la desinfección con cloro sea eficaz es preferible que sea un pH inferior a 8. En valores superiores de pH 11 produce irritación ocular y agravación de trastornos cutáneos (DIGESA, 2006).

4.1.2 Características Químicas

Según la resolución 2115 encargada del control y vigilancia para la calidad del agua, las características químicas del agua para consumo humano son aquellas que debido a los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana y deben enmarcarse en unos valores máximos aceptables que se señala en la norma. Para conocer el estado que guarda el agua que será procesada para consumo humano se hace referencia al siguiente parámetro químico.

4.1.2.1 Alcalinidad

La alcalinidad del agua es su capacidad de neutralizar ácidos, y es la suma de todas las bases titulables; debido a que la alcalinidad de muchas aguas superficiales es primariamente una función del contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, se toma como un indicador de la concentración de estos constituyentes. Los valores medidos también pueden incluir contribuciones de boratos, fosfatos, silicatos, u otras bases que estén presentes en el agua. Las mediciones de alcalinidad se emplean en la interpretación y control de los procesos de tratamiento de aguas. Los iones hidroxilo presentes en una muestra como resultado de disociación o hidrólisis de solutos reaccionan con adiciones de ácido estándar. En consecuencia, la alcalinidad depende del pH de punto final empleado (IDEAM). La alcalinidad del agua se debe principalmente a sales de ácidos débiles y a bases fuertes, y esas sustancias actúan como amortiguadores para resistir la caída del pH. Generalmente se expresa en mg/L de CaCO_3 o meq/L ($1 \text{ meq/L CaCO}_3 = 50 \text{ ppm CaCO}_3$) (DIGESA, 2006), en la normatividad colombiana el valor máximo aceptable es de 200 mg/L CaCO_3 (Resolución 2115, 2007).

4.2 TEORIA DE LA COAGULACIÓN DEL AGUA

4.2.1 Coagulación

Se define coagulación como la aglutinación de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua mediante la adición de coagulantes (RAS, 2017).

4.2.2 Coagulantes

Los coagulantes son Sustancia química que, añadidas al agua cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie de los coloides permitiendo la aglomeración y la

formación de flóculos. Estos flóculos inicialmente son pequeños, pero se juntan y forman aglomerados mayores capaces de sedimentar. Las suspensiones coloidales suelen estar cargadas negativamente por lo que se usa un coagulante que aporte cargas positivas, como son sulfato de alúmina y sulfato de hierro (III) (UCLM, 2006).

4.2.3 Proceso de coagulación

El tratamiento basado en la coagulación química es el método más común de tratamiento de aguas superficiales y casi siempre se basa en los procesos unitarios siguientes. Se añaden al agua bruta coagulantes químicos, habitualmente sales de aluminio o de hierro, en condiciones controladas para formar un hidróxido metálico floculento sólido. Las dosis de coagulante habituales son de 2 a 5 mg/l para las sales de aluminio y de 4 a 10 mg/l para las de hierro. El flóculo precipitado retira los contaminantes suspendidos y disueltos en el agua mediante mecanismos de neutralización de carga, adsorción y atrapamiento (OMS, 2006).

4.2.4 Etapas de la coagulación

Primera: Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes y su consecuente polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas. Segunda: Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr la desestabilización del coloide. Tercera: Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante un puente entre las partículas que involucra el transporte de estas y las interacciones químicas. Cuarta: Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante el transporte de estas y las fuerzas de Van der Waals. Quinta: Formación de los flóculos. Sexta: Precipitación del hidróxido metálico. Algunas de estas etapas ocurren secuencialmente. Otras coinciden parcialmente y otras incluso pueden ocurrir simultáneamente. Se puede suponer que las diferentes etapas de la reacción pueden resultar controlables en un cierto porcentaje, bajo diversas condiciones químicas (CEPIS, 2004).

4.2.5 Diagramas de coagulación

Investigaciones efectuadas durante la década pasada han desarrollado, el diagrama de coagulación con sulfato de aluminio y el diagrama de coagulación con hierro, diagramas sencillos, pero herramientas muy efectivas para indicar las condiciones de dosis químicas y pH en que ocurre una efectiva coagulación. Los diagramas pueden ser usados para predecir las condiciones de coagulación: (i) remoción de turbiedad, (ii) remoción de color, (iii) filtración directa y (iv) selección de unidades de mezcla rápida y pueden ser obtenidos a través de ensayos de laboratorio. Es muy importante que un proyectista o un operador de una planta de

tratamiento conozca los fundamentos de los diagramas. Estos diagramas posibilitarán la toma de decisiones correctas, tanto para la elección de la tecnología de tratamiento apropiada, como para la optimización de la coagulación, con considerable economía en productos químicos (CEPIS, 2004).

Según el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), y en base a su Diagrama de coagulación del sulfato de aluminio y potencial zeta, se distinguen los mecanismos de coagulación y reestabilización de las partículas coloidales en cuatro regiones:

Región 1. Ocurre la neutralización de la carga de las partículas coloidales para las especies hidrolizadas positivas, de aluminio, que son adsorbidas en la superficie de los coloides. De la interacción entre tales especies del coagulante, positivas, y los coloides, negativos, resulta una curva en la que el PZ (negativo) se aproxima de cero a un valor de pH del orden de 4,8, que caracteriza el PIZ de los coloides recubiertos con especies de coagulante. Es evidente que, si el pH de 4,8 es mantenido constante, la dosis de coagulante podrá variar, aproximadamente, de 10 a 70 mg/L.

Región 2. Sea, por ejemplo, la dosis de sulfato de aluminio en la fase arriba mencionada y pH 4,8. Si el pH disminuyese, las partículas recubiertas presentarían PZ negativo, y permanecería estabilizada la dispersión coloidal. Pero, con el aumento de pH (mayor de 4,8), el PZ se torna positivo y también los coloides, lo que caracteriza el fenómeno de la reestabilización. Para un valor de pH fijo igual a 6, por ejemplo, existe una relación estequiométrica entre la concentración de la dispersión coloidal y la dosis de coagulante, que hace surgir las líneas (A, B, C, etc.) que delimitan la parte inferior de la zona de reestabilización, con consecuente aumento de la concentración de la dispersión coloidal. La desestabilización que causa la aparición de la delimitación superior de la región de reestabilización ha sido atribuida a la presencia de iones sulfato y al aprisionamiento de los coloides reestabilizados en complejos de sulfato de tipo $Al(H_2O)SO_4^+$.

Región 3. Considerando una dosis de coagulante igual a 10 mg/L, se nota que a partir del pH 4,8, la curva resultante de la interacción entre las especies hidrolizadas positivas de aluminio y las partículas coloidales asigna un valor de PZ máximo (reestabilización) y disminuye con el aumento de pH, hasta que el PIZ es nuevamente logrado, en un valor de pH alrededor de 6,8 (para aquella dispersión coloidal considerada) y una dosis de coagulante igual a 10 mg/L. Esto se debe a la presencia del hidróxido de aluminio con carga positiva. Para varias dosis de coagulante comprendidas entre 3 y cerca de 30 mg/L, existe una región conocida como "corona" en la cual el mecanismo de coagulación se debe a la neutralización de carga para el hidróxido de aluminio positivo. Esa región es considerada ideal para la coagulación cuando se tiene la filtración directa, ascendente o descendente.

Región 4. Generalmente, para valores de pH de 6 a 8 con dosis de coagulante superiores a un valor próximo de 30 mg/L, tiende a ocurrir la formación excesiva de los precipitados de hidróxido de aluminio, de forma que las partículas coloidales son aprisionadas en los mismos, lo que caracteriza el mecanismo de barrido, cuya región, delimitada por el par de valores dosis de coagulante–pH de coagulación, es relativamente amplia. La coagulación realizada en ese mecanismo es la recomendada cuando se tiene tratamiento completo con coagulación, floculación y decantación antes de la filtración, pues los flóculos obtenidos son fácilmente removidos en los decantadores.

4.2.6 Efectividad de la coagulación

La eficiencia del proceso de coagulación es función de la calidad del agua bruta, del coagulante o aditivos de coagulación utilizados y de factores operativos, como las condiciones de mezclado, la dosis de coagulación y el pH. El flóculo se retira del agua tratada mediante procesos posteriores de separación de sólidos y líquidos como la sedimentación o flotación, la filtración rápida por gravedad o a presión, o una combinación de métodos.

4.3 PROCESO DE FLOCULACIÓN

4.3.1 Floculación

Se define la floculación como la aglutinación de partículas inducida por una agitación lenta de la suspensión coagulada (RAS, 2017).

4.3.2 Propósito de la Floculación

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia (CEPIS, 2004).

4.3.3 Clases de Floculadores

Para que se puedan generar los flóculos en este proceso se hace necesario que se dé un movimiento sosegado y estable del agua lo cual se logra por medio del manejo de estructuras llamadas floculadores. de acuerdo con el tipo de energía utilizada para agitar la masa de agua, se suelen clasificar los floculadores en **mecánicos**, los cuales requieren de motores para hacer mover el agua y en

hidráulicos, los cuales generan la movilidad del agua por medio de su propia velocidad de flujo. Puede hacerse una clasificación más amplia si se tiene en cuenta el modo como se realiza la aglomeración de las partículas. De acuerdo con este principio, se pueden clasificar del siguiente modo (CEPIS, 2004):

- Floculadores de contacto de sólidos: mecánicos e hidráulicos. Los floculadores de contacto de sólidos o de manto de lodos son controlados por la concentración de sólidos. Como esta varía continuamente, es necesaria una constante atención del operador.
- Floculadores de potencia o de disipación de energía: hidráulicos: de pantallas, helicoidales, de medios porosos y de tuberías. Mecánicos: de paletas y de turbina. En los floculadores de potencia, las partículas son arrastradas por el flujo de agua a través del tanque de floculación sin que prácticamente exista concentración de sólidos.

En el proceso de floculación cuando se emplean los floculadores hidráulicos pueden ser: de flujo horizontal, flujo vertical, flujo helicoidal y Alabama (RAS, 2017)

4.3.3.1 Floculador de flujo horizontal

Para utilizar un floculador de flujo horizontal, el tanque debe estar dividido por pantallas de concreto u otro material adecuado, dispuesto de forma que el agua haga un recorrido de ida y vuelta alrededor de las mismas. Debe dejarse suficiente espacio para la limpieza de los canales; si éstos son muy estrechos las pantallas deben ser removibles.

4.3.3.2 Floculador de flujo vertical

En el floculador de flujo vertical el agua debe fluir por encima y por debajo de las pantallas que dividen el tanque. La unidad puede tener una profundidad de 2 m a 5 m, debe dejarse una abertura en la base de cada pantalla con un área equivalente al 5% del área horizontal del compartimiento, para prevenir la acumulación de lodos.

4.3.3.3 Floculador de flujo helicoidal

En los floculadores de flujo helicoidal el agua debe entrar por el fondo, en la esquina de la cámara y debe salir por encima en la esquina opuesta; la cámara debe ser cuadrada o circular. Pueden usarse pantallas horizontales delgadas que cubran el 30% del área superficial; deben colocarse de manera que impidan la formación de cortocircuitos. Además, debe diseñarse un desagüe por cámara para

la extracción de los lodos; se recomienda utilizarlos en aguas con baja turbiedad y que no contengan sólidos pesados en especial arena.

4.3.3.4 Floculador Alabama

En los floculadores Alabama debe ubicarse un codo en cada cámara para impulsar el fluido hacia arriba. Los codos deben colocarse de forma alternada, en una cámara a la derecha y en la que sigue a la izquierda; en el fondo debe dejarse un desagüe conectado a un múltiple para permitir la extracción de los lodos. En cada tabique debe dejarse una boca de drenaje.

4.3.4 Eficiencia de la floculación

La agitación no debe ser ni muy lenta que favorezca la sedimentación, ni muy rápida que provoque el rompimiento de los flóculos ya formados. El tiempo y el gradiente óptimo deben ser los obtenidos en la prueba de jarras. Para el gradiente medio de la velocidad es necesario tener en cuenta el cambio de escala y la hidrodinámica en el sistema real. Cuando sea posible optimizar el valor de G en el mismo sitio (RAS, 2017).

4.3.4.1 Factores de mayor influencia en el proceso de la floculación

Los factores que más influyen en la eficacia de este proceso son: la naturaleza del agua, las variaciones de caudal, la intensidad de agitación (Gradiente de velocidad), el tiempo de floculación, y el número de compartimentos (pantallas o cámaras en el tanque de floculación) de la unidad (CEPIS, 2004):

4.4 PROCESO DE SEDIMENTACIÓN

4.4.1 Sedimentación

Proceso en el cual los sólidos suspendidos en el agua se decantan por gravedad, previa adición de químicos coagulantes (RAS, 2017).

4.4.2 Propósito de la sedimentación

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión

más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada (CEPIS, 2004).

4.4.3 Mecanismo de la sedimentación

Dado que las partículas en suspensión se precipitan de forma diversa por efecto gravitacional dependiendo de las características de estas, así como de su concentración. Es así como se puede referir a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida (CEPIS, 2004):

4.4.3.1 Sedimentación de partículas discretas

Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas.

4.4.3.2 Sedimentación de partículas floculentas

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas —forma, tamaño, densidad— sí cambian durante la caída. Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas.

4.4.3.3 Sedimentación por caída libre e interferida

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal.

4.4.4 Tipos de sedimentadores

Según el Servicio Nacional de Aprendizaje, en su curso de operación y mantenimiento de plantas de potabilización de agua, resumen los tipos de sedimentadores, siendo que existen varias formas de clasificarlos y las concretan así: una de ellas es la diferencia por su forma: rectangulares, circulares y cuadrados; otra es por el sentido de flujo: horizontales y verticales; y la última es por la condición de funcionamiento: convencionales y laminares (tubos o placas paralelas) o modulares o de alta tasa.

4.4.4.1 Características de los sedimentadores

Los sedimentadores rectangulares tienen la ventaja que permiten una implantación más compacta, presentan operación tipo convencional con flujo horizontal, normalmente, tienen una relación longitud/ancho comprendida entre 3 y 6 y una profundidad de 2,50 a 4,00 metros. Los sedimentadores de forma circular o cuadrada disponen normalmente de una zona de entrada ubicada en el centro de la unidad. Están provistos de canaletas (periféricas y/o radiales) para la recolección de agua sedimentada y presentan flujo vertical. La profundidad normal de estas unidades está comprendida entre 2,00 y 3,50 metros. Los sedimentadores laminares presentan ductos de sección circular y placas paralelas, para que por ahí fluya el agua (CEPIS, 2004).

4.4.5 Eficiencia de la sedimentación

La eficiencia de los sedimentadores depende principalmente, de las características del agua cruda, del área y las características de la sección de sedimentación, la velocidad del flujo, la carga superficial, la temperatura del agua y el proceso de coagulación-floculación preliminar.

5 METODOLOGÍA

5.1 MARCO CONTEXTUAL, PLANTA DE TRATAMIENTO "EMTIMBIO"

El municipio de Timbío está ubicado en el departamento del Cauca a 13 kilómetros de su capital Popayán, con coordenadas 2°21'22"Norte y 76°41'16"Oeste (PGRM Timbío), el ente encargado de la prestación de los servicios públicos de agua, alcantarillado y aseo en la cabecera municipal es: EMTIMBIO E.S.P., Empresa de Servicios Públicos de Timbío creada por el Acuerdo 012 de 1996 del Concejo Municipal como una empresa industrial y comercial del Estado del orden municipal.

EMTIMBIO, cuenta con una planta de tratamiento tipo convencional de distribución por gravedad, diseñada con 30 L/s de caudal, construida en 1968, ubicada a 2°20'46,79"Norte y 76°40'30,72"Oeste. La planta de tratamiento "EMTIMBIO" se encuentra situada en la parte alta del barrio Belén del municipio de Timbío, trabaja continuamente y para su operación cuenta con tres técnicos y un ingeniero ambiental.

La planta es de funcionamiento hidráulico mínimamente sistematizada; y consta de los siguientes procesos: coagulación y aforo en canaleta Parshall, floculación hidráulica con floculadores de flujo vertical, un canal de conducción a los sedimentadores convencionales, por tubería circula el agua a tres unidades de filtración rápida con lecho en arena y antracita y desinfección con cloro gaseoso en el tanque de contacto.

5.2 DESARROLLO METODOLÓGICO ESPECÍFICO

La evaluación del sistema de tratamiento de la planta potabilizadora de EMTIMBIO, se realizó dentro de sus instalaciones efectuando principalmente el registro de la calidad del agua proveniente de la fuente, analizando las características organolépticas y físico-químicas esenciales, de las cuales se analizaron: turbiedad, pH, alcalinidad y temperatura; Por limitaciones técnicas no se logró analizar la característica física de color, a pesar de que en la propuesta se planteó el análisis de este, en la empresa no se cuenta con este equipo para mediciones de este parámetro.

Posteriormente se determinaron los parámetros óptimos de tratabilidad relacionados con el proceso de coagulación, floculación y sedimentación, con ensayos a escala de laboratorio, así mismo, se determinó los parámetros operacionales de funcionamiento de la planta a escala real como lo son: los tiempos de mezcla lenta, el gradiente de floculación y las cargas superficiales del sedimentador. Finalmente, ya determinados los parámetros óptimos a escala de

laboratorio, y los parámetros de funcionamiento que se utilizan en la planta para la potabilización del agua; se logra establecer las observaciones pertinentes del caso y establecer las recomendaciones concernientes al estudio.

5.2.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS Y FÍSICOQUÍMICAS DEL AGUA CRUDA.

5.2.1.1 Determinación de la Temperatura

La temperatura del agua a tratar se determinó mediante termometría realizada “in situ”, se midió con un termómetro bimetalico de inmersión parcial, el valor de temperatura se tomó directamente de la escala del instrumento de medición y se apuntó la lectura en grados Celsius (°C). Las lecturas se realizaron directamente sobre el agua.

5.2.1.2 Determinación de la Turbiedad

La turbiedad del agua a tratar se determinó por método nefelométrico, empleando un turbidímetro HACH 2100 N, para lo cual, se llenaba la celda con aproximadamente 25 ml de muestra de agua, se colocaba ésta en el equipo bien seca, limpia y eliminadas las burbujas de aire y ya calibrado, acuerdo con las instrucciones del fabricante se procedía a leer directamente el resultado en Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT).

5.2.1.3 Determinación de pH

El pH del agua analizado se halló con el método potenciométrico, para el cual se utilizó un pH-metro calibrado, del cual se sumergía el bulbo del electrodo a un beacker con el agua cruda a tratar y cuando se estabilizaba la lectura, se tomó aquella que indicaba el equipo en unidades de pH.

5.2.1.4 Determinación de la Alcalinidad

La alcalinidad se determinó por titulación con solución de ácido sulfúrico, para lo cual se midió 50 ml de muestra que se vertieron al Erlenmeyer de 250 ml y se agregó agitando dos gotas del reactivo indicador naranja de metilo, tornando el agua a color amarillo, seguidamente se tituló, bajo una bureta con solución de ácido sulfúrico (0,02 N), agitando y añadiendo gota a gota hasta el viraje a color púrpura.

Para el cálculo de la alcalinidad total de la muestra se usó la ecuación:

$$\text{Alcalinidad Total} = \frac{T_x N_x 50000}{\text{ml de la muestra}}$$

Donde:

T = Volumen Total de H_2SO_4 gastado en la Titulación. N = Normalidad del H_2SO_4

5.2.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE COAGULACIÓN

El proceso de coagulación a nivel de laboratorio se realizó a través de pruebas de jarras usando el coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B ($Al_2(SO_4)_3$), se encontraron: la dosis óptima de coagulante, la concentración de solución madre, el pH óptimo de coagulación y el tiempo de mezcla rápida

5.2.2.1 Determinación de la solución madre óptima

La solución madre óptima de coagulante se determinó mediante la evaluación de soluciones con concentraciones de 1, 2, 5, 7 y 10% peso/volumen (P/V); para su preparación se empleó sulfato de aluminio líquido tipo B ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$). La dosificación del coagulante en la planta se efectúa con el peso del coagulante sólido. La solución para las pruebas de jarras realizadas en el laboratorio se preparó pesando 1 g del coagulante y disolviéndolo en 100 ml de agua, obteniendo una disolución del sulfato de aluminio con concentración al 1%, para la dosificación del coagulante en los demás ensayos.

5.2.2.2 Determinación de dosis óptima

Una vez determinada la solución madre óptima se establecieron rangos de dosis de coagulante a adicionar y se procedió a realizar la prueba de jarras adicionando el coagulante al mismo tiempo en cada jarra; los parámetros de tratabilidad que se tuvieron en cuenta fueron: gradiente de mezcla rápida 300 RPM aproximadamente, tiempo de mezcla rápida 1 minuto, gradiente de velocidad para mezcla lenta 40 RPM tiempo de mezcla lenta 20 minutos, tiempo de sedimentación 20 minutos. Una vez culminadas las pruebas de jarras se evaluaron las condiciones de las muestras de cada una de las celdas con relación al pH residual, alcalinidad y remoción de turbiedad. Luego se seleccionó el rango óptimo de dosis. El criterio de selección se basó en el reporte de las mayores eficiencias de remoción de turbiedad al final del proceso de sedimentación.

5.2.2.3 Determinación del pH de Coagulación

Determinada la concentración de la solución madre y la dosis óptima, se procedió a estudiar un rango de pH comprendido entre 6.5 y 9.0, con el fin de encontrar el pH óptimo de coagulación. Para ello se ajustaron los pH de las muestras de agua cruda a este rango con solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 0.1 N o solución de cal al 10% de acuerdo con los requerimientos del caso. Se realizó la prueba de jarras de manera convencional con la concentración de solución madre y dosis óptima determinados y aproximando el pH en cada una de las jarras, al finalizar la

prueba se determinó el rango de pH de coagulación óptimo, el cual se seleccionó de acuerdo con los resultados de eficiencias de remoción de turbiedad.

5.2.2.4 Tiempo de Mezcla Rápida

Una vez ajustados los parámetros anteriores se realizaron pruebas para determinar el tiempo de mezcla rápida, las cuales se efectuaron con la solución madre, pH y dosis óptimas determinadas. Para estudiar el tiempo de mezcla rápida se acondicionó el equipo de pruebas de jarras con velocidad de 300 RPM, se usó la misma dosis de coagulante en cada jarra, se dosificó con un intervalo de 10 segundos de diferencia en cada una de las jarras que componen la prueba con el fin de obtener diferentes tiempos de mezcla rápida. Al final de la prueba se determinó el mejor tiempo de mezcla rápida, según los resultados obtenidos con las mayores eficiencias de remoción turbiedad.

5.2.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE FLOCULACIÓN

Para esta fase se utilizaron los parámetros óptimos obtenidos para el proceso de coagulación (dosis de coagulante, solución madre, pH y tiempo de mezcla rápida) determinados en las pruebas anteriores, con estas variables se efectuó la mezcla rápida, al finalizarla se inició el proceso de floculación, variando la velocidad de rotación de 20 RPM (13 s⁻¹) a 50 RPM (40 s⁻¹), los gradientes de mezcla se estimaron con las curvas que relacionan los gradientes de velocidad en s⁻¹ Vs revoluciones por minuto a 10 °C de temperatura. Para cada gradiente se emplearon tiempos de floculación comprendidos en un rango de 5 hasta 60 minutos, usando diferentes intervalos de tiempo en cada jarra. Al finalizar la prueba y ajustar cada uno de los parámetros, se determinó el gradiente y el tiempo óptimo de floculación con base en las eficiencias de remoción de turbiedad.

5.2.4 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE SEDIMENTACIÓN

En este proceso se efectuó la prueba de jarras convencional, empleando los parámetros óptimos de coagulación y floculación determinados en los procesos anteriores. completado el proceso de floculación se detuvo el equipo y se tomaron muestras de cada jarra empleando rangos de tiempos de sedimentación comprendidos entre 5 y 60 minutos cada 5 minutos por jarra, además se tomó la distancia desde el nivel del agua hasta el punto donde sale la muestra a las cuales se les medía las turbiedades respectivas, para obtener la velocidad de sedimentación para cada muestra y luego realizar la curva de sedimentabilidad, que se graficó con los resultados obtenidos de la determinación del parámetro de turbiedad (fracción remanente) y la velocidad de sedimentación.

5.2.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP) DE EMTIMBIO

Para determinar los parámetros de coagulación, floculación y sedimentación, bajo los cuales se encuentra funcionando la planta de tratamiento, se llevaron a cabo las mediciones geométricas de cada una de las secciones, conociendo el caudal de funcionamiento y encontrando las pérdidas de carga. La pérdida de carga se midió como la diferencia de los niveles de agua de entrada y salida de cada estructura. El tiempo de mezcla se estimó con base en el volumen de agua contenido en la estructura y el caudal medido a la entrada de la unidad. El

gradiente de mezcla se estimó con base en la ecuación:
$$G = \sqrt{\frac{\gamma * h}{\mu * Tm}}$$

Donde:

γ = Peso específico del agua

μ = Viscosidad del agua

h = Perdida de carga

Tm = Tiempo de mezcla

Para analizar el funcionamiento de los sedimentadores, se determina la carga superficial equivalente (V_{sc}), por medio de la siguiente formula:

$$V_{sc} = \frac{V_o}{\text{sen } \theta \left(\frac{l}{e} - 0,013 Re \right) \text{cos} \theta}$$

Donde:

V_o = Velocidad del flujo en medio de las placas

θ = Ángulo de inclinación de las placas

l = Longitud de las placas

e = Espaciamiento entre las placas

Re = Número de Reynolds

Y por consiguiente se encuentra la carga superficial = $\frac{Q}{As}$

Donde: Q = Caudal del agua y As = Área superficial

5.2.6 COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE TRATABILIDAD Y LOS ENCONTRADOS EN EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

Se analizaron los resultados obtenidos en las distintas pruebas de jarras realizadas y se confrontaron con los arrojados en los procesos de tratamiento de la planta, basándose en el funcionamiento de las eficiencias de remoción de turbiedad registrados para cada uno los procesos y finalmente se determinaron las recomendaciones pertinentes para que se logre ajustar el tratamiento a los parámetros óptimos encontrados en el estudio.

6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Determinación de los parámetros óptimos del proceso de coagulación

6.1.1 Determinación de la Dosis Óptima de coagulante

Los resultados obtenidos al realizar pruebas de jarras se obtuvieron variando la dosis de coagulante aplicada, la cual se tomó de la solución madre preparada al 1% con sulfato de aluminio granulado tipo B: $Al_2(SO_4)_3$. Utilizando la fórmula $C_1V_1=C_2V_2$ se determinó el volumen de la solución que se utilizó para conseguir la concentración adecuada de coagulante en cada jarra. El parámetro para evaluar después de cada ensayo fue turbiedad.

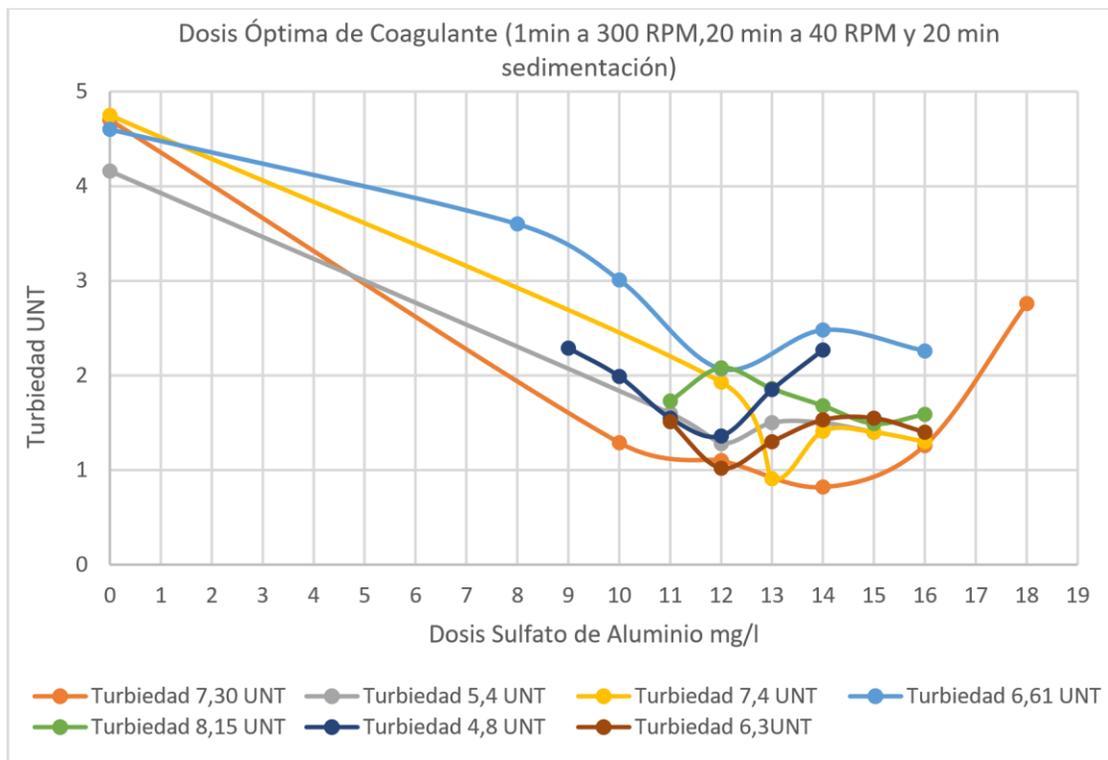


Figura 1. Determinación de la dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio a distintas Turbiedades

Con relación al parámetro de la turbiedad para las distintas pruebas realizadas se obtiene, como se muestra en la gráfica, que las dosis entre 11 y 16 mg/l, presentan la mejor remoción de turbiedad, no obstante, para dosis diferentes a estas la eficiencia disminuye, puesto que al aumentarse o disminuirse la dosis de sulfato de aluminio no se logra la reducción de las cargas eléctricas superficiales de las partículas coloidales y se disminuye la formación del floc.

6.1.2 Determinación del rango de pH óptimo de Coagulación

En la figura 2 se presenta los resultados de la determinación del pH óptimo de coagulación con respecto al parámetro de turbiedad.

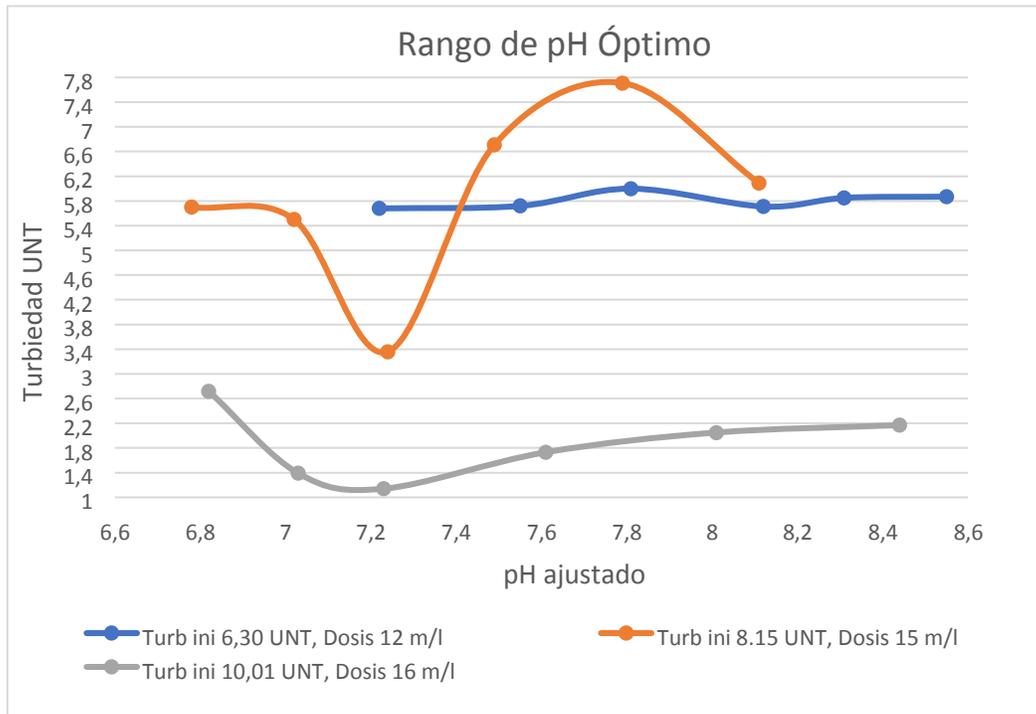


Figura 2. Determinación del pH óptimo de coagulación para sulfato de aluminio a distintas Turbiedades

Con respecto a la Figura 2 se puede observar que la mejor remoción de turbiedad se presenta a un pH ajustado de 7,2 , teniendo en cuenta que para las tres turbiedades iniciales se logró al finalizar para cada prueba de jarras, la menor turbiedad final a este pH, siendo este valor el que posee el agua de la fuente de abastecimiento, lo que manifiesta que para el tratamiento del agua cruda no necesita corregirse el pH, dado que el agua a tratar ya tiene el pH óptimo de coagulación, el cual garantiza mayor eficiencia del proceso para el parámetro evaluado.

6.1.3 Tiempo de Mezcla Rápida

La Figura 3, muestra los resultados de la determinación del tiempo de mezcla rápida.

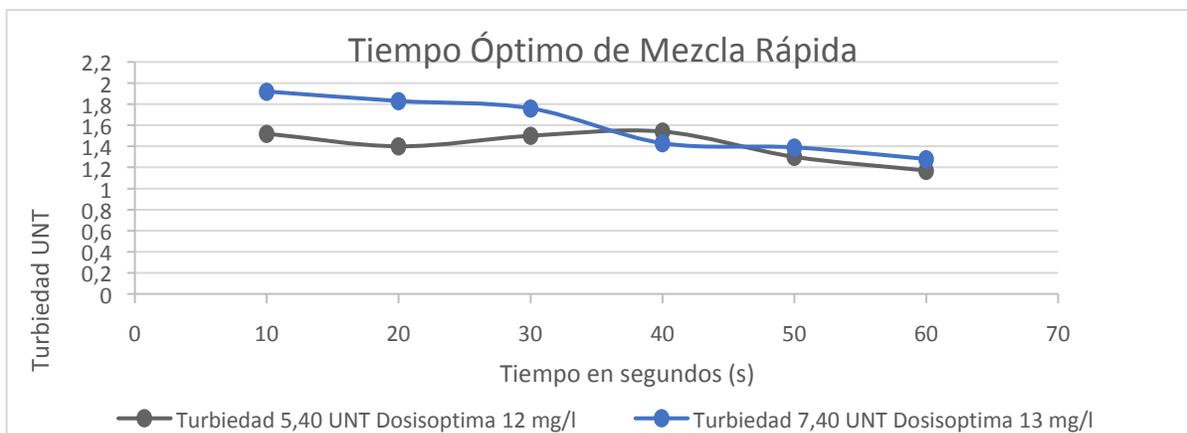


Figura 3. Determinación del tiempo óptimo de mezcla rápida para sulfato de aluminio a diferente Turbiedad

El tiempo óptimo de mezcla rápida determinado para el sulfato de aluminio granulado tipo B es de 60 segundos de acuerdo con la figura 4, con el que se obtienen las menores turbiedades. A menor tiempo de mezcla rápida se evidencia un aumento de turbiedad medida, sin embargo, estas son inferiores a 2 UNT. Se muestra que el sulfato de aluminio granulado requiere de 1 minuto de tiempo para la mezcla rápida, permitiendo que éste se disperse totalmente en el agua cruda y asegure el proceso de aglutinación de las partículas.

6.1.4 Determinación de la Alcalinidad

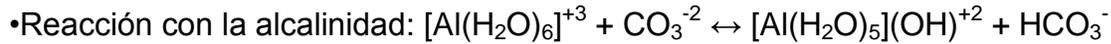
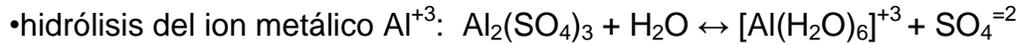
Se realizó el análisis de la alcalinidad en el agua con la cual se procedió a realizar las pruebas de jarras y se obtuvieron los siguientes resultados resumidos en el cuadro 2.

Cuadro N.º 2 Alcalinidad del agua en las pruebas de jarras con diferentes turbiedades

Muestras de agua con dosis en mg/L de Sulfato de Aluminio	Alcalinidad del agua al final de las pruebas de jarra en mg/L de CaCO ₃
Ninguna dosis	24
12 – 15	20
16 – 18	18

La alcalinidad encontrada en el agua cruda presentó un valor constante de 24 mg/L de CaCO₃, mostrando una estabilidad de este parámetro durante el período de estudio. Además, en las pruebas se obtuvo un resultado aceptable en cuanto a la normatividad estando por debajo del valor permitido (200 mg/L de CaCO₃). Al adicionar el coagulante como se muestra en el cuadro 2, se obtiene un valor

máximo de 20 mg/L de CaCO₃ y un valor mínimo de 18 mg/L de CaCO₃ en la alcalinidad final de las muestras de agua tratadas a ciertas dosis de sulfato de aluminio, siendo estas suficientes para que se produjera un buen proceso en la reacción del coagulante; reacción de sulfato de aluminio que se resume así:



•Compuesto inestable, se hidroliza y forma complejos polinucleares: $[Al_2(OH)_2]^{+4}$, $Al_7(OH)_{17}^{+4}$, $Al_{13}(OH)_3^{+5}$, etc. Hidróxidos de aluminio insolubles que precipitan

6.1.5 Determinación de los Parámetros Óptimos del Proceso de Floculación

En las figuras 4 a 7 se presentan los resultados obtenidos de la determinación del tiempo óptimo de floculación comprendidos entre 10 y 35 minutos y de los gradientes de mezcla lenta los cuales se encuentran entre 20 s⁻¹ y 50 s⁻¹.

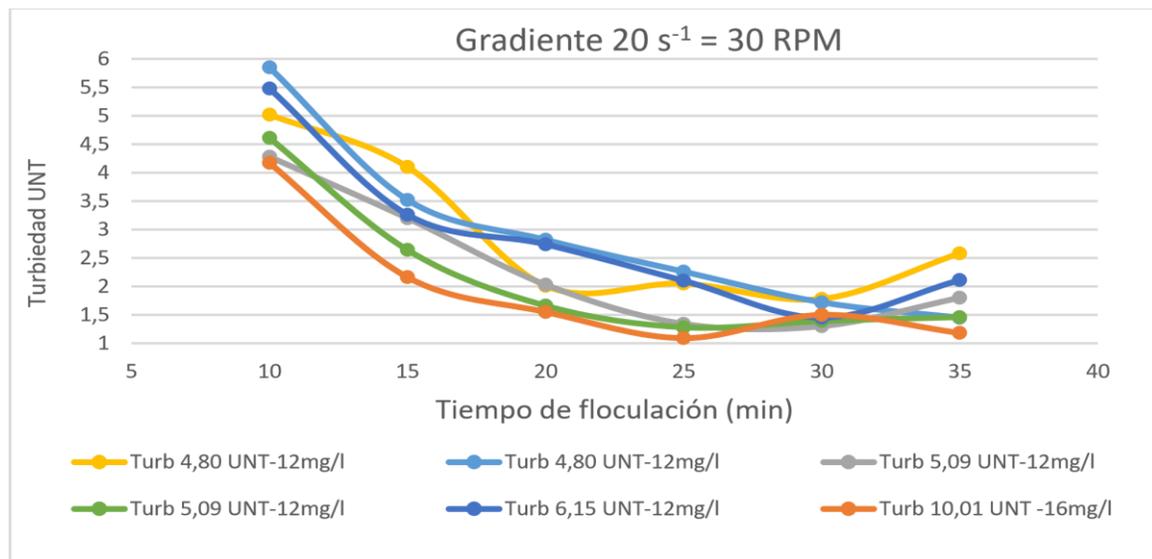


Figura 4. Determinación del Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta con Gradiente de 20 s⁻¹ para Sulfato de Aluminio a Turbiedades entre 4,8 a 10,01 UNT

Para las pruebas de jarras realizadas con un gradiente de velocidad de 20 s⁻¹ para tratar turbiedades en el rango de 4,8 a 10,01 UNT, al terminar cada una de ellas se obtienen, como se observa en la figura 4, una turbiedad final menor a 2,6 para un tiempo de floculación, entre 25 a 35 minutos y el tiempo óptimo de floculación para este gradiente es de 30 minutos ya que se obtiene la turbiedad final para cada prueba menor a 2 UNT.

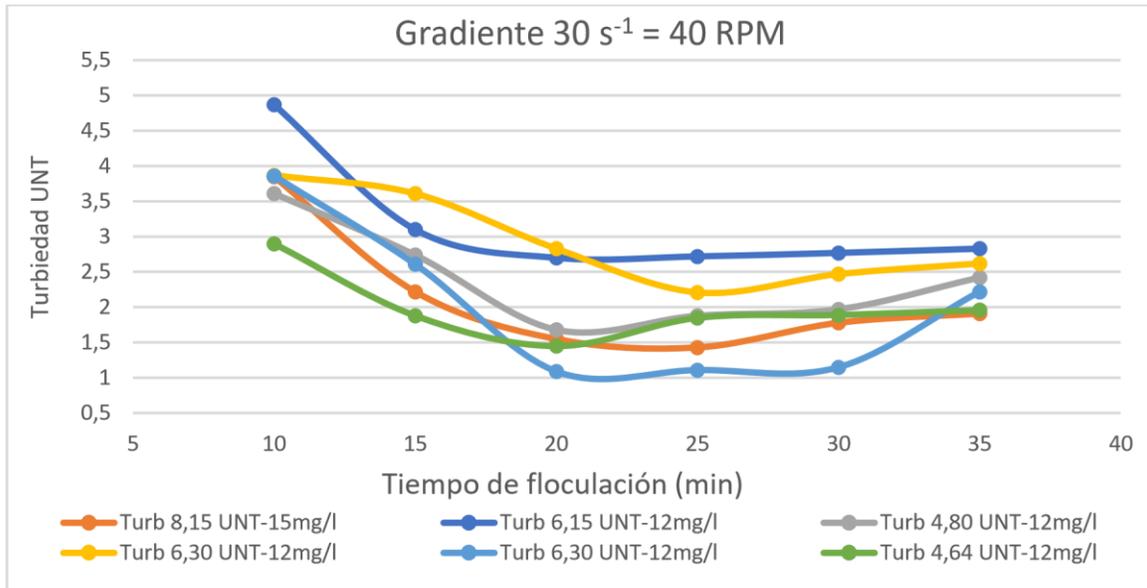


Figura 5. Determinación del Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta con Gradiente de 30 s^{-1} para Sulfato de Aluminio a Turbiedades entre 4,64 a 8,15 UNT

Al ajustar un gradiente de $30 \text{ s}^{-1} = 40 \text{ RPM}$ cambiando en cada jarra el tiempo de mezcla lenta, como se observa en la figura anterior, para el parámetro de turbiedad el tiempo comprendido entre 20 a 30 minutos se logra la disminución de turbiedad por debajo de 2,8 UNT y se muestra que el mejor tiempo de mezcla lenta con respecto a este gradiente para remoción de la turbiedad es de 25 minutos para obtener turbiedades menores a 2,7 UNT.

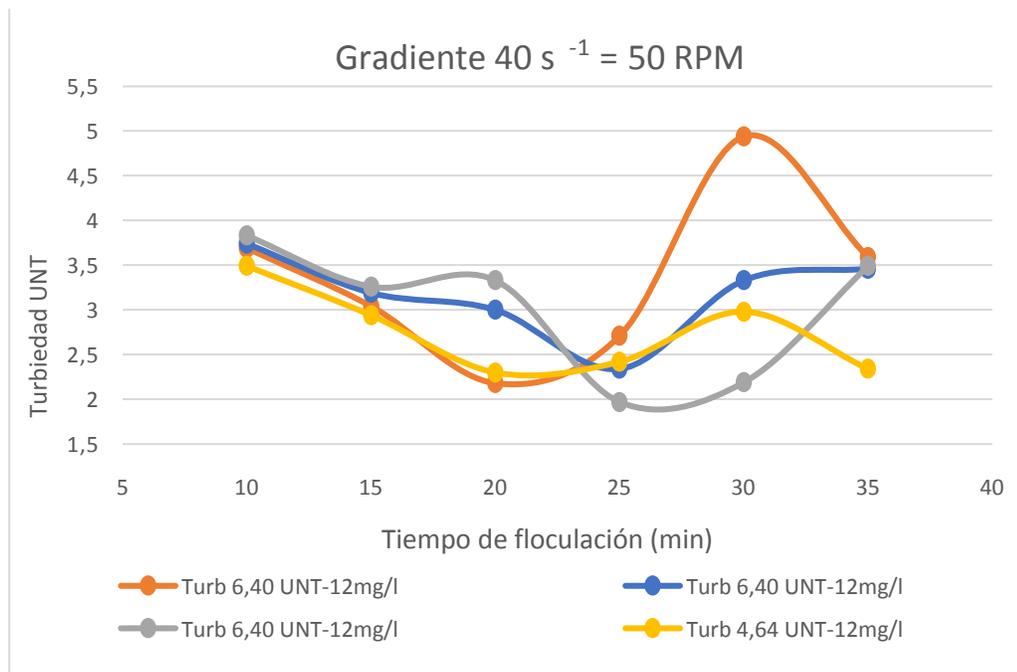


Figura 6. Determinación del Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta con Gradiente de 40 s^{-1} para Sulfato de Aluminio a Turbiedades entre 4,64 a 6,4 UNT

Para el gradiente de $40 \text{ s}^{-1} = 50 \text{ RPM}$ el tiempo óptimo de mezcla lenta con el cual se obtuvo el menor valor de turbiedad final para las diferentes muestras, es de 25 minutos, como se muestra en la gráfica 6, sin embargo, se muestra que, a tiempos diferentes a este, los resultados para este parámetro ascienden.

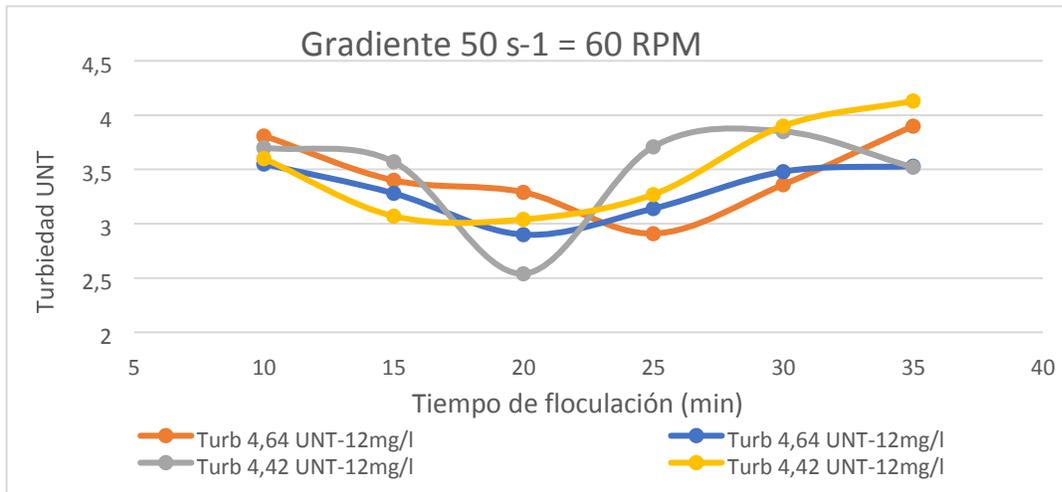


Figura 7. Determinación del Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta con Gradiente de 50 s^{-1} para Sulfato de Aluminio a Turbiedades entre 4,42 a 4,64 UNT

Al determinarse los tiempos de mezcla lenta con un gradiente de $50 \text{ s}^{-1} = 60 \text{ RPM}$ el tiempo más idóneo para estas pruebas de jarras realizadas, según la gráfica 7 es de 20 minutos, con el cual se consiguieron turbiedades finales menores a 3,3 UNT

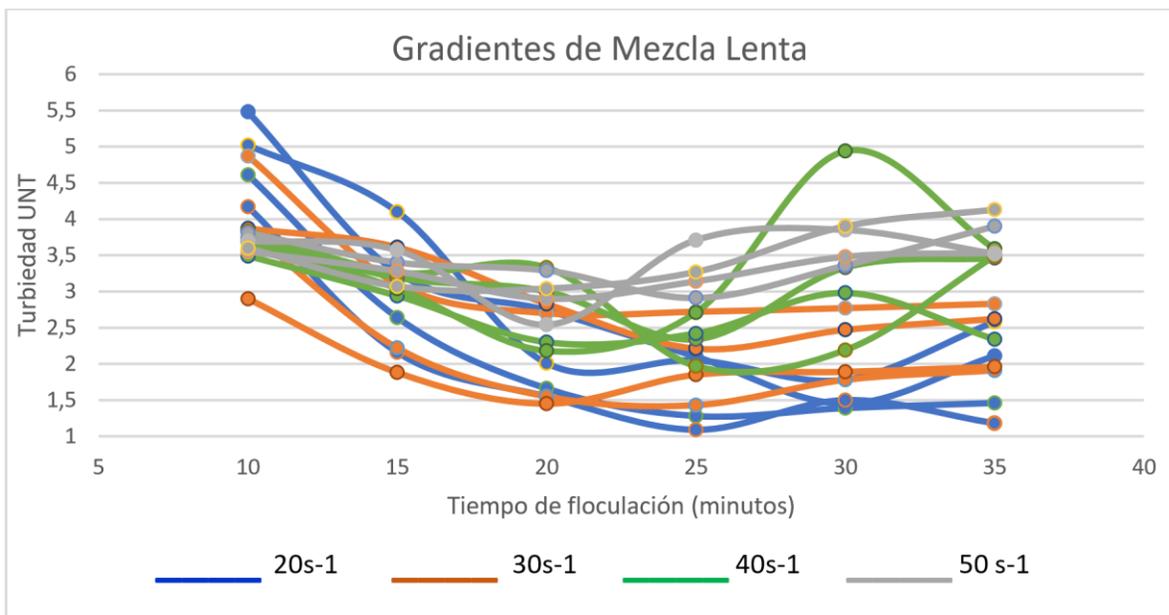


Figura 8. Determinación del Gradiente y Tiempo Óptimo de Mezcla Lenta para Sulfato de Aluminio a Turbiedades entre 4,42 a 10,01 UNT

La figura 8 demuestra que al utilizar el coagulante Sulfato de Aluminio líquido tipo B granulado para encontrar el gradiente y tiempo óptimo de floculación el más eficiente se encuentra en el gradiente 20 s^{-1} , dado que para un tiempo de mezcla lenta comprendido entre 25 y 35 minutos se obtuvieron turbiedades finales inferiores a 2,5 UNT para las muestras analizadas en las pruebas de jarras realizadas a 30 RPM. Por otra parte, al ejecutar las pruebas con los otros gradientes no se consiguieron que todas las turbiedades finales estuvieran por debajo de 2,5 UNT para los tiempos de floculación entre 25 y 35 minutos, pues llegaron hasta 2,7 UNT, el gradiente menos eficiente, según la gráfica es el de 50 s^{-1} , dado que las turbiedades finales estuvieron por encima de 2,5 UNT.

6.1.6 Determinación de los Parámetros Óptimos del Proceso de Sedimentación

Para analizar los parámetros estudiados en el proceso de sedimentación, se realiza la curva de sedimentabilidad para 4 muestras de agua cruda cada una a distinto nivel de turbiedad, los resultados se muestran en la figura 9

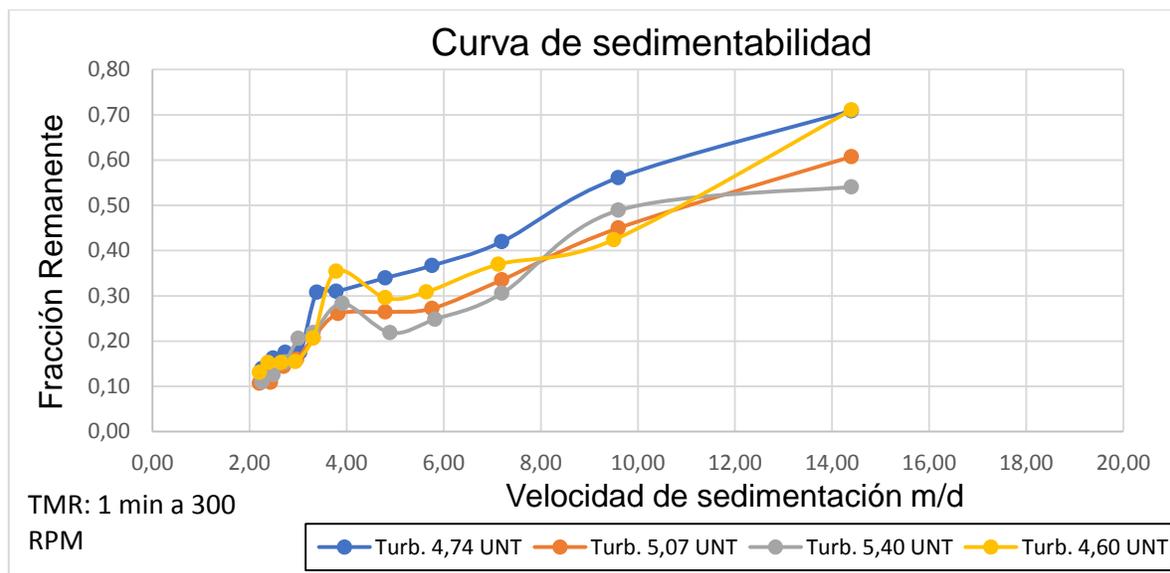


Figura 9. Determinación de la curva de sedimentabilidad con Sulfato de Aluminio para turbiedades entre 4,6 a 5,40 UNT

La figura 9 permite observar que las curvas de sedimentabilidad al utilizar el coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B, para tratar turbiedades bajas (4,6 - 5,40) UNT, no varían significativamente, dado que se muestra que a velocidades bajas (2,20 m/d a 7,20 m/d) se obtiene menor fracción remanente de turbiedad, entre 0,11 y 0,42. además se considera que el aumento en la velocidad de sedimentación es directamente proporcional con la fracción remanente para estas turbiedades. Sin embargo, cuando se aumenta la velocidad de sedimentación,

mayor a 7 m/d, las curvas presentan un cambio significativo en la fracción remanente.

Las curvas representadas en la gráfica no pasan por el origen, esto implica que siempre se tendrá una fracción remanente de partículas que no serán removidas por el sedimentador aun con velocidades de sedimentación muy bajas, para lo cual se debe continuar el tratamiento con los filtros (CEPIS, 2004).

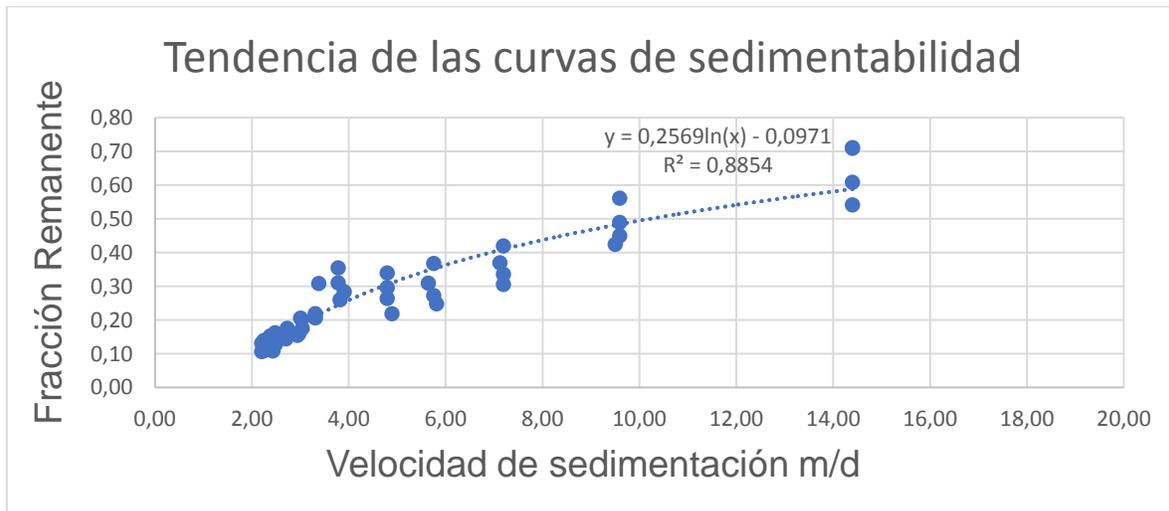


Figura 10. Tendencia de las curvas de sedimentabilidad para Sulfato de Aluminio con diferentes Turbiedades

La figura 10 muestra que con la máxima velocidad de sedimentación alcanzada en el laboratorio la cual fue de 14,40 m/d se consigue una fracción remanente entre de 0,54 y 0,71 para las turbiedades iniciales expuestas en la figura 9. Igualmente, la tendencia de las curvas de sedimentabilidad, es directamente proporcional. Además, las turbiedades del agua a tratar fueron relativamente bajas entre 4 y 5 UNT, haciendo la formación del floc reducido y liviano, generando que las velocidades de sedimentación fueran bajas. Sin embargo, la correlación se encuentra alrededor del 0,89, lo que indica que la velocidad de sedimentación explica en un 89% los valores de la fracción remanente de turbiedad.

6.2 Determinación de los Parámetros de funcionamiento en la PTAP EMTIMBIO

6.2.1 Determinación de los Parámetros de funcionamiento en el floculador hidráulico

A continuación, se presenta el chequeo hidráulico realizado en la unidad de floculación.

El cálculo del caudal se realiza por medio de una canaleta Parshall, estructura que cuenta con la instalación de una regla de aforo calibrada, que permite conocer la altura de la lámina de agua que ingresa.

Fórmula para calcular el caudal de entrada:

$$Q = 2.2WH^{3/2}$$

La cual, es la que manejan los operarios de la planta, y fue ajustada por medio de una capacitación realizada por el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).

Donde:

Q = caudal (m^3/s)

W = ancho de la garganta = 0.15 m

$H^{3/2}$ = altura de la lámina de agua = 0.24 m

$$Q = 2.2 * 0.15 * (0.24^{3/2})$$

$$Q = 0.0388 m^3/s$$

La unidad de floculación hidráulica es de flujo vertical y cuenta con tres secciones, tiene 45 celdas fijas, separadas por placas en cemento, 15 celdas para cada sección. Por medio de las medidas realizadas a los 3 segmentos se hallarán geoméricamente el volumen de agua (V) contenido en cada uno de estos.

Fórmula para calcular el volumen:

$$Q = a * b * ha$$

Donde:

a = ancho de la sección

b = largo de la sección

ha = altura de la lámina de agua de la sección

- Primera sección:

$$a = 2,77m$$

$$b = 5,55m$$

$$ha = 2,54m$$

$$V_1 = 2,77 * 5,55 * 2,54 = 39m^3$$

Para tratar de obtener un valor más preciso, se restará el volumen ocupado por las placas que separan cada celda.

$$V_{1placas} = 5,94m^3$$

Volumen primera sección:

$$V_{s1} = V_1 - V_{1placas} = 39 - 5,94m^3 = 33,06m^3$$

Luego, para encontrar el tiempo de mezcla (T_{m1}) en esta primera sección se calcula por medio de la fórmula que relaciona a este con el caudal y el volumen, así:

$$Q = V_{s1}/T_{m1}$$

Y despejando el tiempo de mezcla T_m , se tiene:

$$T_{m1} = 33,96/0,0388$$

$$T_{m1} = 852,06 \text{ s}$$

$$T_{m1} = 852 \text{ s}$$

$$T_{m1} = 14,2 \text{ min}$$

Para determinar el Gradiente de mezcla lenta de operación, en la primera sección, se utiliza la siguiente formula:

$$G_1 = \sqrt{\gamma * h_{f1}/\mu * T_{m1}}$$

Donde:

G_1 = gradiente de velocidad de mezcla lenta en la primera sección (s^{-1})

γ = peso específico del agua en función de su temperatura

h_{f1} = perdida de carga en la sección 1 (m), calculada por diferencia de niveles

μ = viscosidad del agua en función de su temperatura

T_{m1} = tiempo de mezcla en la sección 1 (s)

Dado que la temperatura del agua estuvo a 9°C

Para la primera sección se tiene:

$$\gamma = 9802 \text{ N/m}^3$$

$$\mu = 1,346 \text{ N-s/m}^2 * 10^{-3}$$

$$h_{f1} = 0,024 \text{ m}$$

$$T_{m1} = 852 \text{ s}$$

Luego:

$$G_1 = \sqrt{(9802 * 0,024)/(0,001346 * 852)}$$

$$G_1 = 14,32s^{-1}$$

- Segunda sección:

$$a = 2,57m$$

$$b = 5,50m$$

$$ha = 2,52m$$

$$V_2 = 2,57 * 5,50 * 2,51 = 35,5m^3$$

Para tratar de obtener un valor más preciso, se restará el volumen ocupado por las placas que separan cada celda.

$$V_{2placas} = 5,60m^3$$

Volumen segunda sección:

$$V_{s2} = V_2 - V_{2placas} = 35,5 - 5,60m^3 = 29,9m^3$$

Luego, para encontrar el tiempo de mezcla (T_{m2}) en esta segunda sección se calcula por medio de la fórmula que relaciona a este con el caudal y el volumen, así:

$$Q = V_{s2}/T_{m2}$$

Y despejando el tiempo de mezcla T_{m2} , tenemos:

$$T_{m2} = 29,9/0,0388$$

$$T_{m2} = 770,62 s$$

$$T_{m2} = 12,84 min$$

Para determinar el Gradiente de mezcla lenta de operación en la planta, en la segunda sección, se utiliza la siguiente formula:

$$G_2 = \sqrt{\gamma * h_{f2}/\mu * T_{m2}}$$

donde:

G_2 = gradiente de velocidad de mezcla lenta en la segunda sección (s^{-1})

γ = peso específico del agua en función de su temperatura

h_{f2} = pérdida de carga en la sección 2 (m)

μ = viscosidad del agua en función de su temperatura

T_{m2} = tiempo de mezcla en la sección 2 (s)

Para la segunda sección se tiene:

$$\gamma = 9802 N/m^3$$

$$h_{f2} = 0.073m$$

$$\mu = 1,346 \text{ N-s/m}^2 * 10^{-3}$$

$$T_{m2} = 770,62 \text{ s}$$

Luego:

$$G_2 = \sqrt{(9802 * 0,073)/(0,001346 * 770,62)}$$

$$G_2 = 26,26 \text{ s}^{-1}$$

• tercera sección:

$$a = 2,57 \text{ m}$$

$$b = 5,50 \text{ m}$$

$$ha = 2,51 \text{ m}$$

$$V_3 = 2,57 * 5,50 * 2,51 = 35,5 \text{ m}^3$$

Para tratar de obtener un valor más preciso, se restará el volumen ocupado por las placas que separan cada celda.

$$V_{3placas} = 5,63 \text{ m}^3$$

Volumen tercera sección:

$$V_{s3} = V_3 - V_{3placas} = 35,50 - 5,63 \text{ m}^3 = 29,87 \text{ m}^3$$

Luego, para encontrar el tiempo de mezcla (T_{m3}) en esta tercera sección se calcula por medio de la fórmula que relaciona a este con el caudal y el volumen, así:

$$Q = V_{s3}/T_{m3}$$

Y despejando el tiempo de mezcla T_{m3} , tenemos:

$$T_{m3} = 29,87/0,0388$$

$$T_{m3} = 769,84 \text{ s}$$

$$T_{m3} = 12,83 \text{ min}$$

Para determinar el Gradiente de mezcla lenta de operación en la planta, en la tercera sección, se utiliza la siguiente formula:

$$G_3 = \sqrt{\gamma * h_{f3}/\mu * T_{m3}}$$

donde:

G_3 = gradiente de velocidad de mezcla lenta en la tercera sección (s^{-1})
 γ = peso específico del agua en función de su temperatura

h_{f3} = pérdida de carga en la sección 3 (m)

μ = viscosidad del agua en función de su temperatura

T_{m3} = tiempo de mezcla en la sección 3 (s)

Para la tercera sección se tiene:

$$\gamma = 9802 \text{ N/m}^3$$

$$h_{f3} = 0.033 \text{ m}$$

$$\mu = 1,346 \text{ N-s/m}^2 * 10^{-3}$$

$$T_{m3} = 769,84 \text{ s}$$

Luego:

$$G_2 = \sqrt{(9802 * 0,032)/(0,001346 * 769,84)}$$

$$G_2 = 17,40 \text{ s}^{-1}$$

Encontrados los tiempos de mezcla y los gradientes en cada una de las secciones del floculador hidráulico, se tiene en esencia:

Cuadro N.º 3 tiempo de mezcla y gradiente de floculación

Secciones del floculador	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Tiempo de mezcla (min)	14,2	12,84	12,83
Gradiente de mezcla (s^{-1})	14,32	26,22	17,40

Analizando el cuadro N.º 2, se puede observar que la verdadera operación de floculación se hace entre la sección 2 y la sección 3, dado que el gradiente a través de las cámaras se genera en forma decreciente, pues si se tiene en cuenta la primera sección con un gradiente tan bajo, se crea un tramo intermedio con alto gradiente, que es el caso más desfavorable en la floculación. Los valores recomendados de gradientes de velocidad para floculación se encuentran escalonados de manera que se vayan reduciendo, permitiendo que los flóculos formados salgan sin romperse de la última sección para que el paso siguiente de la sedimentación se efectúe con mayor eficiencia (CEPIS, 2004).

Gradiente Medio de Floculación:

Ahora, para encontrar el gradiente medio, primero se halla el volumen (V) total del floculador hidráulico, sumando los volúmenes calculados en cada sección.

$$V = V_{s1} + V_{s2} + V_{s3}$$

$$V = 33,06 + 29,90 + 29,87$$

$$V = 92,95 \text{ m}^3$$

Luego, para encontrar el tiempo de mezcla (T_m) en el floculador se calcula por medio de la fórmula que relaciona a este con el caudal y el volumen, así:

$$Q = V/T_m$$

Y despejando el tiempo de mezcla, tenemos:

$$T_m = V/Q$$

$$T_m = 92,95/0,0388$$

$$T_m = 2395 \text{ s}$$

$$T_m = 30,01 \text{ min}$$

$$T_m \approx 40 \text{ min}$$

Para determinar el Gradiente de mezcla lenta en el floculador, con el cual está operando la planta, se utiliza la siguiente formula:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * h_f}{\mu * Tm}}$$

G = gradiente de velocidad de mezcla lenta (s^{-1})

γ = peso específico del agua en función de su temperatura

h_f = pérdida de carga total en el floculador (m)

μ = viscosidad del agua en función de su temperatura

Tm = tiempo de mezcla en el floculador (s)

Para calcular la pérdida de carga total, se suman las pérdidas de carga medidas en cada una de las tres secciones, halladas mediante diferencia de niveles:

$$h_{f1} = 0,024 \text{ m} \quad h_{f2} = 0,073 \text{ m} \quad h_{f3} = ,033 \text{ m}$$

$$h_f = 0,024 + 0,073 + 0,033$$

$$h_f = 0,13 \text{ m}$$

dado que la temperatura del agua medida es de 9 °C, se tiene:

$$\gamma = 9802 \text{ N/m}^3$$

$$\mu = 0.001346 \text{Ns/m}^2$$

Luego, reemplazando en la formula, se obtiene:

$$G = \sqrt{\frac{9802 * 0,13}{0,001346 * 2391}}$$

$$G = 19,90s^{-1}$$

$$G \approx 20s^{-1}$$

Teniendo en cuenta las tres secciones del floculador hidráulico se calcula que éste opera con un **gradiente** de 20 s^{-1} y con un **tiempo de mezcla** de **40 min**. Según el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), el tiempo de detención y el gradiente de velocidad deben determinarse a través de pruebas de laboratorio en base a las pérdidas de carga, con un rango de 20 s^{-1} a 70 s^{-1} para el gradiente medio de velocidad (G), y para el tiempo de detención entre 20 y 40 minutos. El valor del gradiente si corresponde con el límite inferior del rango establecido por el RAS, el tiempo de detención coincide con el rango establecido por éste, pero se encuentra en el límite superior del rango. Sin embargo, si se tiene en cuenta solamente la sección 2 y 3, se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Un volumen } V &= V_{s2} + V_{s3} \\ V &= 29,90 + 29,87 \\ V &= 59,77 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Un tiempo de mezcla } T_m &= V/Q \\ T_m &= 59,77/0,0388 \\ T_m &= 1540 \text{ s} \\ T_m &= 30,01 \text{ min} \\ T_m &\approx 25 \text{ min} \end{aligned}$$

La pérdida de carga h_f en la sección 2 y 3,

$$\begin{aligned} h_{f2} &= 0,073 \text{ m} \quad h_{f3} = 0,033 \text{ m} \\ h_f &= 0,073 + 0,033 \\ h_f &= 0,106 \text{ m} \end{aligned}$$

luego reemplazamos en la fórmula de gradiente y se tiene:

$$\begin{aligned} G &= \sqrt{\frac{9802 * 0,106}{0,001346 * 1540}} \\ G &\approx 22 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Encontrando así que entre la sección 2 y 3 del floculador hidráulico se trabaja con un **gradiente de velocidad** de 22 s^{-1} y con un **tiempo de mezcla** de **25 min**, valores que si están dentro del rango pertinente establecidos por el RAS.

6.2.2 Determinación de los Parámetros de funcionamiento en los sedimentadores

6.2.2.1 Carga superficial de los sedimentadores

Para encontrar la carga superficial de los sedimentadores previamente se inspeccionan las dimensiones usuales de estos (número de las placas su ángulo de inclinación y el espaciamento entre estas, y dimensiones de cada placa) así mismo el caudal de agua que entra a estos.

Para encontrar el valor del área inclinada (A_h), se utiliza la siguiente formula:

$$A_h = e * 2,4 * \#placas$$

Donde:

e = espacio entre placas = 0.07 m

$\#placas$ = número de placas en los sedimentadores = 130

$$A_h = 0,07 * 2,4 * 130$$

$$A_h = 21,84 \text{ m}^2$$

Para calcular el área superficial (A_s) de los sedimentadores se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{sen}\theta = A_h / A_s$$

donde el ángulo de inclinación θ es de 60° y despejando el área superficial queda:

$$A_s = A_h / \text{sen}\theta$$

$$A_s = 21,84 \div 0,86$$

$$A_s = 25,39 \text{ m}^2$$

Luego, con A_s se calcula la carga superficial del sedimentador = Q/A_s

$$\text{Carga superficial} = \frac{0,0388}{25,39} = 0,0015 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 86400 \frac{\text{s}}{\text{d}}$$

$$\text{Carga superficial} = 129,39 \text{ m/d}$$

La estructura de sedimentación existente en la planta tiene la capacidad de hacer descender al fondo de éste, las partículas que están presentes en el agua después de salir del floculador hidráulico, a una velocidad de sedimentación de 129,39 m/d indicando que este sedimentador de alta tasa, según el RAS se encuentra funcionando con una carga superficial que se halla dentro del rango pertinente establecido entre 120 y 185 m³/ (m². día) para placas angostas. Sin embargo, a continuación, se hace la verificación de la eficiencia del proceso mediante las curvas de sedimentabilidad determinadas previamente.

6.2.2.2 Determinación de la eficiencia del sedimentador con base en las curvas de sedimentación.

Para determinar la eficiencia se requiere determinar la velocidad de sedimentación crítica con que funciona el sedimentador actual:

Como el caudal (Q) es igual a la velocidad por el área: $Q = V * A$, se obtiene que $V = Q/A$

Luego, conocido el caudal y encontrada el área inclinada, se puede encontrar la velocidad del flujo en medio de las placas V_0 , así:

$$\begin{aligned}V_0 &= Q/A_h \\V_0 &= 0,0388 \div 21,84 \\V_0 &= 0,0018 \frac{m}{s} \times 86400 \frac{s}{d} \\V_0 &= 155,52 \text{ m/d}\end{aligned}$$

Dado que el agua se encuentra a una temperatura de 9°C se tiene una viscosidad cinemática $\nu = 1,346 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$\nu = 1,346 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} \times 86400 \frac{s}{d} = 0,1163 \text{ m}^2/d$$

Entonces, se puede encontrar el número de Reynolds (Re) con su fórmula:

$$\begin{aligned}Re &= \frac{2V_0e}{\nu} \\Re &= \frac{2 \times 155,52 \times 0,07}{0,1163}\end{aligned}$$

$$Re = 187,21$$

Valor aceptable, que indica que el agua que fluye entre las placas es de régimen laminar, cumpliendo con la normatividad. Según el RAS, para un sedimentador de alta tasa, Re debe ser menor a 500 y se recomienda un Reynolds menor a 250.

Ahora, como es conocido el ángulo de inclinación de las placas $\theta = 60^\circ$ y la longitud de las placas en sentido del flujo $l = 1,20 \text{ m}$ se puede calcular la carga superficial equivalente o velocidad crítica de sedimentación V_{sc} con la siguiente fórmula:

$$V_{sc} = \frac{V_0}{\text{sen } \theta \left(\frac{l}{e} - 0,013 Re \right) \text{cos } \theta}$$

$$V_{sc} = \frac{155,52}{\text{sen } 60 \left(\frac{1,20}{0,07} - (0,013 \times 187,21) \right) \cos 60}$$

$$V_{sc} = 18.92 \text{ m/d}$$

$$V_{sc} \approx 19 \text{ m/d}$$

De este modo, se tiene que cualquier partícula que se desplace con una velocidad igual o mayor a 19 m/d será automáticamente removida. Esta velocidad de sedimentación (V_{sc}) se determina sobre las pruebas de jarra realizadas en el laboratorio, en las cuales se trabajó con turbiedades bajas de agua cruda teniendo en cuenta que la etapa de pruebas se realizó en periodo seco, y de este modo se halla esta velocidad con la cual se consigue que el efluente no sature la unidad de filtración, dado que en la sedimentación laminar la eficiencia decrece a medida que aumenta la carga superficial en las celdas (CEPIS, 2004).

- Luego, para calcular la eficiencia se requiere la ecuación:

$$E = (1 - C_0) + \frac{1}{V_0} \int V_{sc} dc$$

Utilizando $V_{sc} = 19 \text{ m/d}$ y la tendencia de las curvas de la figura 10, se determinó que $C_0 = 0,7$ y dado que $\int V_{sc} dc$ está determinada como el área sobre la curva, se obtiene:

$$E = (1 - 0.7) + \left\{ \frac{1}{19} \times \left[\left(\frac{19+2}{2} \right) \times (0,7 - 0,1) \right] \right\}$$

$$E = 63,2 \%$$

La eficiencia de remoción alcanzaría un valor aproximado de 63,2%, lo cual indica que el floc producido es de bajo peso lo que genera velocidades de sedimentación bajas. Sin embargo, el estudio de sedimentabilidad solo pudo realizarse con turbiedades bajas (alrededor de 5 UNT) lo cual podría explicar las bajas velocidades de sedimentación encontradas, no obstante, esto pareciera ser limitante para las turbiedades tratadas, pero incluso en estos casos se puede producir turbiedades residuales que alcanzan valores de turbiedad final entre 1,6 a 1,9 UNT, de modo que se obtiene una favorable operación dentro del sistema de filtración.

6.3 COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE TRATABILIDAD CON LOS ENCONTRADOS EN EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

La relación que se obtiene entre la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio y la dosis de coagulación para tratar el caudal con turbiedades relativamente bajas

en la PTAP dentro de la etapa de práctica concordaron, entre 12mg/l hasta 16mg/l presentando mayores eficiencias en cuanto a la remoción de turbiedad. Pero, es necesario aclarar que las dosis óptimas determinadas en el estudio de tratabilidad fueron realizadas en tiempo seco y que, al generarse cambios bruscos en las condiciones del agua cruda con un incremento notorio de los valores de turbiedad, se debe determinar a escala de laboratorio la dosis óptima de coagulante de forma habitual.

En cuanto al tiempo de mezcla óptimo para alcanzar la coagulación con el sulfato de aluminio se agita por un minuto a una velocidad de 300 RPM logrando satisfactoriamente la desestabilización de las partículas coloidales, lo que permite una buena continuidad en los procesos siguientes del tratamiento. Con respecto a la mezcla rápida que se realiza en la planta, esta se hace por medio del resalto que se produce en la canaleta Parshall a través de un difusor constituido por un tubo perforado, del cual fluye la dosis del coagulante para generar la reacción química completa. Sin embargo, como el mezclador es hidráulico se requiere que haya una estabilidad en la intensidad de agitación en forma constante lo cual permita una dispersión homogénea para que el coagulante quede distribuido de manera uniforme en toda la masa de agua y sea capaz de reaccionar con el agua cruda y proporcione la eficiencia en el sistema de tratamiento (CEPIS, 2004).

Respecto al pH favorable para la coagulación con las sales de aluminio se obtuvo que el pH óptimo encontrado con las pruebas de jarras es de 7,2 por lo cual no requiere de ninguna modificación, ya que el agua que llega a la planta trae consigo un pH casi neutro, con un rango entre 7.1 a 7.3, valores con los cuales se logra la mayor eficiencia en cuanto a la remoción de turbiedad.

El gradiente de floculación con el cual operó la planta en el transcurso de las prácticas, comprendido como período de verano, coincide con el gradiente óptimo determinado a través de pruebas de jarras, siendo éste de 20 s^{-1} , para los ensayos realizados con este gradiente, se consiguió una mayor remoción de turbiedad con un tiempo de mezcla de 30 min, con el cual se logró obtener turbiedades finales menores a 2 UNT. Sin embargo, el tiempo de mezcla lenta calculado 40 min, no concuerda con el tiempo óptimo (30 min) encontrado en las pruebas de laboratorio. Además, para los análisis se tomaron tiempos comprendidos entre 10 y 35 minutos, por lo que no se realizaron ensayos con un tiempo límite superior de 40 min. Cuando se hace el cálculo para encontrar el tiempo de floculación real (40 min), se tienen en cuenta las tres secciones que componen el floculador hidráulico y se obtiene que es superior al tiempo óptimo de mezcla lenta (30 min) según la prueba de jarras, sin embargo, cuando solamente se analiza en conjunto las secciones 2 y 3, se consigue un tiempo real (25 min) de mezcla por debajo del óptimo.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro de las características examinadas, la alcalinidad del agua, registrada en base a las pruebas de laboratorio, indicaron un mínimo de 18 mg de CaCO_3/L , a pesar de no presentar un alto valor, el agua cruda es capaz de reaccionar con el sulfato de aluminio sin que se presente una disminución significativa en el pH, así que no es necesario el uso de alcalinizante en el proceso de coagulación. Además, el pH del agua cruda que entra a la planta de tratamiento no necesita corregirse previamente dado que el pH óptimo de coagulación es precisamente el que ésta posee para que la reacción del sulfato de aluminio se produzca plenamente.

Los parámetros operacionales óptimos encontrados a escala de laboratorio, por medio de las pruebas de jarras, utilizando como coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo B, fueron: un tiempo óptimo de mezcla rápida de 1 min a 300 RPM para la coagulación, un gradiente óptimo de mezcla lenta de 20 s^{-1} con un tiempo óptimo de 30 min para la floculación y velocidades de sedimentación en un rango de 2,2 a 14,4 m/d.

Los parámetros operacionales de funcionamiento encontrados en la planta a escala real fueron: un gradiente medio de 20 s^{-1} con un tiempo de detención de 40 min para la unidad de floculación y para el sedimentador una carga superficial de 129 m/d una velocidad crítica de sedimentación cercana a 19 m/d con una eficiencia del 64%.

La floculación del agua coagulada es llevada a cabo en una unidad de flujo vertical compuesta por tres secciones, en la cual, se obtiene un tiempo muy largo de floculación (40 min), el cual es mucho mayor que el requerido según el estudio de tratabilidad (30 min). Además, su distribución de gradientes no es el óptimo, dado que en la sección 1, el gradiente es el más bajo y debería ser el mayor, por lo que se requiere un mejor acondicionamiento para esta zona. De otra parte, entre las secciones 2 y 3 del floculador hidráulico, se obtuvo un tiempo de detención (25 min) y un gradiente de velocidad (22 s^{-1}), semejantes a los obtenidos bajo condiciones óptimas. Aunque, la unidad de floculación presentó un funcionamiento dentro de los límites establecidos por el RAS, se recomienda la adecuación de la sección 1, para que el sistema actual realice un trabajo conveniente y se logre *optimizar su funcionamiento*.

El sedimentador de alta tasa presenta un proceso de decantación aceptable, para las turbiedades del agua cruda que se evaluaron (4.6 a 5.4 UNT), dado que las curvas de sedimentabilidad muestran una tendencia similar haciendo que la variación de la fracción remanente no sea muy significativa, con lo cual se

proporciona una eficiencia en torno al 64% de remoción de turbiedad para el agua cruda evaluada, alcanzando turbiedades al final de la sedimentación en el rango de 1,6 a 1,9 UNT, con lo cual se consigue, que la operación en la unidad de filtración se facilite y no se colmate constantemente. Sin embargo, no se pudo establecer el comportamiento con turbiedades mayores a 6 UNT en el agua cruda. Por lo cual, se recomienda el estudio del sedimentador con turbiedades altas.

El funcionamiento de la planta de tratamiento a pesar de que no coincidan exactamente los parámetros de operación después de la mezcla rápida con los parámetros óptimos encontrados en el laboratorio puede tener un trabajo continuo asegurando que las unidades de floculación y sedimentación efectúen su labor con un desempeño aceptable y garanticen la utilidad en los procesos siguientes de filtración y desinfección.

La tecnología utilizada en la planta dispone de mecanismos sencillos los cuales facilitan la labor de los operarios, no obstante, los equipos de laboratorio no son suficientes para que se pueda realizar un excelente trabajo que garantice la eficiencia en los procesos, encontrando la necesidad de proporcionar equipos requeridos para verificar correctamente los parámetros operacionales más importantes de manera adecuada y faciliten el desarrollo de las actividades cuando se presenten cambios fuertes en la calidad del agua cruda que ingresa. Por lo cual, se recomienda dotar a la planta de los equipos de laboratorio necesarios para un mejor control en las operaciones y un buen desarrollo en los procesos.

Se recomienda la realización de un estudio de tratabilidad empleando otro tipo de coagulante, el cual podría ser sulfato de aluminio líquido u otro que ofrezca mejores resultados tanto operacionales como económicos, con lo cual se permita inspeccionar si la operación de la planta puede garantizar las metas de calidad en su funcionamiento con éste u otro coagulante analizando el comportamiento hidráulico en cuanto a la eficiencia de los procesos.

La aplicación de coagulante es un proceso muy importante en los sistemas de tratamientos, dado que habilitan la aglomeración de partículas presentes en el agua cruda y lo más importante es que se agrupan los microorganismos existentes especialmente cuando se encuentran en estado de quiste, pues de esta forma aquellos son capaces de sobrevivir a condiciones ambientales extremas o perjudiciales como la desinfección con cloro y es por esto que, se recomienda realizar la coagulación en todos los meses del año incluido los períodos secos, aún con turbiedades del agua cruda menores a 10 UNT, como sucedió durante el estudio realizado, para garantizar así una prestación de calidad libre de microorganismos.

BIBLIOGRAFIA

- BID (Banco Interamericano de Desarrollo) Agua Potable, Saneamiento y los Objetivos de Desarrollo del Milenio en América Latina y el Caribe. Nota Técnica # IDB-TN-522. 2013
- CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente) Lima – Perú (2004) OPS (Organización Panamericana de la Salud) Tratamiento de agua para consumo humano, *Plantas de filtración rápida*. Manual I: Teoría.
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). Encuesta Nacional de Calidad de Vida – ECV 2015. Boletín Técnico
- DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria Ministerio de Salud) Perú (2006). (GESTA AGUA) Grupo de Estudio Técnico Ambiental Para Agua, Parámetros Organolépticos. Disponible en: www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes.../GRUPO%20DE%20USO%201.pdf
- DNP (Departamento Nacional de Planeación) Colombia (2014), bases del plan nacional de desarrollo 2014-2018: Todos por un nuevo país paz equidad educación.
- DNP (Departamento Nacional de Planeación) (3 de Julio de 2014). Política para el suministro de agua potable y saneamiento básico en la zona rural. CONPES 3810. Disponible en: www.minvivienda.gov.co/conpesagua/3810%20%202014.pdf
- Empresa de Servicios Públicos Municipal EMTIMBIO E.S.P. Inventario de infraestructura 2016.: EMTIMBIO E.S.P. 2015
- GWP (Global Water Partnership/Asociación Mundial del Agua) Agua para el Siglo XXI para América del Sur De la Visión a la Acción (2000) Informe Nacional Sobre la Gestión del Agua en Colombia.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) Bogotá D.C. Análisis fisicoquímico de aguas, Turbiedad por nefelometría código: TP0443 (15, junio, 2007).
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) Bogotá D.C. Análisis fisicoquímico de aguas, pH en agua por electrometría código: TP0080 (28, septiembre, 2007).

- Informe de Diagnóstico del Sistema de Abastecimiento de Agua para la Cabecera Municipal de Timbío. AQUARisc Vulnerabilidad y Riesgo en Sistemas de Agua Potable en el Cauca. 2017
- Ministerio De Vivienda, Ciudad y Territorio. Resolución 330. Colombia (08, junio, 2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico- RAS.
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) Colombia Resolución 2115 (22, junio, 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Bogotá: Ministerios, 2007. 23 p.
- Ministerio de la Protección Social. Decreto 1575 (09, mayo, 2007) Colombia, por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Bogotá: El Ministerio, 2007. 14 p.
- MinSalud (Ministerio de Salud y Protección Social - Dirección de epidemiología y Demografía) Colombia (Análisis de Situación de Salud (ASIS) con el modelo conceptual de Determinantes Sociales de la Salud del Cauca, mayo 2014
- MinSalud (Ministerio de Salud y Protección Social - Dirección General de Promoción y Prevención) Colombia (2014) Guía de Atención de la EDA (Enfermedad Diarreica Aguda).
- MinSalud (Ministerio de Salud y Protección Social - Subdirección De Salud Ambiental) Colombia (2016). Informe Nacional de la Calidad del Agua para Consumo Humano INCA 2015
- MinSalud (Ministerio de Salud y Protección Social - Subdirección De Salud Ambiental) Colombia (2015). Informe Nacional de la Calidad del Agua para Consumo Humano INCA 2014
- OMS (Organización Mundial de la Salud) Guías Para la Calidad del Agua Potable (2006) primer apéndice a la tercera edición volumen 1 recomendaciones.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). Agua. Nota descriptiva No 391. 2018. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>

- OMS (Organización Mundial de la Salud) Informe del programa conjunto de monitoreo (PCM) sobre el acceso a agua potable y saneamiento: datos esenciales. 2015
- PGRM, A. de T.-C. Plan de Gestión del Riesgo Municipal. Timbío: Alcaldía Municipal de Timbío. 2016
- SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje). (1990). Programa de capacitación y certificación del sector de agua potable y saneamiento básico: operación y mantenimiento de plantas de potabilización de aguas.
- SENA. “Operación de Sistemas de Potabilización de Aguas”, código 280201010 norma 3 Monitorear y Ajustar la Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas
- UCLM (Universidad de Castilla-La Mancha) España. Procesos Tecnológicos para el Tratamiento de Aguas, Tema 5. Coagulación-Floculación. 2006.