

**DISEÑO DEL PLAN DE OPTIMIZACION DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA VEREDA EL TOBAL,
SUBACHOQUE**

DAVID CAMILO QUIÑONES SALCEDO

COD: 2135327

GISELLE CAMILA ROJAS BERNAL

COD: 2127884

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA
2017**

**DISEÑO DEL PLAN DE OPTIMIZACION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE AGUA POTABLE DE LA VEREDA EL TOBAL, SUBACHOQUE**

DAVID CAMILO QUIÑONES SALCEDO

GISELLE CAMILA ROJAS BERNAL

DIRECTOR:

ANDRÉS FELIPE MARTÍNEZ URREGO

INGENIERO QUÍMICO

MAGÍSTER EN EDUCACIÓN

CODIRECTOR:

ANGELA JARAMILLO

PhD. BIOLOGA MARINA

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C, COLOMBIA

2016

Resumen

La planta de tratamiento de la vereda El Tobal, Subachoque fue puesta en marcha en el año 2010 pero por falta de recursos económicos ésta detuvo su funcionamiento en el año 2011 hasta la actualidad. Debido a esto la planta se ha deteriorado al punto de tener estructuras y maquinaria dañada; por lo tanto, este proyecto nace con el fin de asegurar la disponibilidad de agua potable a la vereda. Para asegurar esto, el proyecto tiene como objetivo principal elaborar el plan de optimización operativo y estructural de la planta de estudio, a partir de una metodología basada principalmente en un análisis de las proyecciones de caudales, condiciones hidráulicas, aspectos críticos y análisis económico, donde se encontraron puntos clave del proceso como el aireador y el filtro, con los cuales se determinó un sobredimensionamiento de la planta y los principales cambios que requiere, finalmente se construyó el plan de optimización propuesto con el análisis económico, que se presentará a la junta de la asociación de usuarios del acueducto de la vereda para su posterior implementación.

Palabras clave: Optimización, condiciones hidráulicas, aspectos críticos, proyecciones de caudales, agua potable.

Tabla de contenido

Introducción	9
1. Objetivos.....	11
1.1. General.....	11
1.2. Específicos	11
2. Marco teórico	12
2.1 Marco contextual	12
2.2 Agua potable	14
2.3 Plantas de tratamiento de Agua Potable.....	15
2.4 Principios teóricos del sistema de tratamiento	16
2.4.1 Tratamiento de agua en zonas rurales.....	16
2.4.2 Aireación	17
2.4.3 Coagulación	19
2.4.4 Floculación	20
2.4.5 Sedimentación.....	21
2.4.6 Filtración.....	22
2.4.7 Desinfección.....	23
3 Metodología	24
3.1 Reconocimiento del proceso y recolección de información	25
3.1.1 Recolección de información primaria y secundaria	25
3.1.2 Visita de reconocimiento.....	25
3.1.3 Identificación de los aspectos críticos de la PTAP	25
3.2 Proyección de la demanda de agua y evaluación del sistema de tratamiento.....	26
3.2.1 Proyección de población y estimación de caudales	26
3.2.2 Evaluación del sistema de tratamiento.....	26
3.3 Plan de optimización de la planta de tratamiento	27
3.3.1 Propuesta de optimización de la planta de tratamiento	27
3.3.2 Evaluación del sistema de tratamiento proyectado.	27
3.3.3 Análisis económico de la propuesta.....	27
4 Desarrollo central	28
4.1 Recolección de información primaria y secundaria	28
4.1.1 Fuente de abastecimiento.....	30
4.2 Descripción del sistema de tratamiento.	35
4.2.1 Descripción general del sistema	35

4.3	Evaluación del sistema de tratamiento	44
4.3.1	Aireador	44
4.3.2	Floculador	46
4.3.3	Sedimentador	46
4.3.4	Filtro	48
4.3.5	Tanque de almacenamiento	49
4.4	Identificación de aspectos críticos en la PTAP	49
4.4.1	Aspectos generales	50
4.5	Proyección de población y estimación de caudales	52
4.5.1	Proyección de población (Método aritmético)	52
4.5.2	Estimaciones de demanda	54
4.6	Cálculos hidráulicos con el caudal proyectado	57
4.6.1	Aireador	57
4.6.2	Floculador	58
4.6.3	Sedimentador	58
4.6.4	Filtro	59
4.7	Estudios de tratabilidad	59
4.8	Plan de optimización de la planta de tratamiento	68
4.8.1	Aspectos generales de la PTAP	68
4.8.2	Aireación	71
4.8.3	Coagulación – Floculación	72
4.8.4	Sedimentación	73
4.8.5	Filtración	73
4.8.8	Propuesta administrativa - financiera	75
4.9	Análisis económico	78
5	Impacto social	81
6	Conclusiones	83
7	Recomendaciones	84
8	Bibliografía	85
9	Anexos	¡Error! Marcador no definido.

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Tarifas de por puntos de suministro</i>	29
<i>Tabla 2. Caudales característicos de la microcuenca de la quebrada El Salitre</i>	32
<i>Tabla 3. Resultados de laboratorio de la Quebrada el Salitre</i>	33
<i>Tabla 4. Periodo de diseño según nivel de complejidad</i>	53
<i>Tabla 5. Proyección de población rural de Subachoque</i>	53
<i>Tabla 6. Proyección de demanda de consumo de agua en la vereda El Tobal</i>	56
<i>Tabla 7. Cálculos hidráulicos – Aireador</i>	57
<i>Tabla 8. Cálculos hidráulicos – Floculador</i>	58
<i>Tabla 9. Cálculos hidráulicos - Sedimentador</i>	58
<i>Tabla 10. Cálculos hidráulicos - Filtro</i>	59
<i>Tabla 11. Resultados del test de jarras muestra 1.</i>	61
<i>Tabla 12. Resultados del test de jarras muestra 2</i>	63
<i>Tabla 13. Resultados del test de jarras muestra 3.</i>	65
<i>Tabla 14. Tiempos de retención prueba 1</i>	67
<i>Tabla 15. Tiempos de retención prueba 2.</i>	67
<i>Tabla 16. Características del lecho filtrante</i>	74
<i>Tabla 17. Cálculo de costos (fijos, operativos, mantenimiento y administrativos)</i>	76
<i>Tabla 18. Análisis económico de la propuesta.</i>	78

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Perfil topográfico de la quebrada</i>	31
<i>Ilustración 2. Numero de orden de la quebrada El Salitre</i>	31
<i>Ilustración 3. Vista general de la planta de tratamiento</i>	36
<i>Ilustración 4. Aireador</i>	37
<i>Ilustración 5. Lecho de carbón en las bandejas del aireador.</i>	37
<i>Ilustración 6. Cono de mezcla rápida.</i>	39
<i>Ilustración 7. (a) Cámara de floculación (b) Canaleta de rebose</i>	40
<i>Ilustración 8. (a) Sedimentador (b) Módulos laminares</i>	41
<i>Ilustración 9. Filtro.</i>	42
<i>Ilustración 10 a) Punto de dosificación de cloro b) hipoclorito de calcio</i>	42
<i>Ilustración 11. a) Tanque de almacenamiento b) Acceso a tanque</i>	43
<i>Ilustración 12. Jarras con 6 mg/l de coagulante</i>	63
<i>Ilustración 13. Jarra con cloruro férrico.</i>	64
<i>Ilustración 14. Jarras con sulfato de aluminio y cloruro férrico</i>	66
<i>Ilustración 15. Floculación y sedimentación con cloruro férrico.</i>	67

Índice de graficas

<i>Grafica 1. Proyección rural de Subachoque.</i>	53
<i>Grafica 2. Proyección de demanda de consumo de agua en la vereda El Toba</i>	56
<i>Grafica 3. Resultados del test de jarras muestra 1.</i>	61
<i>Grafica 4. Resultados del test de jarras muestra 2.</i>	63
<i>Grafica 5. Resultados del test de jarras muestra 3.</i>	65

Introducción

Es considerada agua potable, toda aquella que ha sido sometida a un proceso de tratamiento que permite el cumplimiento de las normas de calidad establecidas para tal fin; este tratamiento cuenta con varios procesos que son: Aireación, coagulación-sedimentación, filtración y desinfección. Estas normas se basan en estudios toxicológicos y epidemiológicos, así como en consideraciones estéticas. Siendo el agua indispensable para la vida, es necesario que los consumidores dispongan de un sistema de abastecimiento de agua satisfactorio, es decir, un suministro continuo en cantidad suficiente, con la presión conveniente y que cumpla requisitos de calidad, por lo cual el sistema de acueducto debe realizar el mayor esfuerzo posible para mantener la planta de tratamiento en buen estado y realizar el tratamiento necesario para suministrar agua de la mejor calidad de acuerdo con las normas establecidas. La buena calidad del agua de consumo humano asegura al consumidor su protección contra la presencia de agentes patógenos y compuestos físicos y químicos perjudiciales a su salud. La información que proveen los programas de vigilancia y control del agua para consumo humano, aparte del beneficio relacionado con la disminución de enfermedades transmitidas por vía hídrica, es un medio que permite el mejoramiento de la calidad del servicio de abastecimiento de agua.

Este proyecto surge como una alternativa de solución al problema de abastecimiento de agua potable en la vereda el Tobal en el Municipio de Subachoque, Cundinamarca, donde la planta de tratamiento no está en funcionamiento desde hace 5 años. Con el fin de asegurar la calidad del agua y como contribución al Plan de Seguridad del Agua para la Vereda, que es construido en cooperación entre la asociación de usuarios del acueducto y la Universidad Santo Tomás, esta propuesta orienta específicamente sus acciones hacia la formulación de un plan de optimización estructural y operativo de la planta de tratamiento, incluido el tanque de almacenamiento bajo las normas de agua potable y el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico y su actualización a través de la resolución 1096 del 2016 que adopta cambios en el reglamento y deroga resoluciones previas, entre ellas 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009. En este proyecto el análisis estructural se realiza a partir de una evaluación de las condiciones de la planta de tratamiento en cuanto a dimensiones y materiales, a partir de la cual se realizarán las recomendaciones correspondientes acordes con el marco legal asociado al diseño estructural de sistemas de tratamiento.

Para el desarrollo del proyecto se siguió una metodología que inició con la fase de reconocimiento del proceso de potabilización y la recolección de información, en donde se buscaba obtener la mayor cantidad de datos sobre la planta y su funcionamiento, acompañado de las visitas de campo, donde se pudo identificar previamente algunos de los aspectos críticos que iban a ser usados posteriormente

para la realización de la propuesta final; esta fase tuvo grandes limitaciones, en cuanto a la información obtenida por parte de la asociación de usuarios del acueducto.

Seguido de esto se realizó la fase de proyección y evaluación, en donde a partir de la población rural y un periodo de evaluación de 25 años, se realizó una proyección de demanda de agua de la población obteniendo los datos de caudal medio diario, caudal máximo diario y caudal máximo horario, esto consolidado con los cálculos de las condiciones hidráulicas actuales de cada una de las unidades que componen la planta de tratamiento bajo lo estipulado en el RAS y análisis de laboratorio, fueron la base para obtener finalmente la totalidad de los aspectos críticos; para con esto pasar finalmente a la última fase del proyecto.

La fase del plan de optimización de la planta de tratamiento, tenía el objetivo de formular la propuesta de optimización a partir de todos los análisis realizados previamente. En este caso, fueron realizados los cálculos de las condiciones hidráulicas con los valores finales de las proyecciones de caudales con el fin observar su comportamiento y finalmente se realizó un análisis económico de la propuesta, buscando obtener el valor de la inversión que requerirá la aplicación del plan de optimización.

Por último cabe mencionar que este documento es un aporte para el desarrollo de un proyecto marco de carácter interdisciplinar desarrollado en el Semillero de Investigación “Recurso hídrico y territorio”, que en colaboración entre estudiantes de Ingeniería ambiental y civil desarrollan distintos temas desde su disciplina aplicados al sistema de abastecimiento de agua El Tobal, entre ellos análisis de calidad del agua, metodologías de evaluación del riesgo, diagnóstico de la red de distribución, entre otros. Los resultados de este proceso serán presentados a la junta directiva de la Asociación de usuarios del acueducto El Tobal, donde se mostrarán los resultados del proyecto y la propuesta de optimización final con el fin de que ellos inicien su implementación, asegurando así el suministro del agua, en condiciones de calidad, cantidad y continuidad, requerida por la población de la vereda. Esto permitirá un gran avance para la población puesto que actualmente se suministra el agua cruda obtenida de la quebrada sin realizar el adecuado tratamiento.

1. Objetivos

1.1. General

Elaborar un plan de optimización para la planta de tratamiento de agua potable de la vereda El Tobal del municipio de Subachoque, Cundinamarca.

1.2. Específicos

- Realizar un diagnóstico operativo y estructural de los diferentes procesos y unidades de la planta de tratamiento; incluyendo una evaluación hidráulica.
- Identificar los aspectos críticos, criterios y parámetros de operación y diseño que serán objeto de la optimización.
- Realizar una proyección de las condiciones operativas de la planta de tratamiento de agua potable.
- Formular una propuesta de mejoramiento para la planta de tratamiento de agua potable, priorizada bajo un análisis técnico y económico que asegure la eficacia e incremente la eficiencia del sistema.

2. Marco teórico

2.1 Marco contextual

El sistema de acueducto del municipio de Subachoque comprende los acueductos rurales y acueductos de la zona urbana del municipio. El esquema de ordenamiento municipal establece, para la cabecera municipal, el uso de la quebrada de Colorados y el río Subachoque, como fuente principal de agua; teniendo como fuente alterna el Embalse del Pantano de Arce y para el área urbana La Pradera, se utiliza como fuente principal la quebrada de Paramillo, y como fuentes alternas, la quebrada del Salitre, la Angostura y el río Subachoque. [1]

En el 2005 según el SISBEN de Cundinamarca, el municipio cuenta una cobertura total en el servicio de agua potable, con 960 usuarios en la zona urbana y 1.854 en la zona rural donde el suministro de agua para consumo humano está ubicado de la siguiente manera: por fuera del lote 105 viviendas, dentro del área del lote 474 viviendas y 1275 dentro de la vivienda.

De acuerdo con el EOT, se efectuaría la optimización de las redes de conducción y la planta de tratamiento de agua potable, se instalarían nuevas redes necesarias que requerían el desarrollo urbanístico de la zona urbana continua y se estudiaría la viabilidad de construcción de embalses como nuevas fuentes. [2]

En el 2010 el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio actualizan el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, conocido como RAS y con este propósito entrega el Título C, Sistemas de Potabilización. En ella se presenta a las autoridades sanitarias y ambientales, a las autoridades locales y a la ingeniería nacional los procedimientos generales y particulares de diseño de los diferentes componentes de estos sistemas para lograr, a partir de las fuentes de abastecimiento disponibles, el tratamiento necesario para su potabilización. Por Ley les corresponde a las autoridades municipales asumir la responsabilidad de eliminar los riesgos que para la salud de la población representa consumir agua con cualquier grado de contaminación química o microbiológica. [1]

En el 2010 se construyó la planta de tratamiento en la vereda El Tobal, Subachoque, por la falta de planificación desde los inicios de la construcción del acueducto, se ve ahora reflejada con las fallas en la presión, no cumplimiento de los parámetros físico-químicos y microbiológicos establecidos en la normatividad, problemas de operación en el sistema, rompimiento de tuberías, turbiedad, falta de conocimiento sobre el funcionamiento de la planta de tratamiento, entre otros factores [3], debido a esto la planta detuvo su funcionamiento al poco tiempo de su instalación en el año 2011.

Implementando un plan de optimización, algunos de los problemas anteriormente mencionados serán solucionados, principalmente los directamente relacionados con el funcionamiento de la planta. Para realizar dicho plan se tienen que fijar los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de acueducto que se desarrollen en Colombia, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia dentro de un nivel de complejidad determinado, lo cual se encuentra en el Título B del RAS. [4]

La normativa vigente antes de la construcción de la planta de tratamiento ha tenido una serie de cambios los cuales se observan a continuación:

- Ley 9 de 1979 por la cual se dicta Medidas Sanitarias para la protección del Medio Ambiente. [5]
- Ley 99 de 1993 por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. [5]
- Decreto 1594 de 1984 por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la parte III - Libro I - del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a Usos del Agua y Residuos Líquidos. Derogado por el Decreto 3930 de 2010, salvo los artículos 20 y 21. [5]
- Decreto 3930 de 2010 por el cual el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11I- Libro 11 del Decreto
- Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos liquidas y se dictan otras disposiciones. [5]
- Decreto 1575 de 2007 por el cual el Ministerio de la Protección Social establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano. [5]
- Resolución 1096 de 2000, por medio del cual el entonces Ministerio de Desarrollo Económico adopta el Reglamento de Agua y Saneamiento RAS. [5]
- Resolución 1459 de 2005, expedida por el entonces Ministerio de Ambiente, Ciudad y Territorio (MAVDT), modificatoria de la Resolución 1096 de 2000. [5]
- Resolución 2115 de 2007 por medio de la cual los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial señalan las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. [5]

- Resolución 811 de 2008 por medio de la cual los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial definen los lineamientos a partir de los cuales la autoridad sanitaria y las personas prestadoras, concertadamente definirán en su área de influencia los lugares y puntos de muestreo para el control y la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en la red de distribución. [5]
- Resolución 82 de 2009 por medio de la cual el Ministerio de la Protección Social adopta unos formularios para la práctica de visitas de inspección sanitaria a los sistemas de suministro de agua para consumo humano. [5]
- Resolución No. 4716 de noviembre 18 de 2010 expedida por los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial “Por medio de la cual se reglamenta el parágrafo del artículo 15 del Decreto 1575 de 2007” sobre el Mapa de Riesgo de la Calidad del agua para Consumo Humano. [5]
- Resolución 1096 Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. Entró en vigencia en agosto del 2016

2.2 Agua potable

El agua potable es el agua adecuada para consumo humano, que por sus características físicas, químicas y microbiológicas cumple los requisitos de calidad establecidos en el marco legal y por tanto no afecta la salud del hombre. Estas normas se basan en estudios toxicológicos y epidemiológicos, así como en consideraciones estéticas. [6]

Siendo el agua indispensable para la vida, es necesario que los consumidores dispongan de un abastecimiento de agua satisfactorio, por lo que la asociación de usuarios del acueducto debe realizar el mayor esfuerzo posible para suministrar agua de la mejor calidad de acuerdo con las normas establecidas. La buena calidad del agua de consumo humano asegura al consumidor su protección contra la presencia de agentes patógenos y compuestos físicos y químicos perjudiciales a su salud. La información que proveen los programas de vigilancia y control del agua para consumo humano, aparte del beneficio relacionado con la disminución de enfermedades transmitidas por vía hídrica, es un medio que permite el mejoramiento de la calidad del servicio de abastecimiento de agua. [6]

En Colombia la norma que regula los parámetros de calidad de agua para consumo humano se rige bajo las condiciones del decreto 1575 de 2007 por el cual se establece “El Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo

Humano”. Aplica a todas las personas prestadoras que suministren o distribuyan agua para consumo humano, ya sea cruda o tratada, en todo el territorio nacional, independientemente del uso que de ella se haga para otras actividades económicas, a las direcciones territoriales de salud, autoridades ambientales y sanitarias y a los usuarios. Según este decreto se define el agua potable como aquella que debe reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el presente decreto, para ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a su salud. [6]

2.3 Plantas de tratamiento de Agua Potable

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS define la planta de tratamiento de agua potable como el conjunto de obras, equipos, materiales y personal necesarios para efectuar los procesos que permitan cumplir con las normas de calidad del agua potable. En este sentido, el diseño, la operación y el mantenimiento del sistema son actividades fundamentales para que el sistema de tratamiento brinde garantías sobre la calidad del agua para consumo humano.

Así mismo, la Resolución 1096 de 2000 definió en primera instancia la optimización de un sistema de tratamiento como el proceso de diseño para lograr la mejor armonía y compatibilidad entre los componentes del sistema o incrementar su capacidad o la de sus componentes, aprovechando al máximo todos los recursos disponibles. Posterior a esto, el proyecto de Resolución 1096 de 2016 desarrolla el concepto de optimización como el conjunto de acciones encaminadas a mejorar la capacidad, eficiencia y eficacia de la infraestructura componente del sistema de acueducto, mediante su intervención parcial o total. De esta manera se reconoce que la optimización responde a distintas acciones orientadas siempre al mejoramiento integral de un sistema de abastecimiento de agua.

En el título C del RAS, se encuentran los procedimientos generales y particulares de diseño, operación y mantenimiento de los diferentes componentes de estos sistemas para lograr, a partir de las fuentes de abastecimiento disponibles, el tratamiento necesario para su potabilización. [6]

Para la selección de los procesos de tratamiento previo o paralelo al diseño de una planta, deben realizarse ensayos en el laboratorio siendo obligatorio entre estos, el ensayo de jarras. La prueba de jarras es obligatoria para cualquier nivel de complejidad, no solamente para los estudios de tratabilidad en el proceso de diseño, sino también diariamente, durante la operación de la planta, y cada vez que se presenten cambios en la calidad del agua. [6]

Los ensayos de laboratorio y planta piloto deben emplearse para determinar:

1. El grado de comportamiento de ciertos procesos de tratamiento.
2. Los criterios básicos de diseño para la planta a escala real (dosificaciones de los productos químicos, necesidad de mezcla y floculación, velocidad de filtración, tiempos de contacto, entre otros aspectos).

Al realizar los ensayos del test de jarras es necesario tener claro los conceptos de floculación, sedimentación y coagulación, ya que estos serán objeto de optimización. El agua que es captada para suministrar la población contiene partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales, estas generan la turbiedad y el color en el agua. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. Por otro lado aunque su concentración es muy estable, no presentan la tendencia de aproximarse unas a otras. Por lo tanto para remover estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación, la coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. La floculación tiene por objetivo favorecer con la ayuda de la mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un floc que pueda ser fácilmente retirado en el proceso de sedimentación que consiste en remover por acción de la gravedad, las partículas más pesadas que el agua. [7]

El ensayo del test de jarras consiste en simular en vasos de precipitado o jarras, el proceso de coagulación y floculación que se producirá en la planta de tratamiento y evaluar distintos parámetros durante o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento. Su objetivo básico es la determinación de los coagulantes y auxiliares de coagulación, dosis óptima, secuencia de adición de los mismos para turbiedad, color, pH, temperatura. [6]

2.4 Principios teóricos del sistema de tratamiento

2.4.1 Tratamiento de agua en zonas rurales

El tratamiento de agua potable en pequeñas comunidades rurales, se realiza habitualmente mediante plantas compactas en las que se utiliza una sola unidad que permite desarrollar los diferentes procesos de tratamiento necesarios para la potabilización del agua, garantizando un tratamiento completo bajo el esquema de un sistema convencional. Las plantas compactas de tratamiento de agua potable de forma general incluyen un proceso de aireación, decantación laminar para reducción de turbidez, sistemas de filtración y un proceso final de desinfección de agua previo al

suministro y distribución; las ventajas de este tipo de plantas es que son diseñadas para requerir un mínimo de energía, ocupan poco espacio, no presentan contaminación acústica, no requieren obras civiles de gran envergadura y su mantenimiento requiere un bajo costo; por lo que son adecuadas para el suministro de poblaciones pequeñas como veredas, hoteles, unidades residenciales, pueblos pequeños. [8]

2.4.2 Aireación

En la aireación se pone en contacto el agua cruda con el aire, con el propósito de modificar la concentración de sustancias volátiles contenidas en ella. La aireación se recomienda en los siguientes casos [5]:

- Para transferir oxígeno al agua y aumentar el oxígeno disuelto.
- Disminuir la concentración del dióxido de carbono (CO₂).
- Disminuir la concentración del sulfuro de hidrógeno (H₂S)
- Remover el metano(CH₄).
- Oxidarel contenido de hierro (Fe) y manganeso (Mn).
- Remover compuestos orgánicos volátiles (COV).

La aplicabilidad de los diferentes tipos de aireadores y su dosificación deben ser determinadas a través de ensayos. En los aireadores debe controlarse el tiempo de aireación y la eficiencia de remoción. [5]

- Aireadores de bandejas

Los Aireadores de bandejas deben constar de una serie de bandejas equipadas con ranuras, fondos perforados o mallas, las cuales deben contener un medio grueso de coque. El agua debe distribuirse sobre estas bandejas y caer a un tanque receptor. El coque aumenta la eficiencia del intercambio de gases y la distribución del agua. La corrosión, la formación de lamas biológicas y el crecimiento de algas son factores que deben considerarse en la selección del material de construcción. Acero inoxidable, aluminio, concreto o maderas resistentes son los materiales más usados por su durabilidad. Debe asegurarse una buena distribución del agua sobre el área

total de la bandeja para obtener una buena eficiencia. [5] De acuerdo con el RAS, Título C, para el diseño se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- Cargas superficiales menores de 100 m³/día).
- Área de 0.5 a 2 m² por cada 1000 m³ de capacidad.
- De 3 a 5 bandejas.
- El espaciamiento entre bandejas de 0.3 m a 0.75 m.
- Profundidad del agua en la bandeja de aproximadamente 0.15 m

Los sistemas de aireación de bandejas son muy susceptibles al crecimiento de algas y de limo, lo cual puede hacer que el tratamiento sea menos eficaz. Este crecimiento se verifica algunas veces mediante la adición de sustancias químicas como el cloro o sulfato de cobre; no obstante, estos aditivos representan un gasto adicional y pueden estar presentes incluso en el agua tratada del sistema. [9]

- Ventilación forzada

En el aireador con ventilación forzada, en el interior del tanque se debe ubicar tubería perforada o difusores colocados cerca del fondo, donde el aire comprimido, debe inyectarse a través del sistema con fin de producir burbujas. [5] De acuerdo con el RAS, Título C, las unidades deben diseñarse teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- El tiempo de retención debe ser mayor de 5 minutos.
- La profundidad del tanque debe estar entre 2.5 m y 4 m.
- La relación entre la longitud y el ancho debe ser mayor de 2.
- El aireador debe garantizar una entrada de 1.5 litros de aire por litro de agua.

- Aireación mecánica

El tanque debe estar provisto de un eje vertical con paletas o hélices capaces de producir una alta turbulencia. La implementación de este tipo de aireador requiere de energía para accionar el motor. Se recomienda el empleo de placas deflectoras para impedir la formación de remolinos y zonas muertas en el tanque. Esta unidad debe diseñarse de forma que garantice la cantidad de oxígeno necesario para completar la oxidación. [5]

2.4.3 Coagulación

Con el fin de remover las sustancias en suspensión, en forma coloidal o en solución en el agua cruda, se agregan al agua coagulante que permitan aglutinarlas y formar floc de forma que puedan luego ser removidas del agua. [5]

Los procesos que se llevan a cabo en esta etapa del tratamiento del agua potable son la dosificación y la mezcla rápida. Una vez adicionado el coagulante, este debe dispersarse rápida y homogéneamente en el cuerpo de agua, para lo cual deben emplearse las unidades de mezcla rápida. Estos equipos pueden ser hidráulicos o mecánicos. Entre las unidades hidráulicas de mezcla rápida que pueden usarse se encuentran el resalto hidráulico, los vertederos, los mezcladores estáticos y los difusores; entre las unidades mecánicas de mezcla rápida que pueden emplearse se encuentran los mezcladores mecánicos. [5]

Según el RAS, Título C, Para garantizar la eficiencia del proceso de coagulación, debe vigilarse la correcta operación de los procesos de dosificación y mezcla rápida. Para garantizar que la coagulación – floculación esté realizándose correctamente, deben verificarse los siguientes parámetros:

- La eficiencia de remoción de la turbiedad en el agua decantada o filtrada, si se trata de un tratamiento por filtración directa.
- La eficiencia de remoción del color en el agua decantada o filtrada, o del carbono orgánico total (COT).
- La concentración residual de Al o Fe del agua filtrada o efluente de la planta, la cual debe cumplir con los valores máximos aceptables establecidos en el artículo 7º de la Resolución 2115 de 2007, o la norma que la modifique o reemplace. De la eficiencia de este proceso dependen los rendimientos de todos los tratamientos posteriores al agua, como la sedimentación, la filtración y la desinfección

Según el RAS, Título C, Los coagulantes que pueden emplearse son:

- Los coagulantes con sales de aluminio como el sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal, aluminato de sodio y el policloruro de aluminio. Se recomienda el uso de este último para el tratamiento de aguas blandas y turbias, previa la ejecución de ensayos para la selección de coagulantes. [5]
- Los coagulantes con sales de hierro como el cloruro férrico, el sulfato férrico y el sulfato ferroso. Para la dosificación en la coagulación por adsorción-neutralización debe tenerse en cuenta la relación estequiométrica entre la dosis del coagulante y la concentración de los coloides, ya que una sobredosis conduce a una re estabilización de las partículas. Para aguas con bajo nivel de alcalinidad, se recomienda aumentar el pH añadiendo hidróxido de calcio (Ca(OH)_2). [5]
- Se pueden emplear los polímeros de hierro (III) y aluminio (III) como coagulantes. [5]
- Entre los polímeros orgánicos o polielectrolitos que se pueden emplear son los polímeros naturales donde están los derivados del almidón, la celulosa y los materiales proteicos. [5]

2.4.4 Floculación

Hace referencia a la segunda parte de mezcla que corresponde a la mezcla lenta; la primera es la mezcla rápida; tiene por objeto permitir los contactos entre los flóculos, la turbiedad y el color, la mezcla debe ser lo suficiente para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad pero no muy grande, ya que los flóculos corren el riesgo de romperse; aún si el tiempo es no más del tiempo óptimo de floculación. La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Los parámetros que se caracterizan la floculación son los siguientes [10] :

- Floculación Ortocinética (Se da por el grado de agitación proporcionada: Mecánica o Hidráulica).
- Gradiente de Velocidad (energía necesaria para producir la mezcla).
- Número de colisiones (choque entre microflóculos).

- Tiempo de retención (tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación).
- Densidad y tamaño de floc.
- Volumen de lodos (los flóculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación).

2.4.5 Sedimentación

Esta unidad se encarga de la separación de la fase sólida y líquida por acción de la gravedad de una suspensión diluida, es decir, en una sustancia líquida donde se encuentre material sólido suspendido, por acción de la gravedad dicho material se precipita hacia el fondo de la unidad obteniendo un líquido claro y en el fondo el material concentrado. [11]

Cabe resaltar que esta operación no se realiza por sí sola, puesto que el material suspendido generalmente es de tamaño muy pequeño y por ende no muy pesado; por lo que es necesario el uso de coagulantes, con lo que se busca acrecentar el tamaño de las partículas del material suspendido aglomerándolas y así aumentar el peso de estas facilitando su precipitación hacia el fondo del sedimentador por acción de la gravedad. [12]

El patrón de sedimentación de una partícula discreta en un tanque rectangular es, que a medida que la partícula a sedimentar se desliza hacia abajo, también es llevada hacia adelante por la velocidad del flujo de líquido a través de la cuenca. Los sedimentadores de placas inclinadas están posicionados en un ángulo de 55° a 60° para permitir que los sólidos sedimentados se deslicen hacia abajo y al fondo del tanque. [3]

Las condiciones del flujo dependen de la geometría de las placas y la velocidad del flujo entre las mismas. La geometría de las placas/tubos debe de asegurar un régimen laminar del flujo entre las placas. Además, entre las placas se tiene que garantizar flujo estable. El criterio del régimen del flujo entre las placas es el número de Reynolds, mientras la estabilidad del flujo se demuestra por el número de Froude. [3]

Según el Ras, Título C el tanque debe estar provisto de módulos de tubos circulares, cuadrados, hexagonales, octogonales, de placas planas paralelas, de placas onduladas o de otras formas, que deben colocarse inclinadas de modo que el agua ascienda por las celdas con flujo laminar. El diseño debe ser flexible para facilitar el retiro o el cambio de placas. Los parámetros generales de diseño son:

- La unidad debe diseñarse de manera que el tiempo de retención esté entre 10 min y 15 min.
- La profundidad del tanque debe estar entre 4 m y 5.5 m.
- La carga superficial de la unidad debe estar entre 120 y 185 m/día) para placas angostas y de 200 a 300 m/día para placas profundas. Para velocidades mayores deberá hacerse ensayos en planta piloto.
- El sistema debe cubrir la totalidad del área de sedimentación acelerada y debe constar de tuberías perforadas o canaletas que trabajen con un tirante de agua no inferior a 8 cm.
- El número de Reynolds (Re) debe ser menor a 500, se recomienda un Reynolds menor a 250.

Para sedimentadores con placas debe tenerse en cuenta además lo siguiente:

- La inclinación de las placas debe ser de 55° a 60°.
- El espacio entre las placas debe ser de 5 cm.
- Con placas profundas para cada fila de placas debe dejarse un ducto de ingreso del agua por el fondo a una altura aproximada de 15 a 30% de la longitud de la placa y en la parte superior se colocará el sistema de recolección por medio de vertederos u orificios. Cada placa debe tener su elemento hidráulico de extracción del flujo.

2.4.6 Filtración

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad. [4]

Como las fuerzas que mantienen a las partículas removidas de la suspensión adheridas a las superficies de los granos del medio filtrante son activas para distancias relativamente pequeñas (algunos angstroms), la filtración usualmente es considerada como el resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios: transporte y adherencia. Inicialmente, las partículas por remover son transportadas de la suspensión a la superficie de los granos del medio filtrante. Ellas permanecen adheridas a los granos, siempre que resistan la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento. [4]

Según el Ras, Título C Para filtros rápidos de flujo ascendente el agua cruda debe entrar por debajo del lecho y asciende para descargar en un sistema efluente, puede hacerse lavado continuo o lavado intermitente; En este último caso el lavado se hace en el mismo sentido de la filtración, lo que tiene el inconveniente de producir conexiones cruzadas de agua limpia con agua de lavado. El filtro puede ser de un solo medio (arena o antracita), de medio dual (arena y antracita) o lechos mezclados. Puede ser de profundidad convencional de 0.6 m a 0.9 m o de capa profunda de más de 0.9 m de altura, las partículas deben ser duras, resistentes, de forma preferiblemente redondeada sin esquistos ni partículas extrañas, libre de lodo, arcilla o materias orgánicas. La tasa de filtración debe depender de la calidad del agua, de las características de la filtración y de los recursos de operación y control, la tasa normal debe garantizar la eficiencia del proceso, para lechos de arena o antracita sola con T_e de 0.45 mm a 0.55 mm y una profundidad máxima de 0.75 m, la tasa debe ser inferior a 120 m/día.

2.4.7 Desinfección

Las partículas coloidales desestabilizadas, se pueden atrapar dentro de un floc, cuando se adiciona una cantidad suficiente de coagulantes, habitualmente sales de metales trivalente como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, o Cloruro Férrico $FeCl_3$, el floc está formado de moléculas de $Al(OH)_3$ o de $Fe(OH)_3$. La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales acelera la formación del precipitado. Las partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del floc; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. En otras palabras, una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menor cantidad de coagulante. [7]

La dosificación de cloro o sus derivados es el método de desinfección más utilizado por las plantas de tratamiento de agua potable. La finalidad de este proceso es destruir las bacterias por la acción germicida natural del cloro, y esto también favorece la oxidación del hierro, el manganeso y sulfuros de hidrogeno así como también la destrucción de compuestos generadores de olores y sabores, la acción desinfectante se produce por su capacidad de traspasar la pared celular del patógeno y atacar su sistema enzimático, provocando la muerte del organismo; el efecto del cloro en el agua tiene la capacidad de durar hasta el grifo del consumidor y también actúa disminuyendo el pH del agua a causa de los iones hidrógeno que se producen en las reacciones con el agua. [13]

Debe definirse una dosis de cloro que garantice el impedimento del crecimiento microbiano en cualquier punto de la conducción o red de distribución y manteniendo mínimo de 0,3 mg/L en todos los puntos de la red de distribución permanentemente, Cuando la desinfección se realice a través de cloración, el tiempo de contacto entre el

cloro (o su derivado) debe ser determinado en función de la dosis, el pH y la temperatura, procurando mantener un pH ligeramente ácido [13]

El RAS, título C estipula que la concentración de cloro residual libre en el sistema de distribución debe estar entre 0.2 mg/L y 1.0 mg/L; El cloro debe aplicarse en un punto donde provea una mezcla óptima y asegure un máximo tiempo de contacto, para su aplicación pueden usarse dosificadores cuya operación debe realizarse con el mayor control posible, ya que una pequeña variación en la concentración de las sustancias químicas puede llegar a ser representativa y afectar la calidad del agua aumentando los costos de producción. Todos los cloradores deben instalarse para funcionamiento continuo, libres de problemas de operación, la selección del punto de aplicación del cloro debe hacerse con base en:

- Contrapresión según especificación del fabricante.
- Mezcla rápida y homogénea del cloro en el agua.
- Facilidad de acceso al equipo de cloración para inspección.
- Disponibilidad de agua y espacio para almacenamiento de cilindros.
- Disponibilidad de energía eléctrica.

3 Metodología

Para el desarrollo del proyecto se definieron tres fases principales; en primer lugar, el reconocimiento del proceso y recolección de información sobre la planta de tratamiento; en segundo lugar la proyección de la demanda de agua con su correspondiente evaluación de las condiciones operativas de la planta en un periodo de diseño; y por último, la formulación de un plan de optimización para la planta de tratamiento que permita la armonización de sus componentes logrando un aumento en su eficiencia y eficacia mediante la intervención parcial del sistema de tratamiento. Cada una de estas fases está compuesta de una serie de acciones a seguir para su avance y desarrollo. A continuación se presenta detalladamente la metodología con sus fases y las acciones que las componen:

3.1 Reconocimiento del proceso y recolección de información

3.1.1 Recolección de información primaria y secundaria

Se realizó una búsqueda de los antecedentes históricos de la planta de tratamiento, planos y cálculos de diseño, manuales de operación y mantenimiento, informes técnicos y operativos, entre otros. El fontanero de la planta de tratamiento de Subachoque suministró parte de esta información, así como también la Junta Directiva de la Asociación de Usuarios del Acueducto El Toba. La alcaldía también entregó información relevante y durante las visitas realizadas se recolectó información visual sobre la operación del sistema y detalle de las estructuras que componen la planta de tratamiento.

3.1.2 Visita de reconocimiento

En la visita técnica a la planta se identificaron las diferentes operaciones y procesos unitarios que permiten el tratamiento del agua, reconociendo aspectos propios de su operación y funcionamiento actual.

3.1.3 Identificación de los aspectos críticos de la PTAP

Seguido del reconocimiento del proceso de tratamiento y sus mecanismos de operación, se identificaron los aspectos críticos que serían objetivo de esta optimización, entendiendo como aspecto crítico aquellos elementos de diseño y operación en los que se pueda aplicar un control y que sea esencial para el óptimo funcionamiento de este, como fallos en la operación, estructuras y maquinarias deterioradas o dañadas, bajos tiempos de retención, cantidades de coagulante no adecuadas, entre otros. Esta identificación se hizo basada en la información primaria

y secundaria ya recolectada, apoyados también de las visitas técnicas y la información suministrada por el fontanero donde se identificaron los fallos en el sistema.

3.2 Proyección de la demanda de agua y evaluación del sistema de tratamiento

3.2.1 Proyección de población y estimación de caudales

En primer lugar se realizó un análisis de las características demográficas de la población rural del municipio de Subachoque para establecer tasas de crecimiento que permitieran la proyección estimada de la población de la vereda El Tobal. Esta proyección tomó como insumos los datos reportados por la Asociación de Usuarios del Acueducto en relación con el número de puntos en la red de distribución y la población atendida, así como los resultados de censos reportados por el DANE para la zona rural del municipio.

Posterior a esto se realizaron los cálculos de dotación y demanda según lo establecido en la resolución 2320 del 2009 y el RAS título B. En este punto se determinó la proyección de consumos a partir del cálculo del caudal medio diario, caudal máximo diario y caudal máximo horario, para con estos evaluar la capacidad hidráulica de la planta durante el periodo de diseño.

3.2.2 Evaluación del sistema de tratamiento

Con los resultados obtenidos en la estimación de demanda y calculo de caudales, se realizó una evaluación hidráulica de las unidades que componen la planta de tratamiento. Como complemento a esto y con el fin de garantizar las condiciones de tratabilidad del agua se realizó un análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua cruda proveniente de la Quebrada El Salitre y los correspondientes ensayos de jarras para determinar la condición óptima de tratamiento, en relación con el tipo de coagulante, dosis de coagulante y tiempos de retención en el proceso de clarificación.

3.3 Plan de optimización de la planta de tratamiento

3.3.1 Propuesta de optimización de la planta de tratamiento

En esta etapa se desarrolló una propuesta de optimización que comprende los distintos ajustes en términos de diseño, operación y mantenimiento requeridos en la planta de tratamiento para garantizar, como lo establece el RAS, la mejor armonía y compatibilidad entre los componentes del sistema, aprovechando al máximo todos los recursos disponibles, para mejorar la capacidad, eficiencia y eficacia de la infraestructura que compone el sistema de tratamiento. En caso de que los resultados de la proyección de caudales evidencien la necesidad de aumentar la capacidad de la planta se incluirá dicha propuesta de ampliación, en caso contrario la optimización se centrará en mejorar la eficiencia y eficacia del sistema.

3.3.2 Evaluación del sistema de tratamiento proyectado.

Se realizaron los cálculos y la evaluación de los diferentes parámetros de diseño, para cada una de las propuestas de acuerdo con lo estipulado en la resolución 1096 del 2016 que tiene como objetivo reglamentar los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado.

3.3.3 Análisis económico de la propuesta.

Se analizó la información de la propuesta teniendo en cuenta el costo de inversión asociado a la intervención. Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos, se seleccionó la propuesta de optimización más adecuada y viable para la planta de tratamiento, teniendo en cuenta cuál de ellas se adapta mejor al presupuesto de la Asociación de usuarios del acueducto El Tobar, como también que proporcione un aumento en la eficiencia y calidad de operación de la planta de tratamiento.

4 Desarrollo central

4.1 Recolección de información primaria y secundaria

El área de estudio se encuentra localizada en la región central de Colombia, en la Vereda El Tobal del municipio de Subachoque, Cundinamarca. El Municipio posee una extensión aproximada de 21,153 kilómetros cuadrados; limita al Norte con el municipio de Zipaquirá; al Oriente con Tabio y Tenjo; al Sur con Madrid y El Rosal; al Occidente con San Francisco, Pacho y Supata. (Ver mapa Subachoque anexo 1). Se encuentra a una altitud de 2663 msnm y una temperatura entre los 7° y 13° centígrados [14].

El acueducto de la vereda El Tobal inicia en 1943 luego de las labores realizadas, principalmente por Víctor Rico, en pro de conseguir, de una manera eficiente y organizada, el agua proveniente de la quebrada El Mojan para él y las aproximadamente 30 viviendas que se encontraban carentes de este sistema de prestación del recurso. La vereda se encuentra organizada por entradas numeradas (de la 37 a la 42 actualmente) sobre la vía Subachoque – La Pradera, en ese inicio de la organización del acueducto se prestaba el servicio de esa “red principal” solo a los habitantes de la entrada 39. El acueducto, así mismo, conto con el nombre de acueducto Víctor Rico y Amigos, el cual prestaba el servicio a él y a sus vecinos; no paso mucho tiempo hasta que los habitantes de las entradas 38, 39 y parte de la 40, demandaran el servicio como parte de una comunidad. Ese hecho llevó a la ampliación de esa red inicial, con una tubería de mayor capacidad y un tanque de almacenamiento y distribución ubicado en la parte alta de la entrada 38, para por obvias razones prevenir la falta de agua por el incremento de suscriptores, a los cuales el servicio debía ser prestado. [3]

En 1978 se iniciaron esfuerzos tanto de la comunidad como del municipio de Subachoque, para que los acueductos veredales contaran con un servicio un poco más adecuado o por lo menos, acorde a las diferentes leyes exigidas hasta la fecha; es ahí cuando la vereda decide consultar a la CAR. Esta Corporación analizó la zona y el comportamiento del acueducto, con el fin de aportar un poco de ingeniería a este proceso, el cual hasta la fecha era casi empírico. La CAR recomendó que se tomara un caudal de 3.12 litros de la quebrada El Salitre, ubicada aproximadamente a 5 km del tanque de distribución y almacenamiento de la entrada 38, con especificaciones de una red matriz de 3 pulgadas de diámetro. Haciendo caso a estas recomendaciones, la CAR otorgó una concesión por 10 años a la Junta de Acción Comunal en 1982, que pasados estos se renovó por 10 años más. [3]

En el 2001 se crea la asociación de usuarios de la vereda El Tobal, nombrando como presidente a Omar Ángel, e inició el proceso de modernización del acueducto,

rigiéndose por los diferentes estatutos legales de cualificación y calificación de usuarios, tratado del agua, y correcta distribución de la misma. En este año se evaluó la posibilidad de contar con una planta de tratamiento en el sistema. En diciembre de 2006 la CAR otorga una concesión por 10 años más, pero en el 2009 surge una nueva legislación para los acueductos veredales en la cual deben inscribirse en la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios la cual exigió que se contara con un catastro de redes de la vereda y una tabulación de usuarios con su respectiva ubicación topográfica. [3]

En el 2010 se construyó la planta de tratamiento en la vereda El Tobal, por la falta de planificación desde los inicios de la construcción del acueducto, se ve ahora reflejada con las fallas en la presión, no cumplimiento de los parámetros físico-químicos y microbiológicos establecidos en la normatividad, problemas de operación en el sistema, rompimiento de tuberías, turbiedad, falta de conocimiento sobre el funcionamiento de la planta de tratamiento, entre otros factores [3], debido a esto la planta detuvo su funcionamiento al poco tiempo de su instalación en el año 2011.

La oficina del acueducto (*Ver mapa de vías de acceso anexo 3*) está ubicada sobre la vía “La Pradera” entre las entradas 34 y 35. El personal actual del acueducto son el presidente nombrado anteriormente, la secretaria y el fontanero, este último es quien se encarga de la operación y el mantenimiento de la planta de tratamiento. La CAR asignó un caudal concesionado de 1,9L/s, por otro lado la asociación de usuarios del acueducto no tiene información técnica propia de la planta, como planos y cálculos de diseño que fueron utilizados para la construcción de esta. Este tampoco cuenta con manuales de operación y mantenimiento, informes técnicos y operativos.

Actualmente la Asociación de usuarios del acueducto El Tobal está manejando una tarifa única establecida por ellos que depende del tipo de usuario, dividido en casa campesina, casa campestre y abrevadero; con tarifas mensuales de \$4.000 pesos para las casas campesinas y de \$19.000 pesos para las casa campestres y los abrevaderos; la vereda cuenta con 197 puntos de abastecimiento (*ver plano red de distribución de usuarios anexo 26 y Tabla de usuarios anexo 27*), por los cuales se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 1. Tarifas de por puntos de suministro

Punto de suministro	Cuenta de Usuarios	Suma de Tarifa única
abrevadero	55	\$ 1.045.000
campestre	67	\$ 1.273.000
casa	75	\$ 300.000
Total general	197	\$ 2.618.000

Fuente: Autores

4.1.1 Fuente de abastecimiento

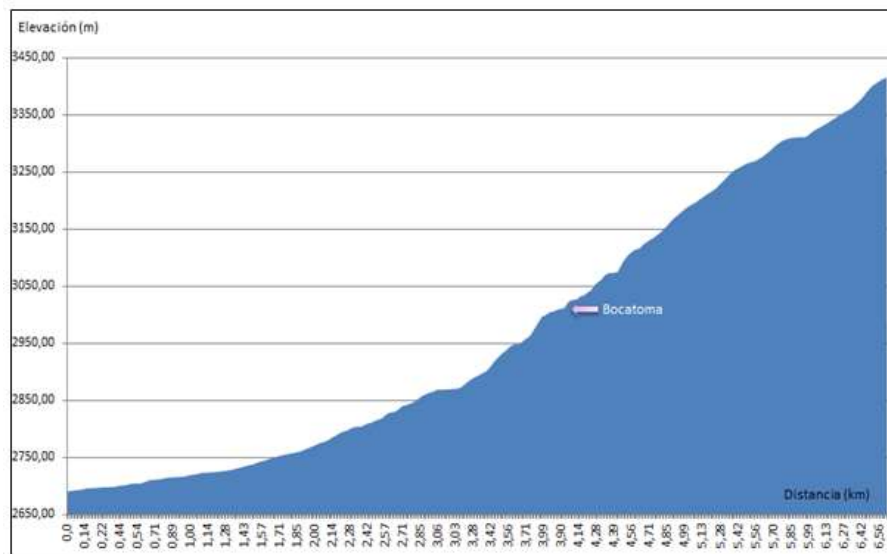
La Quebrada El Salitre fuente abastecedora del acueducto rural El Tobal, nace al noroeste de la sub-cuenca Rio Balsillas, perteneciendo a la cuenca alta del Rio Bogotá. Esta fuente de abastecimiento se localiza en el sector rural al noroeste del municipio de Subachoque entre las veredas Pantano de Arce, El Tobal y Guamal; el principal afluente de la Quebrada El Salitre es la Quebrada el Bobal, teniendo como punto de unión las coordenadas (5° 1'9.22"N, 74° 9'9.66"O). (Ballesteros Rodríguez & Hernández Gamboa) (Ver mapa El Tobal anexo 2).

La microcuenca de la quebrada El Salitre era una microcuenca acumulativa, resultado de una deposición de material por diversos agentes como hielo, agua y viento, como se vio en su pasado climático; sin embargo, ahora, la microcuenca representa más bien una microcuenca de captación, que constituye un área de tierra que drena naturalmente a un punto determinado del Rio Subachoque. [15]

Si su clasificación se hiciera según su dinámica, se podría decir que la quebrada El Salitre es un cuerpo de agua que tiene variaciones que dependen del tiempo atmosférico, porque aunque existe una alimentación freática (característica de zonas paramunas), su caudal experimenta cambios debido a las fluctuaciones de las precipitaciones y otras variables del tiempo atmosférico, relacionadas con las temporadas de lluvia y secas, cosa que juega un papel ecológico importante, debido a que estas características la inducen a tener aguas torrenciales y crecidas repentinas que desaparecen en cuanto cesan las lluvias, efectos que pueden perturbar a las comunidades de macro invertebrados. [15]

El nacimiento de la quebrada El Salitre se halla a unos 3417 msnm aproximadamente. La quebrada nace bajo ese nombre y luego pasa a llamarse quebrada Rosa Larga, cuando corre cerca de la Laguna del Vejerón, posteriormente, luego de juntarse con las quebradas San Carlos y El Choque la quebrada es llamada quebrada de Las Juntas, desembocando en el Rio Subachoque a una altura aproximada de 2690 msn; así, la quebrada tiene una elevación ganada de 727 metros, una longitud aproximada de 6,65 kilómetros, una inclinación máxima del 44,8% y una inclinación promedio del 11,6% , según se evidencia en la ilustración 1.

Ilustración 1. Perfil topográfico de la quebrada

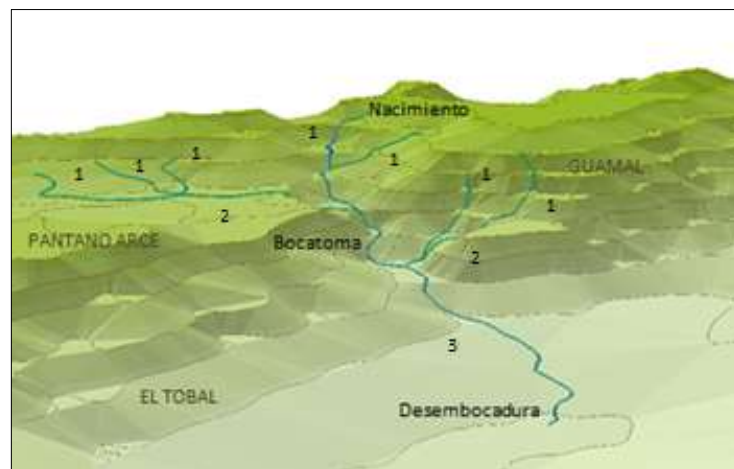


Fuente: Evaluación de la calidad del agua de la quebrada el salitre. [15]

El área de la microcuenca El Salitre ocupa 4.260 kilómetros cuadrados (km²) y la mayor parte del recorrido que tiene el cuerpo de agua, marca una trayectoria que inicia en Pantano de Arce y termina diferenciando los límites entre las veredas de El Tobal y Guamal.

A su vez, la morfología fluvial y específicamente la geometría del cauce, responden a una figura casi recta, de baja sinuosidad (aproximadamente 1,19), presente, debido a que el cuerpo de agua escurre a lo largo de una falla geológica.

Ilustración 2. Numero de orden de la quebrada El Salitre



Fuente: Evaluación de la calidad del agua de la quebrada el salitre. [15]

Como se puede observar en la ilustración 2, el número de orden de la quebrada El Salitre es de orden 3, debido a que está formada por 2 corrientes de orden 2; parámetro importante, que puede demostrar la influencia sobre el volumen de agua que se transporta.

Dicho lo anterior, según las estimaciones de la CAR, la microcuenca de la quebrada El Salitre, era para el 2010, la segunda microcuenca que generaba mayores aportes a la subcuenca del río Subachoque, en términos de caudales medios mensuales, con un valor aproximado de 60 (L/s), después de la quebrada Pantano de Arce con 88 (L/s) y antes de la quebrada Angosturas con 53 (L/s). Dichas estimaciones permitieron, como se puede observar en la tabla 2, reconocer un caudal máximo del 2,74% del tiempo (es decir 10 días de un año de 365 días), un caudal medio del 50% del tiempo y un caudal mínimo del 97,26% del tiempo.

Tabla 2. Caudales característicos de la microcuenca de la quebrada El Salitre

Valores característicos en m³/s			
Caudal Medio Anual	Caudal Máximo 2.74%	Caudal Medio 50%	Caudal Mínimo 97.26%
0,060	0,210	0,046	0,009

Fuente: Evaluación de la calidad del agua de la quebrada el salitre. [15]

De manera más clara, los registros indican que por lo menos en 10 días del año se igualó o se excedió un caudal de 210 L/s, mientras que en 6 meses del año se conservó un caudal de 46 L/s y por lo menos en 355 días se superó un caudal de 9 L/s, por lo tanto la quebrada tiene la capacidad de suministrar el caudal requerido por la planta que depende de la concesión dada por la CAR que actualmente es 1,9 L/s.

En el proyecto de “Evaluación de riesgos sobre la calidad del agua en el Acueducto Rural El Tobal, en el marco del Plan de Seguridad del Agua” que actualmente está siendo realizado por Andrés Felipe Ballesteros Rodríguez y Juan Sebastián Hernández Gamboa estudiantes de la Universidad Santo Tomas, se realizó la toma de muestras de agua de la quebrada El Salitre. En este caso se tuvieron en cuenta tres puntos de muestreo que son:

- La Unión, este punto de muestreo está ubicado tres kilómetros aguas abajo del punto de nacimiento de la Quebrada El Salitre, este punto de muestreo presenta intervención de las actividades antropogénicas de la zona (agricultura y ganadería). [14]

- Puente, es otro punto de muestreo que está ubicado en una zona de conservación del terreno, ya que esta zona está protegida bajo la figura de reserva forestal privada. [14]
- Bocatoma es el tercer punto de muestreo, es donde se capta el agua para la planta de tratamiento de la vereda El Tobar y hay aprovechamiento del suelo por parte del sector ganadero. [14].

Para cada punto de muestreo (*Mapa de ubicación de puntos de muestreo anexo 4*) se realizó la medición de 25 parámetros físico - químicos y biológicos, con el fin de evaluar la calidad del agua de la Quebrada El Salitre en el recorrido de la Quebrada cuyos resultados fueron los siguientes:

Tabla 3. Resultados de laboratorio de la Quebrada el Salitre

Parámetros	Normas (2115/07)	Unión	Puente	Bocatoma
Color	4	<5	<5	<5
Temperatura		10,37 °C	9,14	10,17
Turbiedad	2 (UNT)	2,8	10,3	3,1
pH	6,5-9	6,18	6,47	6,4
Oxígeno disuelto		7,24 ppm OD	6,39	6,76
Hierro	0,3 mg/L(Fe)	0,35	0,23	0,27
Coliformes totales	0 UFC/100 cm ³	740	210	930
E coli	0 UFC/100 cm ³	30	10	80

Fuente: Evaluación de riesgos sobre la calidad del agua en el Acueducto Rural [14]

El proyecto anteriormente nombrado, realizó los mapas de valoración de riesgo, para la zona donde se tomaron las muestras. En el mapa valoración de riesgo por ganadería (*Ver mapa de valoración de riesgo por ganadería anexo 5*) se observa la jerarquización por medio de los colores: rojo (muy alto), rosado (bajo), blanco (sin riesgo) o ausencia de este riesgo. Se encuentra que los predios 20, 8, 16 tienen alto riesgo de ganadería debido a que se tiene ganado bovino de engorde por la productividad de los suelos, se encuentra una alta exposición a nitritos, nitratos y

material fecal debido a la escorrentía de estos minerales por las aguas lluvias llegando a la Quebrada El Salitre. [14]

El riesgo por actividad agrícola (Ver Mapa de valoración de riesgo por actividad agrícola anexo 6), para la Quebrada El Bobal se tienen 7 predios que intervienen en esta, encontrando los predios 4, 6, 7, 9, 17 que tienen riesgo muy alto (color rojo), aguas arriba se tiene otro predio 8 que tiene un riesgo bajo (color rosado). La Quebrada El Salitre se encuentra intervenida por dos predios 10, riesgo medio (color amarillo) y el predio 12, presenta un riesgo muy alto (color rojo), donde los contaminantes se encuentran en el punto de unión tomándose este punto como la mezcla de los contaminantes de la Quebrada el Bobal y la quebrada el salitre, teniendo una severidad en los niveles de los contaminantes, deteriorando el recurso hídrico. [14]

El riesgo generado por deforestación (Ver Mapa de valoración de riesgo por deforestación anexo 7), en el punto de muestreo (Puente) se tiene que el predio 12 aledaño, tiene un riesgo bajo (color rosado) que debido a su pérdida de zona boscosa tiende a deteriorar el suelo, generando erosión en la ronda hídrica de la cuenca. Como se tienen otros predios como los 4, 6, 7 que están interviniendo la quebrada El Bobal de forma directa, en forma indirecta se encuentra el predio 2 que tiene un riesgo alto pero debido a su distancia de la quebrada no tiene mayor incidencia. El punto de muestreo (Unión) se tiene que los niveles de contaminación llegan al punto de mezcla, llegando al punto (Bocatoma) que en su recorrido se encuentra el predio 20 generando un riesgo bajo, en su tramo al punto toma de agua del acueducto. [14]

Los riesgos generados por remoción de cobertura (Ver mapa de valoración de riesgo por cobertura vegetal anexo 8), se da debido al arado generado para preparar el suelo para un próximo cultivo, en el cual se pierde el material vegetal, para empezar a generar un mono-cultivo, deteriorando los minerales del suelo, volviendo el suelo infértil, utilizando fertilizantes y otro tipo de aditivos para preparar el suelo, de esta forma se aplica una cantidad alta de insumos, en el punto (Puente) se observa que el riesgo es medio (color amarillo) tendiendo a que el predio se encuentra en grandes posibilidades de aumentar este riesgo. En la quebrada El Bobal se tienen cuatro predios que están contaminando de forma directa, el predio 4 con un riesgo medio, el predio 6 con un riesgo alto, los predios 9 y 16 con un riesgo bajo, que al entrar en contacto con el punto (Unión) de mezcla los agentes contaminantes se encuentran con el proceso de escorrentía, generado por el predio 20 que tiene un riesgo bajo, llegando al punto 3 (Bocatoma) que se encuentra en todo el cauce de la quebrada El Salitre. [14]

4.2 Descripción del sistema de tratamiento.

4.2.1 Descripción general del sistema

La planta de tratamiento de agua potable de la vereda el Tobal, cuenta con un sistema compacto para la purificación del agua, que incluye los procesos de aireación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección con cloro. La planta actualmente no se encuentra en operación debido a diferentes causas, principalmente por deterioro de las unidades y falta de mantenimiento, en esta situación la planta almacena el agua cruda en el tanque de almacenamiento y se suministra sin tratamiento a la población.

La bocatoma que suministra el agua desde la fuente hasta la planta es una bocatoma de fondo, que cuenta con una rejilla de 37 x 26 cm, sus barrotes son de 5/8" con una separación de 3 cm, se tienen dos muros de 30 cm de ancho y 131 cm de largo cada uno, con una salida de 50 cm de ancho para encauzar el caudal de la quebrada, que se tiene obstruida por piedras tratando de elevar la lámina de agua en el sistema alrededor de 20 cm, ayudando a la captación de fondo. La red principal del acueducto como se observa en el Anexo 9 Red principal, lleva el agua hasta 3 tanques ubicados en posiciones estratégicas y se encargan de almacenar y repartir el caudal captado en el Alto el Salitre a través de ramificaciones de la red principal en tuberías de 1/2", la conexión de la tubería del desarenador al tanque de bombeo es de 3", del tanque 1 al tanque 2 existe una conexión de tubería de 3" continua, que abastece al tanque 2 directamente y una de 2" que reduce a una de 1 1/2", la cual se deriva en las entradas 39, 40 y 41 para abastecer a los usuarios de esta parte de la red. [3]

El tanque 1 es el tanque de almacenamiento de la planta de tratamiento; El tanque 2 es por otro lado el que sirve a la entrada 38, como se puede observar en el Anexo 9 Red principal es abastecido principalmente por la tubería de 3" continua proveniente del tanque 1 y reparte a 68 usuarios que se encuentran en la zona. [3]

En el funcionamiento normal de la planta, acorde con los diseños iniciales, el agua que entraría a la planta es transportada desde el tanque de bombeo para su paso a la planta a través de una conducción de 3" (1) que descarga de forma directa al aireador de bandejas (2) para iniciar su tratamiento, seguido de esto se realiza la dosificación del coagulante (3) y el proceso de floculación (4) y sedimentación (5), finalmente el



En cada bandeja se encuentra un lecho de carbón coque de 15 cm de espesor que busca favorecer el proceso de aireación oxidando el hierro y el manganeso para su posterior remoción. El lecho presente en cada bandeja, como se observa en la ilustración 5, se encuentra en condiciones no adecuadas de mantenimiento, que ha llevado al desarrollo de comunidades biológicas que alteran la eficiencia del sistema [16].

Cuando el agua pasa de una bandeja a otra, entra en contacto con el aire, lo que permite un aumento en el contenido de oxígeno disuelto, favoreciendo la oxidación de metales, y la disminución de gases indeseados que pueden estar presentes en el agua. Cuando el agua ya ha pasado por las cuatro bandejas, es recogida en una quinta bandeja que permite su recolección y entrega al cono de mezcla rápida.

Ilustración 4. Aireador



Fuente: Autores.

Ilustración 5. Lecho de carbón en las bandejas del aireador.



Fuente: Autores

4.2.3 Coagulación

Para llevar a cabo el proceso de coagulación la planta de tratamiento cuenta con un cono de mezcla rápida (Ilustración 6) al cual ingresa el agua proveniente del aireador de forma tangencial en la parte cilíndrica a una cierta velocidad, lo que genera su rotación alrededor del eje longitudinal del cono, formándose un movimiento descendente hacia el vértice inferior.

Ilustración 6. Cono de mezcla rápida.



Fuente: Autores.

Actualmente no se está realizando dosificación de coagulante debido a que la planta no está en funcionamiento. Cuando se realizaba la aplicación se estaba utilizando como coagulante sulfato de aluminio tipo B, cuya eficiencia será evaluada en análisis posteriores. Por otro lado se cuenta con un dosificador en solución para el coagulante que se encuentra dañado y el punto de aplicación se encuentra en la parte baja del aireador, lo cual no favorece el proceso de coagulación, en la ilustración 6 se observa la cámara conica que es la unidad de mezcla donde se produce un aumento en la velocidad de mezcla (mezcla rápida), para favorecer la mezcla completa del coagulante y dar paso al proceso de floculación en el tanque.

4.2.4 Floculación

Una vez completa la mezcla con el coagulante, el agua es descargada en una cámara de floculación (Ilustración 7a) cuyo objetivo principal es brindar el tiempo de mezcla lenta necesario para garantizar la formación de un floc de buen tamaño y alta densidad, mejorando las eficiencias en remoción de turbiedad alcanzadas posteriormente en el sedimentador.

El agua ingresa a la parte baja de esta cámara a través de un tubo de 3" que proviene del vértice inferior del cono de mezcla y posteriormente en flujo ascendente el agua alcanza la canaleta de rebose que cuenta con dos orificios de 3" para la descarga y entrega del agua al sedimentador laminar (Ilustración 7b). Esta cámara presenta unas dimensiones útiles de 1,60 m de longitud x 0,38 m de ancho x 2,50 m de altura para un volumen total de 1,5 m³.

Ilustración 7. (a) Cámara de floculación (b) Canaleta de rebose



Fuente. Autores

4.2.5 Sedimentación

La planta de tratamiento cuenta en su unidad central con un sedimentador laminar de 4 m de largo por 1,6 m de ancho y 2,5 m de altura. La longitud del sedimentador incluye el área de sedimentación de 3 m y una sección de 0,5 m al inicio y final de la unidad correspondientes a la sección de entrada y salida del agua. En la parte baja de la unidad se encuentra un fondo inclinado con una pendiente de 58° que incluye la zona de sedimentación libre y la zona de lodos que es donde se acumula el floc sedimentado para posteriormente ser retirado a través de una válvula de desagüe. (Ver plano del sedimentador anexo 12)

Ilustración 8. (a) Sedimentador (b) Módulos laminares



Fuente: Autores.

El área de sedimentación tiene unas láminas de plástico de forma hexagonal con una longitud de 0,64 m como se ve en la imagen 5. Se observa que las placas del sedimentador se encuentran en mal estado, algunas se encuentran rotas y han sido mal ubicadas en su instalación por lo que el proceso que se lleva a cabo no es del todo eficiente.

4.2.6 Filtración

Para realizar el proceso de filtración se encuentra instalado un filtro de flujo descendente de conformación cilíndrica con altura de 3,23 m y diámetro de 1,67 m. El sistema de filtración está compuesto por una cámara de alimentación al filtro, un tanque principal distribuido en dos zonas, una inferior donde se desarrolla la filtración y otra superior para el almacenamiento de agua filtrada y un sifón para la realización del lavado del lecho filtrante. Actualmente no se dispone de información sobre las características del lecho filtrante por lo cual se desconoce el material utilizado, su granulometría, porosidad, coeficientes de uniformidad, entre otros.

El lavado del filtro se realiza siguiendo el principio de un sifón hidráulico por colmatación del lecho filtrante. Al colmatarse el lecho, el nivel del agua sube el nivel en la cámara de alimentación y en la rama alta del sifón, cuyo extremo inferior se encuentra sumergido. Al aumentar la pérdida de carga, el aire contenido en el sifón escapa por acción del paso del agua, causando que el sifón se cebe y genere un flujo en contracorriente a través del lecho filtrante de la cámara superior de agua filtrada a la cámara inferior. Esto disminuye nuevamente la pérdida de carga hasta que el filtro

reinicia nuevamente su carrera de filtración. El sifón cuenta con una tubería de descebado que permite el retorno del agua del sifón generando un espacio de aire en el mismo. (Ver plano general de la planta de tratamiento Anexo 10 y 13)

Ilustración 9. Filtro.



Fuente: Autores

4.2.6.1 Desinfección

Actualmente la desinfección que se realiza en la planta es manual, ya que los dosificadores se encuentran dañados. El fontanero es la persona encargada de realizar la aplicación manual de hipoclorito de calcio en el tanque de almacenamiento, una vez en la mañana, por lo que el agua recibe solo una vez al día este tratamiento. Esta práctica implica que el agua suministrada a los usuarios durante gran parte del día, no está libre de microorganismos, lo que representa riesgos en la salud y resalta la importancia de tener en funcionamiento los dosificadores y la planta en general.

Ilustración 10 a) Punto de dosificación de cloro b) hipoclorito de calcio



Fuente. Autores

4.2.6.2 Tanque de almacenamiento

El tanque 1 es el tanque de almacenamiento de la planta de tratamiento y tiene unas dimensiones de 6 m de longitud por 6 m de ancho por 3.82 m de fondo, teniendo así una capacidad total de 137,5 m³. Es un tanque en concreto, rectangular, cerrado con una tapa y escalera de acceso a su interior, como se observa en la ilustración 11 y Como se observa en el plano general de la planta de tratamiento Anexo 10, este tanque se encuentra debajo del cuarto de operación. Es el encargado de servir a más de la mitad de los usuarios con un total de 129 usuarios entre abrevaderos, fincas y casas. [3]

Ilustración 11. a) Tanque de almacenamiento b) Acceso a tanque



Fuente: Autores

4.3 Evaluación del sistema de tratamiento

Como se mencionó anteriormente, la Asociación de Usuarios del Acueducto El Tobal no cuenta con información relacionada a los cálculos de diseño de la planta de tratamiento y la proyección usada para su construcción, por lo que fue necesario realizar estos cálculos para posteriormente identificar aspectos críticos en el funcionamiento operativo de la planta. Cabe resaltar que durante el periodo de desarrollo de este proyecto la planta no estaba en funcionamiento, por lo que el agua únicamente ingresaba al tanque de almacenamiento para su posterior distribución. En este sentido y ante la imposibilidad de efectuar aforos del caudal de entrada a la planta se decidió adoptar como dato inicial, para la evaluación del diseño, el caudal máximo establecido en la concesión de aguas para el acueducto El Tobal que corresponde a 1,9 L/s. Este resultado será contrastado más adelante con las estimaciones de demanda y cálculos de caudal para realizar el correspondiente análisis, pero por ahora se toma este considerándolo el máximo a tratar de acuerdo con la concesión de la Corporación Autónoma Regional CAR.

4.3.1 Aireador

Para el aireador se estimaron los cálculos de tiempo de aireación, lámina de agua en bandeja, carga hidráulica superficial y el caudal máximo con el que puede trabajar la unidad.

$$\text{tiempo de aireación} = n \sqrt{\frac{2h}{g}} = 4 \sqrt{\frac{2(0,32\text{m})}{9,81\text{m/s}^2}} = 1,02 \text{ s}$$

[4]

Donde n = número de bandejas y h = separación entre bandejas.

Se determinó que el tiempo de aireación es de 1,02 s, que hace referencia al tiempo en que el agua está en contacto directo con el aire durante su paso por este proceso, cumpliendo con lo estipulado por el Ras, título C que índice que este tiempo debe ser mayor a 1 segundo.

$$\text{lámina de agua en la bandeja} = \frac{\left(\frac{Q_o}{CdAo}\right)^2}{2g}$$

[4]

Donde Qo = caudal por orificio; Cd = coeficiente de descarga y Ao = área de un orificio.

$$Q_o = \frac{Q}{\text{número de orificios}} = \frac{0,0019 \text{ m}^3/\text{s}}{77} = 2,47 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

[4]

$$A_o = \pi r^2 = \pi(0,0075 \text{ m})^2 = 1,77 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{lámina de agua en la bandeja} = \frac{\left(\frac{2,47 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{0,85 (1,77 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}\right)^2}{2 (9,81 \text{ m/s}^2)} = 1,37 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,137 \text{ cm}$$

Según el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS, en el título C, Los aireadores de bandejas de coque deben diseñarse teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- El número de bandejas de coque debe estar entre 3 y 5.
- El espaciamiento entre las bandejas debe estar entre 0,3 m a 0,75 m.
- La profundidad del agua en la bandeja debe ser de aproximadamente 0,15m
- El lecho de coque tiene que tener un espesor de 0,15 m a 0,3 m.

De acuerdo a los parámetros anteriormente mencionados, el aireador de la planta de tratamiento de agua potable de la vereda El Tobar, no cumple con el espesor del lecho

de coque y la profundidad del agua en la bandeja, debido a que con las mediciones y cálculos realizados que se observan en las tablas 7 y 8, el aireador está conformado por 4 bandejas con un espaciamiento entre ellas de 0,32 m. En la tabla 8 se observa el cálculo realizado del caudal que pasa por cada orificio es $2,47 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y se determinó que la lámina de agua en bandeja es de 0,1375 cm, lo que es explicado por el caudal tan pequeño usado por la planta.

$$Carga\ hidr\acute{a}ulica = \frac{Q}{A_{total}} = \frac{164,16 \text{ m}^3/\text{día}}{1,77 \text{ m}^2} = 92,8 \text{ m/día}$$

[4]

$$Q_{m\acute{a}x} = (Carga\ m\acute{a}x) (A_{total}) = (1500 \text{ m/día})(1,77 \text{ m}^2) = 2655 \text{ m}^3/\text{día} = 30,7 \text{ L/s}$$

Según la actualización del RAS en la resolución 1096 de 2016, la carga hidráulica que deben manejar los aireadores de bandeja debe estar entre 500 y 1500 m/día, con estos datos se calculó el caudal máximo que podría trabajar el aireador cuyo resultado fue 30,7 L/s, actualmente la planta trata un caudal de 1,9 L/s trabajando con una carga de 92,81 m/día, la cual está trabajando muy por debajo de su capacidad, concluyendo así, que esta unidad fue sobredimensionada a la hora de ser construida y por tanto podrá trabajar durante mucho tiempo sin perjuicio en la calidad del agua.

4.3.2 Floculador

Para el floculador fue requerido estimar el cálculo de tiempo de retención

$$tiempo\ de\ retenci\acute{o}n = \frac{V}{Q} = \frac{1,5 \text{ m}^3}{0,0019 \text{ m}^3/\text{s}} = 789 \text{ s} = 13,2 \text{ min}$$

[4]

Se determinó que el tiempo de retención es de 13,2 min, Según la actualización del RAS en la resolución 1096 del presente año, el tiempo de retención puede estar entre 20 y 40 minutos, por lo tanto la unidad no cumple con lo estipulado en la norma, ya que esta es una planta compacta, donde el caudal que es de 1,9 L/s, por lo que no requiere de tanto tiempo para realizar el proceso de floculación.

4.3.3 Sedimentador

Para el sedimentador fue requerido estimar los cálculos de velocidad de sedimentación crítica, longitud relativa útil, los cuales se observan a continuación:

$$v_o = \frac{Q}{(Asedimentación acelerada) (Sen \theta)} = \frac{0,0019 \text{ m}^3/s}{(4,8 \text{ m}^2) (Sen 58^\circ)} = 4,67 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

[13]

$$v_{sc} = \frac{v_o}{Sen \theta + L Cos \theta}$$

[13]

$$L = \frac{l}{e} - 0,013 NRe = \frac{64 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} - 0,013 (154,5) = 10,8$$

[13]

$$v_{sc} = \frac{4,67 \times 10^{-4} \text{ m/s}}{Sen 58^\circ + ((10,8)(Cos 58^\circ))} = 1,06 \times 10^{-3} \text{ m/s} = 0,107 \text{ cm/s}$$

$$Tiempo de retención = \frac{\left(\frac{l}{100}\right)}{v_o \times 60} = \frac{\left(\frac{64 \text{ cm}}{100 \text{ cm}}\right)}{((4,67 \times 10^{-4} \text{ m/s}) (60 \text{ s}))} = 22,85 \text{ min}$$

$$Carga superficial = \frac{(Q)(86400 \text{ s})}{A} = \frac{(0,0019 \text{ m}^3/s)(86400 \text{ s})}{4,8 \text{ m}^2} = 34,2 \text{ m/día}$$

Donde v_o = velocidad de flujo; v_{sc} = velocidad de sedimentación crítica; L = longitud relativa.

Se determinó la carga superficial del sedimentador de 34,2 m/día, Según la actualización del RAS en la resolución 1096 del presente año, la carga superficial para sedimentadores de alta tasa de módulos angostos puede estar entre 120 y 180 m/día, por lo tanto la unidad no cumple con lo estipulado en la norma, ya que este valor depende directamente del caudal de la planta, siendo este muy bajo para cumplir con la carga hidráulica que exige la norma.

$$Longitud util = l - ((k1)(NRe)) = 64 \text{ cm} - ((0,058)(154,5)) = 55,04 \text{ cm}$$

[13]

En la tabla anterior se calculó la longitud relativa útil, que hace referencia a la parte de las placas de sedimentación que actúa sin ningún tipo de turbulencia por la entrada

del agua, las placas tienen una longitud total de 64 cm pero su longitud relativa útil es de 55.04 cm, donde se realiza efectivamente su función de retener partículas, para obtener un mejor resultado, fue utilizado como factor de corrección el número de Reynolds, según lo estipulado en el manual de potabilización de agua de Jorge Arturo Pérez Parra; Según la actualización del RAS en la resolución 1096 del presente año y el título C, del RAS, los sedimentadores de alta tasa deben diseñarse teniendo en cuenta los siguientes parámetros

- El tiempo de retención hidráulica debe estar entre 10 min y 20 min.
- La profundidad del tanque debe estar entre 4 m y 5.5 m.
- La carga superficial de la unidad debe estar entre 120 y 180 m/día
- La velocidad crítica de sedimentación debe estar entre 15 y 30 cm/s

De acuerdo con los parámetros anteriormente mencionados, el diseño del sedimentador de la planta de agua potable de la vereda El Tobal, se diseñó con el fin de facilitar el cambio de placas, con respecto al tiempo de retención hidráulica, la planta se encuentra trabajando con un tiempo mayor al estipulado por norma con un valor de 22,85 min, por lo que asegura la remoción de partículas de menor tamaño. La profundidad del tanque es de 2,45 m, por lo que no cumple con el parámetro, la carga superficial y velocidad crítica de sedimentación como anteriormente se nombra, no cumple con los parámetros mencionados por el caudal tan pequeño con que trabaja la planta actualmente.

4.3.4 Filtro

Para determinar las condiciones de operación del filtro se determinó la velocidad de filtración a partir del caudal (1,9 L/s) y el área de filtración.

$$v_f = \frac{Q}{A_f} = \frac{164,16 \text{ m}^3/\text{día}}{2,27 \text{ m}^2} = 72,32 \text{ m/día}$$

[13]

Como no fue posible obtener datos del interior del filtro, ya que no es posible tomarlos directamente en la unidad y la asociación de usuarios del acueducto no cuenta con esta información, solo se calculó la velocidad de filtración ya que depende del tamaño de la unidad y el caudal, su resultado fue de 72,32 m/día; de acuerdo con el RAS, la

tasa de filtración para filtros rápidos con lecho simple debe ser menor a 120 m/día, por lo tanto la planta cumple con la tasa de filtración.

4.3.5 Tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento presenta una capacidad total de 137 m³ lo que permite garantizar un tiempo aproximado de hasta 20 horas continuas en la prestación del servicio ante un evento de parada de planta por mantenimiento general o algún daño que afecte directamente el sistema de tratamiento del agua.

4.3.6 Análisis de materiales y estructuras

La planta de tratamiento se encuentra fabricada en un alto porcentaje en fibra de vidrio que garantiza unas condiciones de uso adecuadas. En este caso la fibra de vidrio le confiere a la unidad una alta resistencia mecánica, así como una mayor durabilidad que extiende el ciclo de vida de la planta de forma significativa más allá de lo que ofrecen otros materiales. En este caso la planta se caracteriza por la ausencia de corrosión en su estructura, que se explica por la alta resistencia química que ofrece la fibra de vidrio aún en condiciones de intemperie, reduciendo significativamente las labores de limpieza y mantenimiento necesarias sobre la superficie de la fibra. Así mismo la fibra de vidrio confiere estabilidad dimensional a las distintas unidades de la planta de tal manera que cumple con los requerimientos propios establecidos en el artículo A.3.4. del Decreto 33 de 1998 sobre diseño estructural. Se podría suponer de forma preliminar que la estructura de la planta garantiza resistencia y rigidez adecuada para soportar las cargas durante la operación normal de la planta.

En el caso del tanque de almacenamiento, éste se encuentra construido en concreto simple que garantiza alta resistencia a fuerzas de compresión y no presenta ninguna señal de agrietamiento o fuga que puedan ser objeto de intervención.

Las tuberías utilizadas para el transporte del agua entre las distintas unidades de la planta corresponden a tubería en PVC que ofrece un material inerte y se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión. Además, al material se le confieren características de resistencia, flexibilidad y durabilidad. Como característica adicional estas tuberías en PVC disminuyen las pérdidas por fricción y además no generan ningún sabor u olor en el agua.

4.4 Identificación de aspectos críticos en la PTAP

4.4.1 Aspectos generales

- **Sistemas de información.** Se identificó como aspecto crítico la falta de información del diseño de la planta, ya que solo tienen información proporcionada por la tesis de grado “Apoyo en la rehabilitación del sistema de acueducto de la vereda el Tobal, municipio de Subachoque, Cundinamarca” realizado Juan Pablo Arredondo González y Gustavo Adolfo Fuentes Solano, egresados de la Universidad Santo Tomas, de la facultad ingeniería civil; cuyo objetivo fue realizar un diagnóstico inicial del sistema de abastecimiento, que incluía captación del agua y redes de distribución principalmente. En este estudio se realizó un análisis básico de la calidad del agua y con base en ello se dio una serie de recomendaciones para el funcionamiento del sistema sin determinar acciones concretas que permitieran el buen uso y adecuación de las instalaciones de la planta de tratamiento por lo cual el sistema continuó entregando agua cruda a sus usuarios. Este primer acercamiento efectuado en el proyecto de Arredondo y Fuentes generó como productos principales un plano general de la planta de tratamiento, plano de la red de distribución y los perfiles hidráulicos. Otro aspecto crítico identificado, es el manejo de la base de datos sobre la población abastecida y las mediciones de suministro de agua a la población, ya que la base de datos presenta información que no es clara y carece de datos.
- **Sobredimensionamiento.** Al realizar los cálculos sobre las unidades de la planta, se identificó que la planta está sobredimensionada. Esto se identifica como aspecto crítico, debido a que la planta está diseñada para tratar una carga hidráulica entre 500 y 1500 m/día, y esta trabaja con una carga hidráulica de 92,81m/día, esto pudo ser generado por errores en los cálculos de la proyección para el diseño de las unidades por lo que fue construida una planta muy grande para abastecer una población muy pequeña, generando costos innecesarios en la instalación de ésta.
- **Bombeo.** Como la planta no se encuentra en funcionamiento el agua es enviada directamente del tanque de bombeo al tanque de almacenamiento para su posterior distribución; esta bomba actualmente funciona intermitentemente debido a que en algunas ocasiones el agua no llega o llega con baja presión al tanque de bombeo y se requieren tiempos de llenado de este tanque para abastecer de forma satisfactoria el tanque de almacenamiento desde el cual se realiza la distribución.

- **Aforo de caudal.** La planta no cuenta actualmente con un sistema de medición de caudal a la entrada ni a la salida de la planta.

- **Control de calidad del agua**

En las instalaciones de la planta de tratamiento no se cuenta con un laboratorio ni con los equipos necesarios para realizar las mediciones de los parámetros básicos establecidos en la norma. Esto es importante para realizar un control continuo de los parámetros de calidad del agua que pueden afectar la operación y ajustar la dosificación de coagulante e hipoclorito.

- **Control de operación y mantenimiento**

El inadecuado manejo operacional de la planta es identificado como aspecto crítico, ya que la planta cuenta con una persona que es la encargada del manejo operacional de la planta, esta persona es la que realiza, la limpieza de unidades y la dosificación manual de cloro y coagulante, no cuenta con un manual operacional de cada unidad.

4.4.2 Aireación

- **Lecho de carbón.** Como aspecto crítico identificado se encuentra el carbón utilizado en la operación unitaria de aireación, ya que éste se encuentra en mal estado, debido a la presencia de comunidades biológicas (capa de musgo), que alteran la eficiencia del proceso de oxidación.

4.4.3 Coagulación

- **Coagulante.** Actualmente no se está dosificando coagulante, debido a que éste se encuentra vencido y no se ha comprado producto nuevo para aplicar, alterando el objetivo del proceso posterior (sedimentación) al no darse la formación de floc. El agua pasa por el sedimentador sin cumplir su función de retirar las partículas sedimentables que son las de mayor tamaño y esto a su vez afecta directamente la filtración incrementando las frecuencias de lavado y disminuyendo el periodo de utilidad del lecho filtrante

4.4.4 Sedimentación

- **Módulos de sedimentación laminar.** En la revisión del estado de las láminas se evidencia su mal estado debido al deterioro dado por el transcurso del tiempo, algunas de las láminas se encuentran rotas afectando la eficiencia del sedimentador en términos de eficiencia. También se evidencia que las placas se encuentran en direcciones distintas lo que genera una distribución no equitativa del flujo en el sedimentador.

4.4.5. Filtración

El filtro de la planta de tratamiento de agua potable de la vereda El Tobal, requiere mantenimiento debido a que éste se encuentra en condiciones no adecuadas de uso. Durante el tiempo que lleva la planta sin funcionamiento se ha mantenido con agua estancada y se evidencia presencia de algas y otras comunidades biológicas por lo que se requiere de limpieza completa de la unidad. Entre otras cosas esto es generado por la acumulación de material orgánico (hojas de los arboles) que cae en la unidad de tratamiento. Otro aspecto crítico corresponde al estado del lecho filtrante por la falta de información que permita reconocer su condición.

4.4.6. Desinfección

Los dosificadores de cloro no están en funcionamiento, por lo tanto la persona encargada del manejo de la planta realiza las dosificaciones manualmente, por lo que no es constante su aplicación, pasando una gran cantidad de agua sin haber sido desinfectada.

4.5 Proyección de población y estimación de caudales

4.5.1 Proyección de población (Método aritmético)

Para realizar la proyección de los cálculos de dotación y demanda según lo establecido en la resolución 2320 del 2009 y el RAS título B, se definió según el tamaño de la población atendida que el nivel de complejidad del sistema es bajo y con esto se estableció como periodo de proyección 25 años según la siguiente tabla:

Tabla 4 Periodo de diseño según nivel de complejidad

Nivel de Complejidad del Sistema	Período de diseño máximo
Bajo, Medio y Medio alto	25 años
Alto	30 años

Fuente: Resolución 2320 del 2009

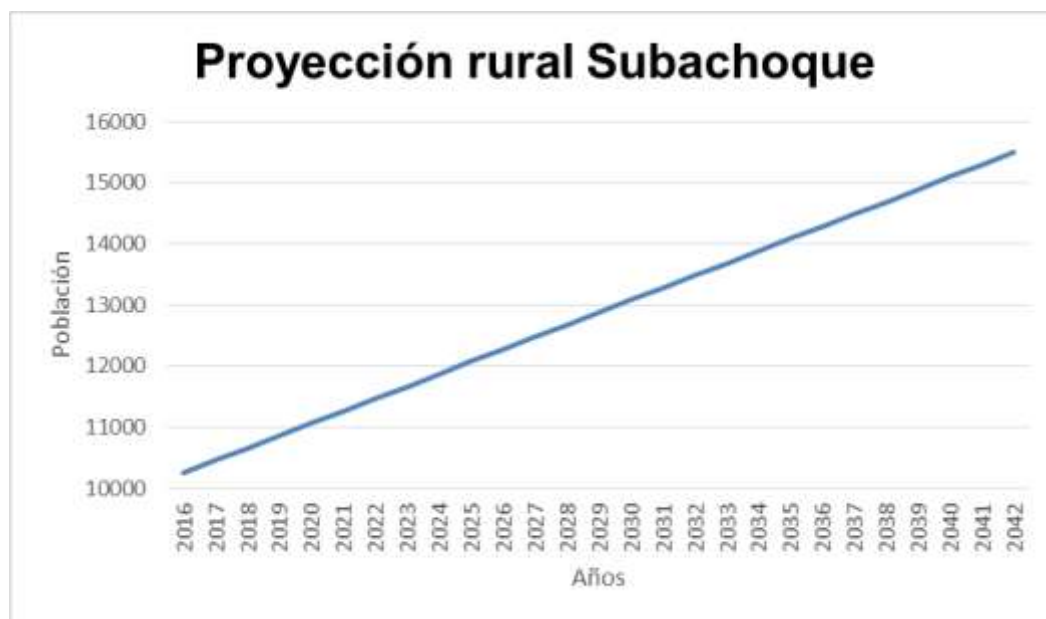
Posteriormente para estimar el caudal medio diario, caudal máximo diario y caudal máximo horario proyectados en el periodo de diseño, y considerando la ausencia de datos censales para la vereda, fue necesario realizar la proyección de la población rural de Subachoque para definir tasas de crecimiento y asociar un crecimiento similar entre la población de la vereda y la población rural del municipio. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 5. Proyección de población rural de Subachoque

Proyección (rural)		2029	12.878
2016	10.258	2030	13.080
2017	10.459	2031	13.282
2018	10.661	2032	13.483
2019	10.862	2033	13.685
2020	11.064	2034	13.886
2021	11.266	2035	14.088
2022	11.467	2036	14.290
2023	11.669	2037	14.491
2024	11.870	2038	14.693
2025	12.072	2039	14.894
2026	12.274	2040	15.096
2027	12.475	2041	15.298
2028	12.677	2042	15.499

Fuente: Autores.

Grafica 1. Proyección rural de Subachoque.



Fuente: Autores.

Se consideró que la población rural de la vereda el Tobal tiene un comportamiento similar a la población rural del municipio; los cálculos de proyección de la población rural de Subachoque, se estimaron mediante la ecuación del método aritmético que supone un crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad y la emigración., tomando el 2005 como año del censo inicial y un dato del DANE del año 2015, para un periodo de evaluación de 25 años comenzando desde el año 2017. Con los cálculos realizados se determinó que la tasa de crecimiento es 2,3%, llegando a un valor de 15.499 personas para la proyección estimada en el año 2042.

4.5.2 Estimaciones de demanda

Posteriormente se calculó la demanda de agua y su proyección, comprendido por el caudal medio diario (Qmd), caudal máximo diario (QMD) y el caudal máximo horario (QMH), siendo este último el más importante ya que hace referencia al máximo consumo de agua durante una hora en un día que puede llegar a ser más del doble del caudal medio diario por lo que es de vital importancia contar con un caudal capaz de abastecer esta demanda. Estos caudales fueron estimados mediante el siguiente procedimiento:

- Caudal medio diario (Qmd): Este caudal fue calculado mediante la siguiente ecuación

$$Q_{md} = \frac{Poblacion \times Dotacion\ bruta}{86400}$$

[17]

Para el año 2017 los cálculos de población fueron estimados a partir de los 197 puntos de abastecimiento actual de la vereda, registrados en la base de datos de la asociación de usuarios del acueducto, se toma como referencia un aproximado de 4 personas por cada punto de Servicio y una dotación bruta por persona de 90 L/día, quedando de la siguiente forma:

$$Q_{md} = \frac{(197 \times 4) \times 90l/dia}{86400\ s}$$

$$Q_{md} = 0,82\ l/s$$

- Caudal máximo diario: Se calculó a partir del caudal medio diario con la siguiente ecuación

$$QMD = Q_{md} \times K1$$

[17]

Tomando como el coeficiente de consumo máximo diario K1 el valor de 1,3 estipulado por el RAS, Título B; obteniendo el siguiente resultado para el año 2017:

$$QMD = 0,82\ l/s \times 1,3$$

$$QMD = 1,07\ l/s$$

- Caudal máximo horario (QMH): Se calculó a partir del caudal máximo diario con la siguiente ecuación

$$QHM = QMD \times K2$$

[17]

Tomando como el coeficiente de consumo máximo diario K2 el valor de 1,7 estipulado por el RAS, Título B dadas las características locales del sistema de abastecimiento; obteniendo el siguiente resultado para el año 2017:

$$QMD = 1,07 \text{ l/s} \times 1,7$$

$$QMD = 1,81 \text{ l/s}$$

Para determinar con precisión el valor de K1 y K2 es necesario tener el mayor consumo horario, diario y el consumo medio diario registrados en un periodo mínimo de 1 año, pero la base de datos de los consumos de los usuarios no cuenta con estos datos. Por ello se adoptaron los valores recomendados para sistemas de tratamiento nuevos estipulados por el Ras título B; es decir, K1=1,3 y K2 =1,7.

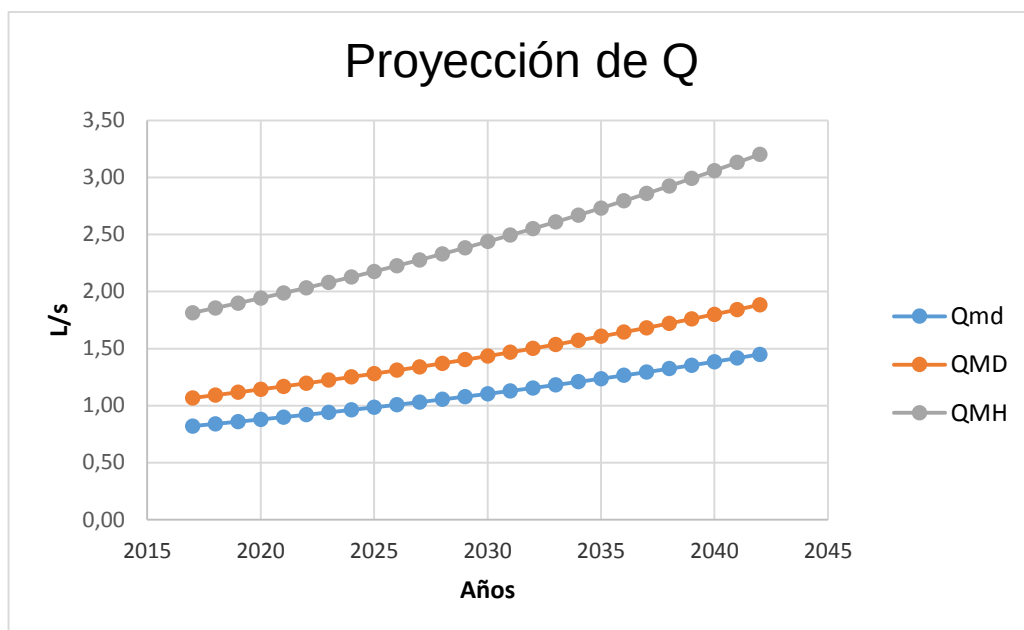
Posteriormente para el cálculo proyectado a un periodo de evaluación de 25 años, iniciando desde el 2017 se tomó un aumento para cada caudal de 2.3% cada año, en la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 6. Proyección de demanda de consumo de agua en la vereda El Tobal

Proyección de consumos (L/s)			
Año	Qmd	QMD	QMH
2017	0,82	1,07	1,81
2018	0,84	1,09	1,86
2019	0,86	1,12	1,90
2020	0,88	1,14	1,94
2021	0,90	1,17	1,99
2022	0,92	1,20	2,03
2023	0,94	1,22	2,08
2024	0,96	1,25	2,13
2025	0,98	1,28	2,18
2026	1,01	1,31	2,23
2027	1,03	1,34	2,2
2028	1,05	1,37	2,33
2029	1,08	1,40	2,38
2030	1,10	1,43	2,44
2031	1,13	1,47	2,49
2032	1,15	1,50	2,55
2033	1,18	1,54	2,61
2034	1,21	1,57	2,67
2035	1,24	1,61	2,73
2036	1,26	1,64	2,79
2037	1,29	1,68	2,86
2038	1,32	1,72	2,92
2039	1,35	1,76	2,99
2040	1,38	1,80	3,06
2041	1,42	1,84	3,13
2042	1,45	1,88	3,20

Fuente: Autores.

Grafica 2. Proyección de demanda de consumo de agua en la vereda El Tobal



Fuente: Autores.

Partiendo de la premisa de que la concesión otorga un caudal de 1.9 L/s, en principio con los resultados del caudal medio diario y el caudal máximo diario pueden ser abastecidos por el caudal concesionado, en cuanto al caudal máximo horario el caudal concesionado podrá abastecer hasta el 2019, por lo tanto será necesario para el acueducto pedir un aumento en el caudal de la concesión en dicho año, que según la proyección realizada para el año 2042 se requerirá un caudal concesionado de aproximadamente 3,2 L/s.

4.6 Cálculos hidráulicos con el caudal proyectado

Para los cálculos de las condiciones hidráulicas de cada unidad, fue utilizado el caudal proyectado para el año 2042 que es 3,2 L/s, con el fin de identificar la variación de las condiciones y la necesidad de implementar una propuesta de ampliación en el largo plazo.

4.6.1 Aireador

Para el aireador se calculó lámina de agua en bandeja y caudal por orificio para el caudal proyectado a un periodo de 25 años

Tabla 7. Cálculos hidráulicos – Aireador

Criterios del aireador	
Q	3,2 L/s
Altura del agua en la bandeja ha	0,3902 cm
Carga hidráulica	156 m/día

Fuente: Autores

Para el caudal proyectado el aireador no cumplirá aun con la profundidad del agua en la bandeja teniendo un valor de 0,3902 cm, puesto que este caudal seguirá siendo muy bajo con respecto al que puede soportar el aireador que es de 30,7 L/s.

4.6.2 Floculador

Tabla 8. Cálculos hidráulicos – Floculador

Criterios del floculador	
Q	3,2 L/s
Tiempo de retención	7,8 min

Fuente: Autores

4.6.3 Sedimentador

Para el sedimentador se calculó la velocidad de sedimentación crítica, la carga superficial y tiempo de retención hidráulica para el caudal proyectado a un periodo de 25 años

Tabla 9. Cálculos hidráulicos - Sedimentador

Velocidad de sedimentación crítica	
Q (L/s)	3,20
Vo (m/s)	7,86E-04
Vsc (m/s)	1,8E-03
tiempo (min)	13,57
Carga superficial (m/día)	57,6

Fuente: Autores

Se determinó que la carga superficial del sedimentador es de 57,6 m/día, encontrándose aún por debajo de lo estipulado en la actualización del RAS en la resolución 1096 del presente año que es 120 y 180 m/día, ya que este valor depende directamente del caudal de la planta y este sigue siendo muy bajo, con respecto al tiempo de retención hidráulica, la planta trabajara con un tiempo de 13,57 min, estando dentro del rango estipulado por la norma de 10 a 20 min, por lo que aún se asegurara la remoción de partículas. La cercanía al límite inferior del rango estipulado por el RAS no representa ningún problema en el funcionamiento del sedimentador, por lo que esto se puede explicar, según la fecha de construcción de la planta, ya que esta fue en el año 2010 donde el periodo de diseño utilizado fue proyectado hasta el 2035, en el presente estudio se está trabajando un periodo de evaluación hasta el 2042 por lo que las condiciones hidráulicas ya pueden verse afectadas y requerir de optimización.

4.6.4 Filtro

Para el filtro se calculó la velocidad de filtración para el caudal proyectado en un periodo de evaluación de 25 años.

Tabla 10. Cálculos hidráulicos - Filtro

Filtro	
Q	0,0032 L/s
Vf	121,8 L/s

Fuente: Autores

La velocidad de filtración será de 121,8 m/día; de acuerdo con RAS, la tasa de filtración para filtros rápidos con lecho simple debe ser menor a 120 m/día, por lo tanto la planta sobrepasa ligeramente este máximo pero con esta tasa de filtración no hay ninguna afectación en su operación y funcionamiento puesto que en términos generales un filtro puede trabajar tasas hasta de 360 m/día.

4.7 Estudios de tratabilidad

Según los resultados de las pruebas de laboratorio de la Quebrada El Salitre, que fueron obtenidos en la recolección de información, se pueden observar que los parámetros que presentan problemas son la turbiedad y la concentración de hierro, estando por encima de lo permitido por la resolución 2115 de 2007. Los altos niveles de turbiedad pudo ser generada por los sedimentos [18] provenientes de la carretera que caen a la quebrada y por la intervención de las actividades antropogénicas de la zona (agricultura y ganadería), y la concentración de hierro, pudo ser provocado por la disolución de rocas y minerales, ya que se genera en el momento que las corrientes de aguas superficiales, pluviales o subterráneas entran en contacto con los suelos [19] [14]. Por último y de mayor importancia para la seguridad hídrica, se encontró que hay presencia de coliformes totales y E. Coli, indicando que el cuerpo de agua ha sido o está contaminado con materia orgánica de origen fecal, ya sea por humanos o animales [18]; resaltando la importancia que tiene la planta para que realice el debido tratamiento al agua desatancándose dentro de este la desinfección y de igual forma la necesidad de un plan de optimización.

4.7.1 Dosis óptima de coagulante

Con el objeto de establecer las condiciones óptimas para desarrollar la clarificación del agua a través del uso de coagulantes, se realizaron nueve (9) ensayos de jarras, en los cuales se simulaban las condiciones reales de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación; para ello se efectuaron diferentes pruebas hasta obtener las condiciones óptimas de operación.

Para el test de jarras fue necesario tomar muestras representativas de agua en días diferentes, con el fin de observar las variaciones de turbiedad y pH que tiene el agua que ingresa a la planta cuando hay ausencia o no de precipitaciones en esta zona, ya que éstas pueden alterar las características físico-químicas del agua debido al arrastre de sedimentos.

Para realizar el análisis de las muestras fue necesario tomarlas 24 horas antes de sus análisis, esto se realiza con el fin de que el agua no pierda sus propiedades físicas y químicas que serán analizadas. Para el inicio de la prueba se prepararon 3 soluciones de diferentes coagulantes al 1%. El procedimiento fue el siguiente:

Se utilizaron 3 balones aforados de 100, 200 y 500 mL cada uno. Para el balón aforado de 100 ml se agregó 1 gr de clorhidroxido de aluminio y 100ml de agua destilada, para el balón aforado de 200 ml se agregó 2 gr de sulfato de aluminio tipo A y 200 ml de agua destilada, y para el balón aforado de 500 se agregó 5 gr de cloruro férrico y 500 ml de agua destilada. Seguido de estos, se realizaron las mediciones de pH y turbidez a la muestra de agua.

Para realizar los ensayos de jarras se adelantó el siguiente procedimiento:

1. Se agregó 1 L de agua a cada vaso de precipitado
2. Previamente se elige el coagulante y se especifican las dosis que serán añadidas en cada jarra
3. Se ajusta el equipo de jarras para una velocidad de agitación de 100 RPM
4. mezcla rápida 1 minuto a 100 RPM.
5. Mezcla lenta por 20 min a 40 RPM
6. Sedimentación durante 20 minutos.
7. Al finalizar la sedimentación se evalúa la eficiencia de cada jarra en función del tamaño del floc producido y se realizan las mediciones de pH y turbiedad remanente.

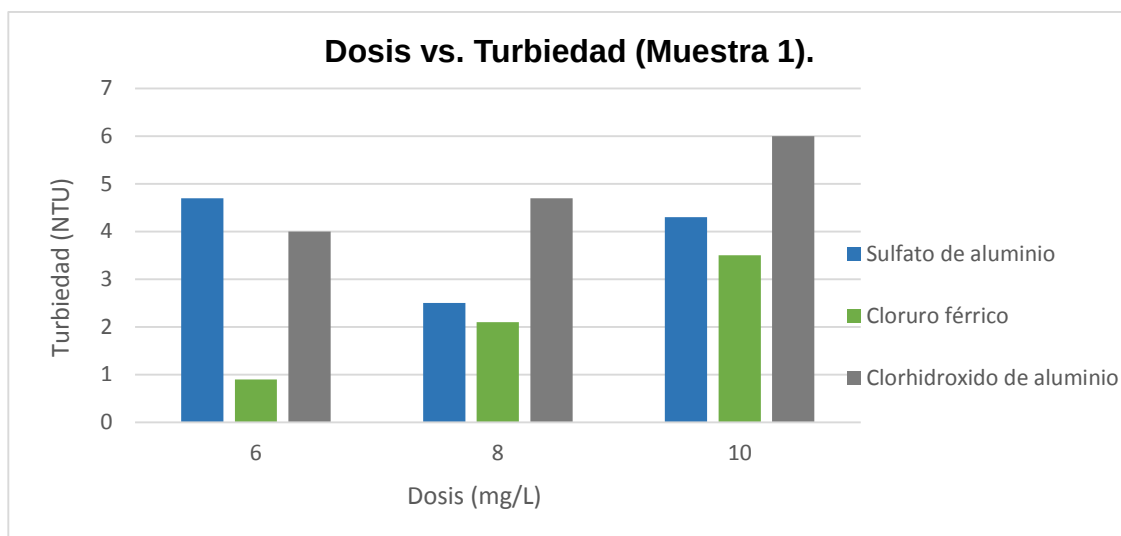
Para los análisis de la primera muestra de agua la medición de pH inicial fue de 6,5 y turbiedad inicial de 6,34 NTU, posteriormente se realizó el test de jarras a partir del cual se obtuvo la siguiente tabla de resultados:

Tabla 11. Resultados del test de jarras muestra 1.

Coagulante	Jarras	Dosis (mg/L)	pH final	Turbi final (NTU)
Sulfato de aluminio	J1	6	6,72	4,7
	J2	8	6,37	2,5
	J3	10	6,61	4,3
Cloruro férrico	J1	6	6,41	0,9
	J2	8	6,33	2,1
	J3	10	6,36	3,5
clorhidroxido de aluminio	J1	6	6,34	4
	J2	8	6,67	4,7
	J3	10	6,52	6

Fuente: Autores.

Grafica 3. Resultados del test de jarras muestra 1.



Fuente: Autores.

Para realizar la pruebas del test de jarras, fueron necesarios 3 ensayos para escoger el coagulante óptimo. Se utilizaron 2 floculadores con el fin de observar los 3 coagulantes al mismo tiempo e identificar las diferencias. Cada ensayo estaba constituido por 3 vasos de precipitado con 1 L de agua, donde a cada uno se añadió una dosis específica de coagulante como se observa en la tabla 1.

En la tabla 10 y grafico 3, se identificó que el coagulante óptimo es el cloruro férrico, ya que se observaron los mejores resultados con respecto al tamaño y cantidad de floc, la disminución de la turbiedad en el agua después de los 20 minutos de sedimentación, fue favorable y cumple con la normatividad vigente, mientras que en el ensayo con sulfato de aluminio hubo formación de floc, pero en menor tamaño y cantidad con respecto al cloruro férrico, de igual forma la turbiedad disminuyo pero no cumple con la norma y quedaban partículas suspendidas después de la sedimentación. El ensayo con clorhidroxido de aluminio fue el menos favorable debido a que el floc formado era muy pequeño por lo que después de la sedimentación este no precipito, quedando suspendido y bajando muy poco los niveles de turbiedad.

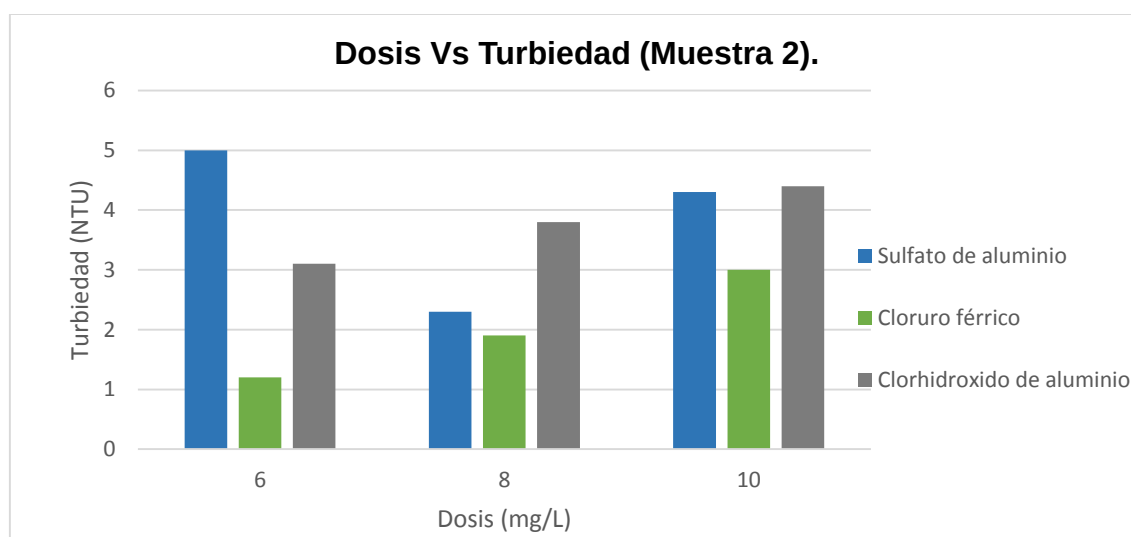
La segunda muestra de agua fue tomada un mes después de la primera toma de la muestra, la medición de pH inicial fue de 6,34 y turbiedad inicial de 6,87 NTU, posteriormente se realiza el test de jarras donde se obtiene la siguiente tabla de resultados:

Tabla 12. Resultados del test de jarras muestra 2

Coagulante	Jarras	Dosis (mg/L)	pH final	Turbi final (NTU)
Sulfato de aluminio	J1	6	6,74	5
	J2	8	6,53	2,3
	J3	10	6,67	4,3
Cloruro férrico	J1	6	6,38	1,2
	J2	8	6,47	1,9
	J3	10	6,53	3
Clorhidroxido de aluminio	J1	6	6,06	3,1
	J2	8	6,65	3,8
	J3	10	6,52	4,4

Fuente: Autores.

Grafica 4. Resultados del test de jarras muestra 2.



Fuente: Autores.

Ilustración 12. Jarras con 6 mg/l de coagulante



Fuente: Autores

En la imagen 10, en la jarra de la derecha había presencia de clorhidroxido de aluminio, donde no se observó formación de floc, en la jarra del centro había cloruro férrico, donde se observa gran formación de floc y en la jarra de la izquierda hubo poca formación de floc con sulfato de aluminio.

Ilustración 13. Jarra con cloruro férrico.



Fuente: Autores

Para realizar la pruebas del test de jarras, se hicieron 3 ensayos con los mismos coagulantes para verificar los resultados obtenidos con la muestra 1.

En la tabla 12 y grafico 4, se pudo identificar que el coagulante que presentó mejores resultados es el cloruro férrico como también se observó en la tabla 1, en este ensayo se observa que con la dosis de 6 mg/l coagulante la turbiedad es de 1,2, mientras que en los resultados de la tabla 1 con la misma dosis y el mismo coagulante la turbiedad es de 0,9, por lo tanto cumple con la normativa vigente. En cuanto al tamaño y cantidad del floc, este también presenta los mejores resultados como se observa en la imagen 7. Con respecto al ensayo con sulfato de aluminio la turbiedad de la muestra de agua disminuye considerablemente con la adición de 8 mg/l de coagulante, pero no alcanza a cumplir con la normativa, el floc en este ensayo se formó en menor cantidad y tamaño con respecto al cloruro férrico, por lo que quedaron gran cantidad de partículas suspendidas como también se observaba en los resultados obtenidos con la muestra 1. El ensayo con clorhidroxido de aluminio fue el menos favorable para las dos muestras de agua, ya que en los resultados obtenidos la turbiedad resultante era la más alta con respecto a los otros coagulantes, el floc formado era muy pequeño por lo que después de la sedimentación este no precipito, quedando suspendido y así disminuyendo muy poco los niveles de turbiedad.

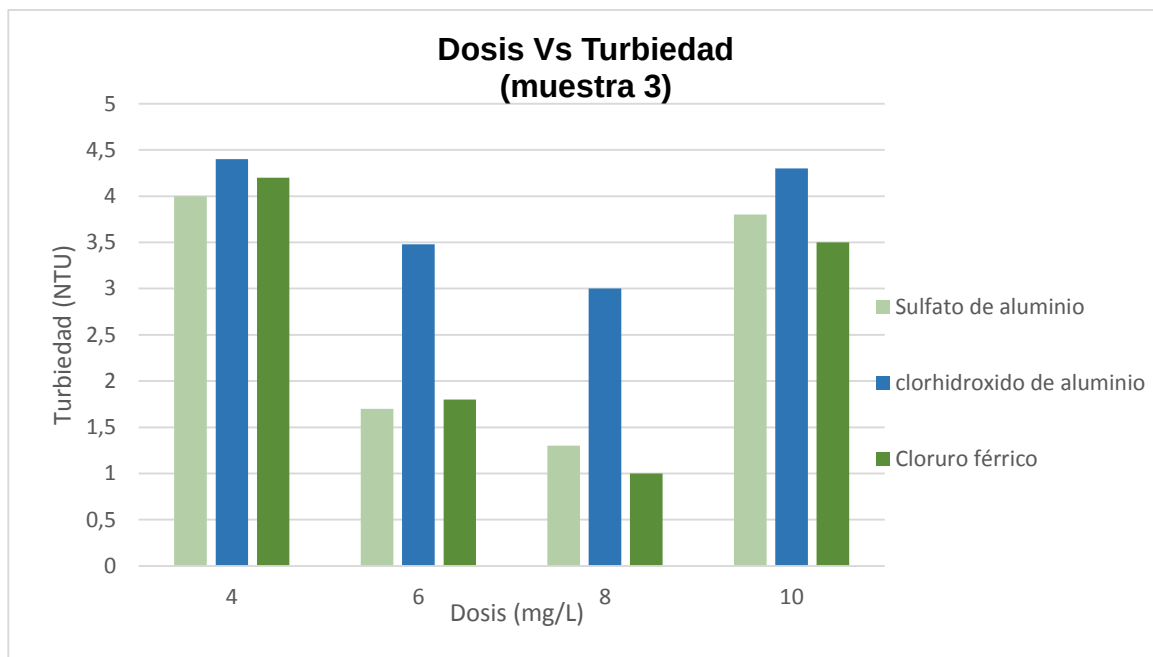
La tercera muestra de agua fue tomada dos semanas después de la segunda toma de la muestra, ya que durante este periodo se presentaron eventos de precipitación, por lo que se podrían haber alterado los parámetros iniciales del agua y se requería observar el comportamiento de los coagulantes después de dichos eventos, la medición de pH inicial fue de 6,51 y turbiedad inicial de 7,3 NTU, posteriormente se realiza el test de jarras donde se obtiene la siguiente tabla de resultados:

Tabla 13. Resultados del test de jarras muestra 3.

Coagulante	Jarras	Dosis (mg/L)	pH final	Turbi final (NTU)
Cloruro férrico	J1	4	6,6	4
	J2	6	6,57	1,7
	J3	8	6,34	1,3
	J4	10	6,7	3,8
Sulfato de aluminio	J1	4	6,72	4,4
	J2	6	6,37	3,48
	J3	8	6,33	3
	J4	10	6,61	4,3
Cloruro férrico	J1	4	6,38	4,2
	J2	6	6,47	1,8
	J3	8	6,53	1
	J4	10	6,53	3,5

Fuente: Autores

Grafica 5. Resultados del test de jarras muestra 3.



Fuente: Autores

Ilustración 14. Jarras con sulfato de aluminio y cloruro férrico



Fuente: Autores

Al realizar la tercera prueba, para estas se utilizaron dos coagulantes cloruro férrico (jarra de la derecha) y sulfato de aluminio (jarra de la izquierda) con el fin de verificar los resultados obtenidos en los anteriores ensayos. Los resultados observados en la tabla 13 y grafico 5, tuvieron un comportamiento similar a los anteriores resultados; reiterando como el coagulante optimo el cloruro férrico. En conclusión se determinó que la dosis óptima de coagulante se encuentra entre 6 y 8 mg/l, en condiciones de tiempos seco y lluvioso.

4.7.2 Tiempo de retención

Seguido de esto se realizaron ensayos para determinar los tiempos de retención del agua óptimos para el proceso de floculación, obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 14. Tiempos de retención prueba 1

Coagulante:		Cloruro ferrico			
Dosis (mg/L)	Ensayo	Jarras	t retencion(min)	pH final	Turbi final (NTU)
6	1	J1	15	6,56	1.2
		J2	20	6,45	1.6
8	2	J1	15	6,67	1.9
		J2	20	6,52	1.52

Fuente: Autores.

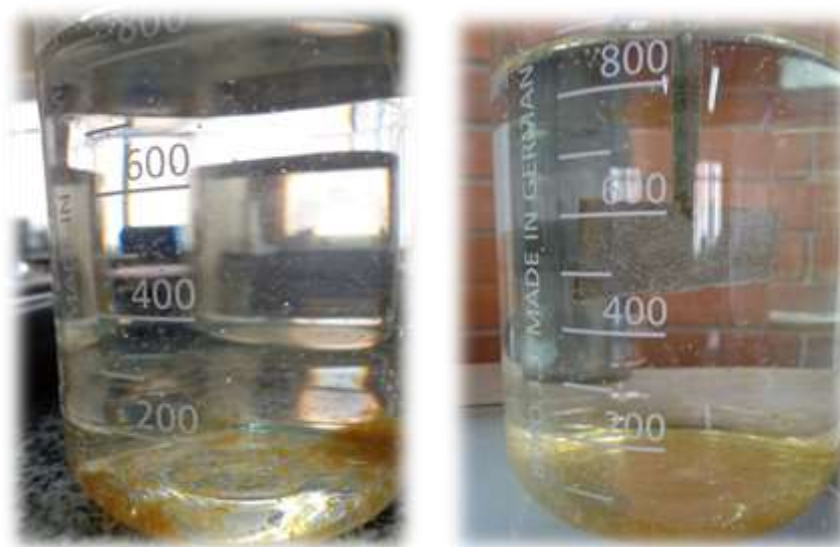
Usando la dosis determinada con las pruebas previas (6 mg/l y 8 mg/l) se buscó establecer el mejor tiempo de retención, es decir, el tiempo que debe permanecer el agua en la unidad de sedimentación para obtener el mejor resultado, en cuanto a mejor floc y cantidad sedimentada. Para fijar cuál fue el mejor floc se realizó un ejercicio visual donde se evaluó el tamaño y la cantidad, como también la cantidad de este que se sedimentaba; con turbiedad inicial de 7.3 NTU y pH 6.51, y midiendo turbiedad final y pH final, para comprobar la diferencia después del ensayo. Concluyendo de esta forma que para resultados efectivos se debe tener un tiempo de retención del agua en la unidad de 15 a 20 minutos, donde el pH y la turbiedad presentan los valores óptimos según la normatividad vigente.

Tabla 15. Tiempos de retención prueba 2.

Coagulante:		Cloruro ferrico			
Dosis (mg/L)	Ensayo	Jarras	t retencion(min)	pH final	Turbi final (NTU)
6	1	J1	15	6,41	1.34
		J2	20	6,65	1.56
8	2	J1	15	6,52	1.7
		J2	20	6,37	1.42

Fuente: Autores.

Ilustración 15. Floculación y sedimentación con cloruro férrico.



Fuente: Autores

En la imagen 13 se puede observar que la jarra de la izquierda se encuentra en mezcla lenta realizando el proceso de floculación, donde se puede identificar la formación del floc (partículas de color naranja) y a la derecha se observa el floc sedimentado después de 20 min.

Al realizar la segunda prueba de tiempos de retención, con el fin de verificar los resultados obtenidos en la prueba anterior. Los resultados observados en la tabla 4 tuvieron un comportamiento similar a los anteriores resultados; reiterando el tiempo de retención entre 15 y 20 minutos.

4.8 Plan de optimización de la planta de tratamiento

A partir de todos los análisis realizados previamente y los aspectos críticos identificados, se optó por plantear una propuesta que permitirá armonizar las acciones desarrolladas en la planta con el objetivo principal de aumentar la eficacia y eficiencia del sistema de tratamiento:

4.8.1 Aspectos generales de la PTAP

- **Ampliación del sistema.**

Durante el periodo de operación proyectado a 25 años para la PTAP, la población llegará a requerir un caudal máximo de 3,2 L/s que podrá ser tratado con las características actuales de tamaño y capacidad de la planta, según los resultados del análisis hidráulico. Por esta razón se define que no será necesaria una ampliación del sistema a menos que se desee realizar un proyecto de aumento en cobertura para cubrir otras veredas del municipio o cubrir otros puntos de consumo en la misma vereda, que sería objeto de otro estudio.

- **Sala de almacenamiento y dosificación.**

Esta sala deberá disponer de un espacio físico claramente separado del resto, donde se dispongan de manera ordenada, segura y aseada los insumos de la planta, permitiendo su manipulación, cargue y descargue libre de riesgos ocupacionales. Así mismo se deben intervenir las paredes del cuarto de almacenamiento y dosificación para eliminar las grietas, perforaciones, roturas y humedades presentadas.

- **Macromedidor de caudal**

Ante la dificultad de implementar un sistema hidráulico tipo canaleta parshall o vertedero como aforador, principalmente debido a la ubicación y configuración estructural de la planta y su punto de entrada en la parte alta del aireador, se recomienda instalar un equipo de medición del caudal de agua cruda que entra a la planta de tratamiento y así mismo asegurar periodicidad del registro de la lectura o cálculo del caudal. Para esto se propone implementar un medidor Woltman de caudal para llevar el respectivo control sobre este. (Ver ficha técnica anexo 15). Este permitirá garantizar una medición continua del caudal para verificar la descarga de coagulante e hipoclorito de calcio.

De ser posible debe instalarse un medidor del caudal de agua cruda que entra a la planta y un medidor del caudal de agua tratada que sale de la planta.

- **Bombeo**

Se recomienda realizar un mantenimiento periódico de la bomba que abastece la planta, para evitar problemas de abastecimiento y presión del agua. Se recomienda

realizar un mantenimiento preventivo cada dos (2) meses y mantenimientos correctivos inmediatos a la presentación de fallos en su operación.

Para garantizar el bombeo se recomienda la rehabilitación de la bomba actual a través de los debidos mantenimientos mecánicos y eléctricos, de no ser posible se debe instalar una nueva bomba que tenga las siguientes características: 3 HP de potencia de conexión eléctrica trifásica de 380 V con diámetro de descarga de 1". Esta bomba garantiza una altura máxima de elevación de 48m y un caudal máximo de 4,16 L/s. (Ver ficha técnica de la bomba de abastecimiento anexo 20)

- **Dosificadores**

La planta cuenta con tres dosificadores de cloro que actualmente se encuentran dañados es necesario su reparación o reemplazo para garantizar el proceso de dosificación de cloro de forma precisa y no ser necesario realizarlo manualmente, siendo esto de vital importancia para la destrucción de microorganismos patógenos presentes en el agua. Se recomienda utilizar hipoclorito de calcio granulado con concentración de cloro de 67%.

- **Control de calidad del agua tratada**

El laboratorio debe implementar un plan de compras en el mediano plazo para estar dotado con los equipos de caracterización del agua cruda como recipientes para recolección de muestras, termómetro, turbidímetro, colorímetro, medidor de pH, balanza analítica, equipo de prueba de Jarras, frascos y vidriería apropiada para un laboratorio de aguas. En la planta de tratamiento se recomienda adecuar un espacio en la sala de almacenamiento para el análisis básico del agua tratada que cuente con la dotación básica establecida en la Resolución 2115 de 2007. Se recomienda para iniciar la implementación del plan, adquirir un equipo multiparámetro o indicadores de pH y medidores de cloro y turbidez. (Ver ficha técnica de indicadores de pH y medidor de cloro y turbidez anexo 21 y 22)

- **Control de operación y mantenimiento de las unidades**

Se recomienda para el mantenimiento de las unidades seguir las indicaciones estipuladas en el título C, del RAS, que pueden ser implementadas en la planta, junto con esta propuesta se entregara un manual de operación y mantenimiento para ser aplicado en la planta de tratamiento. (Ver manual de operación y mantenimiento anexo 25)

Así mismo se deben llevar los formularios y libros de bitácora para el registro escrito de los datos, acciones, tareas, fallas que se tuvieron y los cambios que se hacen diariamente. Allí deben registrarse las novedades ocurridas llevando un archivo ordenado de la información. También se deben elaborar los procedimientos escritos para la operación y mantenimiento de cada uno de los diferentes procesos y equipos de la planta de tratamiento y deben estar al alcance del fontanero para su consulta permanente y contener procedimientos para atender emergencias.

- **Certificación en competencias laborales**

Deber realizarse un programa de capacitación con el objetivo de formar al fontanero de la planta de tratamiento, en cada uno de los aspectos que tiene que ver con los procesos unitarios de tratamiento, remoción de sólidos, desarenación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección con base en los recientes desafíos en el tratamiento del agua para consumo humano. Así mismo se propone tomar como referente lo establecido en la Res. 1570 de 2004, para formular en el corto plazo un programa de capacitación en los niveles de competencia laboral que corresponda a los integrantes del acueducto, entre ellos, fontanero u oficial de operación y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades Nivel 2, Administrador local del servicio de acueducto Nivel 3 y Auxiliar de oficina Nivel 2.

- **Manejo de información**

No se tiene información técnica de la planta ni planos en las bases de datos ni en físico, y el manejo de los consumos por usuarios es deficiente; se propone que se genere una buena base de datos, donde se tengan registros los datos de consumo históricos y actuales, cantidad de usuarios, puntos de abastecimiento y valor por m³ cobrado a los usuarios, esto con el fin de facilitar los análisis de proyecciones futuras.

4.8.2 Aireación

- **Cambio del lecho de carbón**

Ya que actualmente la planta utiliza coque como lecho de carbón, se recomienda que sea sustituido por lecho plástico en polipropileno, ya que en este no se forman comunidades biológicas. Este tipo de empaque también puede garantizar una elevada resistencia mecánica, altas superficies por unidad de volumen y simplicidad y facilidad en el mantenimiento.

Se recomienda utilizar para cada bandeja, un lecho compuesto por dos capas, cada una de 130 piezas en posición irregular de empaque plástico de 2". Esto puede garantizar una porosidad cercana al 94% y un área de contacto superficial aproximada de 4,88 m² en cada bandeja cuya área originalmente era apenas de 0,4356 m², generando un incremento importante en la eficiencia del proceso de absorción de oxígeno y desorción de gases indeseados. (Ver ficha técnica del lecho de Plástico anexo 16).

4.8.3 Coagulación – Floculación

- **Implementación de cloruro férrico como coagulante**

Anteriormente se utilizaba sulfato de aluminio, pero de acuerdo con estudios de tratabilidad realizados se pudo identificar que es más eficiente el cloruro férrico, ya que presenta mejores resultados en la formación de floc y en la sedimentación facilitando la remoción de partículas. (Ver Hoja de seguridad del cloruro férrico anexo 17).

Según esto, se recomienda utilizar cloruro férrico líquido al 42%, coagulante muy eficiente en la remoción de compuestos orgánicos y metales. El producto a utilizar es un líquido de color café oscuro con un porcentaje entre 40 y 45% de cloruro férrico, menos del 0,9% de cloruro ferroso y densidad promedio de 1,45 g/mL. Para fines de mejorar el proceso de coagulación se recomienda adecuar un sistema de dosificación en solución. Este debe permitir la descarga de una solución de coagulante previamente preparado al 1%. De acuerdo con los resultados del ensayo de jarras, la dosis óptima se encuentra entre 6 y 8 mg/L, por lo cual para tratar un caudal de 1,9 L/s debe asegurarse una descarga de entre 47 mL/min y 63 mL/min de solución de coagulante al 1%. Esta solución puede prepararse colocando 4,8 L de cloruro férrico líquido al 42% en un tanque (250 L) y completando a 200 L de agua. Este sistema puede garantizar dosificación permanente durante 48 horas (2 días continuos), sobrando un remanente de 18 L aproximadamente por lo cual se puede preparar nuevamente la solución añadiendo 4,37 L de coagulante y completando volumen con 182 L de agua.

La caneca comercial que se puede adquirir es de 24 kg correspondiente a 16,5 L de producto. Esto permite proyectar en el mes un consumo estimado de 4 canecas de cloruro férrico que pueda asegurar dosificación continua. Aún en eventos de baja turbiedad se recomienda dosificar para asegurar la eliminación efectiva de microorganismos, incluida la posible presencia de protozoarios inmunes al cloro en la desinfección como huevos de helminto, giardia lamblia o cryptosporidium.

4.8.4 Sedimentación

- **Cambio de módulos del sedimentador**

Para asegurar el funcionamiento óptimo del sedimentador se debe realizar el cambio de las placas. En este caso se puede instalar un módulo de placas hexagonales fabricadas en PVC de alto impacto que permite una mejora considerable en la calidad del agua clarificada, logrando una mayor retención de sólidos en la unidad de sedimentación. Este módulo permite también aumentar la velocidad ascensional a través del sedimentador mejorando la formación de lodos, con lo que se podría aumentar el caudal de entrada, para la misma estructura. En cuanto a su instalación, solo requiere una estructura de soporte liviana con baffles en las paredes del tanque, lo que reduce costos en la instalación por materiales y mano de obra requerida.

Entre otras ventajas, el PVC es altamente resistente al impacto y condiciones ambiente, lo que garantiza una larga vida útil. Además de esto, su superficie lisa evita la adherencia de algas y biopelículas, minimizando las labores de mantenimiento. (Ver ficha técnica de módulos de sedimentación anexo 18)

- **Rejilla o malla**

Se recomienda la implementación de una rejilla o malla en la entrada del tubo que conduce el agua del sedimentador al filtro. Esta tiene como fin retener material que pueda caer a la unidad (hojas de árboles, ramas, semillas, entre otros), ya que éste se acumula posteriormente afectando la eficiencia y la vida útil del filtro. Para ello se recomienda una malla cedazo de 4 agujeros por pulgada lineal fabricada en polietileno de alta densidad. (Ver ficha técnica de la malla anexo 19)

4.8.5 Filtración

Como parte de las recomendaciones del proyecto se incluye hacer una caracterización del filtro, puesto que en campo no es posible tomar estos datos, también se propone realizar un mantenimiento continuo a la unidad para mejorar su eficiencia y aumentar

el tiempo de vida útil del lecho filtrante, para evitar que sea requerido cambios de éste antes de tiempo y así minimizar gastos; finalmente realizar ensayos en planta para evaluar la eficiencia del filtro, este no requiere un rediseño puesto que las características iniciales del agua son aceptables por lo que el filtro está en condiciones de realizar eficientemente su función.

Si se identifica que el filtro no funciona como está, se propone realizar un cambio del lecho filtrante y adoptar un lecho mixto de arena y antracita, distribuido con los siguientes espesores 0,15 m, 0,25 m respectivamente, considerando que la altura de la cámara inferior del filtro donde sería instalado el lecho filtrante tiene una altura aproximada de 0,8m. Además se debe instalar un lecho de grava de soporte con un espesor de 0,15m y usando como falso fondo y drenaje un sistema de tuberías perforadas sobre la base del filtro.

Tabla 16. Características del lecho filtrante

Características	Antracita	Arena
Espesor del lecho (m)	0,25	0,15
Tamaño efectivo (mm)	0,85	0,5
Coeficiente de uniformidad	1,5	1,5
Peso específico (g/cm ³)	1,6	2,5
Porosidad (%)	50	42
Dureza Mohs	3,5	7
Coeficiente de esfericidad	0,7	0,81

Fuente. Teoría y práctica de la purificación del agua [13]

Se debe definir el criterio que determina el momento de lavado de los filtros, ya sea por pérdida de carga, por turbiedad en el efluente del filtro o por tiempo fijo. Ante la dificultad de realizar ensayos y evaluar la eficiencia del filtro se recomienda hacerlo por tiempo fijo una vez al día y verificar a través de la medición de turbiedad en el afluente.

4.8.6 Desinfección

Para efectos de realizar una adecuada desinfección, se puede garantizar una concentración de cloro libre acorde con la Res. 2115/07 dosificando 2 mL de solución de hipoclorito de calcio al 0,1% por cada litro de agua a tratar. De acuerdo con el

caudal medio a tratar, según el máximo permitido en la concesión, de 1,9 L/s, se pueden ajustar los dosificadores para garantizar una descarga continua de 228 mL/min. Para preparar la solución al 0,1% se pueden añadir 600 g de hipoclorito de calcio al 67% granulado en un tanque (500L) con 400 L de agua; lo que garantizaría una dosificación continua en un día. Después de la primera preparación y si se garantiza la descarga continua establecida arriba, sobrará un remanente de 72 L de agua por lo cual se puede añadir diariamente 490 g de hipoclorito y añadir 328 L de agua para completar volumen de mezcla. (Ver ficha técnica de dosificadores anexo 21, hoja de seguridad anexo 23).

El tiempo de contacto necesario para las condiciones promedio de pH y temperatura se puede determinar a partir del método concentración-tiempo. En este caso considerando un pH promedio de 6,4 y temperatura de 10°C se tiene una constante $K = Ct$ de 69 mg.min/L (99,99% de inactivación de quistes de giardia por cloro libre – Log 4). De acuerdo con esto y tomando la dosis de cloro en 2 mg/L, el tiempo de retención necesario para asegurar la adecuada desinfección es 34,5 min. Este tiempo se puede garantizar en un tanque de contacto de 4 m³, para lo cual el tanque de almacenamiento podría suplir esta labor sin ningún problema al considerar el área superficial del mismo de 3,6 m². Un bajo nivel de agua podría asegurar el volumen suficiente y por tanto el tiempo necesario para la desinfección.

4.8.7 Almacenamiento

El tanque de bombeo y el tanque de almacenamiento de la planta deben garantizar el acceso controlado para evitar el ingreso de personas no autorizadas. Las tapas deben permanecer cerradas y se debe realizar el mantenimiento en sus estructuras para garantizar el buen estado de los tanques a fin de evitar fugas y contaminantes externos. La limpieza y desinfección se realizará cada seis (6) meses, iniciando esta labor previo a la puesta en marcha de la planta.

También se debe instalar un medidor de nivel de altura del agua en los tanques: mira, flotador, etc., y se debe calcular el volumen almacenado periódicamente. Así mismo debe haber periodicidad en la lectura y su correspondiente registro.

4.8.8 Propuesta administrativa - financiera

La propuesta administrativa se fundamenta en un proceso de determinación de costos e inversiones que garanticen la sustentabilidad del sistema. Cabe resaltar que dentro

del alcance del proyecto no se realiza el análisis tarifario, puesto que esto requiere un análisis detallado únicamente para este tema, usando como norma base la Resolución CRA 717 del 2015 (Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico), por la cual se establece la metodología tarifaria para las personas prestadoras de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado que prestan el servicio exclusivamente en el área rural.

Resulta importante mencionar que la propuesta de optimización debe asegurar su financiación a través del pago de la tarifa. Una vez puesta en marcha la planta de tratamiento, se puede empezar a cobrar por consumo a cada uno de los suscriptores del servicio de acueducto. Esta tarifa podrá determinarse a partir del cálculo del cargo fijo y el cargo por consumo equivalente a la suma del costo medio de administración CMA, costo medio de operación CMO, general CMOG y particular CMOP, el costo medio de inversión CMI y el costo medio generado por tasas ambientales CMT. En este caso debe garantizarse que el costo medio de inversión incluya los costos anuales del plan de inversiones para expansión, reposición y rehabilitación del sistema de acueducto que se considere en un periodo de 10 años.

Se recomienda seguir el esquema básico presentado a continuación para la determinación de los costos operacionales y añadir a esto los costos administrativos y de inversión a que haya lugar para realizar un reajuste en las tarifas, en el marco de las normas aplicables de la Comisión de Regulación de Agua Potable CRA.

Tabla 17. Cálculo de costos (fijos, operativos, mantenimiento y administrativos)

Costos fijos (Retorno a la Inversión):		
Interés y amortización	.....	
Otros costos fijos	.....	
	----- +	
Total costos fijos		.....
Costos operativos generales:		
Energía y agua	.....	
Químicos	.....	
Otros consumibles	.....	
Manejo de residuos	.....	
	----- +	
Total costos generales		.....
Costos de mantenimiento		.....
Costos administrativos		.....
Costos específicos de operación:		
Actividades de operación	.....	
Control de calidad	.....	
	----- +	
Total costos específicos		.....
		===== +
Total costos		.....

Fuente: Universidad de Delft. Adaptado por autores

Se deben considerar además las siguientes distribuciones:

- Otros costos fijos: 1 % de interés y amortización
- Costos de mantenimiento
 - * Mantenimiento General: 4 % de costos de construcción
 - * Mantenimiento de equipamiento: 10 % de costos de equipamiento
- Costos administrativos: 10 % de costos operativos
- Costos específicos de operación:
 - * Actividades de operación: 2 % de costos de inversión
 - * Control de calidad: 2 % de costos de inversión

Es importante resaltar que esta es una propuesta preliminar de estimación de costos que en todo caso debe ser validada con información real de la Asociación de Usuarios del Acueducto para evitar imprecisiones en los análisis y asegurar los ingresos mediante tarifa suficientes para garantizar la prestación continua del servicio.

4.9 Análisis económico

De acuerdo con la propuesta formulada, y según sus resultados no se presentará un listado de cantidades de obra puesto que no se requiere de actividades constructivas o de obra, las modificaciones propuestas corresponden a sustitución de insumos, adquisición de equipos y control operativo, de las cuales se especifican los costos asociados y sus fichas técnicas.

A partir de la propuesta planteada se realizó el análisis económico para esta, este análisis se realizó con el fin de estimar el costo de inversión que requiere hacer la asociación de usuarios del acueducto para que la planta entregue agua potable a la población y aumente la eficiencia y calidad de operación de esta. A continuación se presentan las tablas del análisis económico para la propuesta:

Para el análisis económico, fue necesario realizar una búsqueda de los precios de los insumos requeridos, para que la planta tenga un funcionamiento óptimo

Tabla 18. Análisis económico de la propuesta.

ANALISIS ECONOMICO DE LA PROPUESTA				
Descripcion	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
Aireador				
Lecho de plastico	-	4	\$ 19.500	\$ 78.000
Cloruro ferrico	25 L	1	\$ 89.950	\$ 89.950
Sedimentador				
Modulos de placas de sedimentacion	m	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Malla	m	1	\$ 9.900	\$ 9.900
Bomba centrifuga normalizada 3HP	-	1	\$ 555.390	\$ 555.390
Equipos				
Medidor de turbidez y cloro libre HI93414	-	1	\$ 4.809.266	\$ 4.809.266
Indicador ph	-	1	\$ 40.000	\$ 40.000
Hipoclorito de calcio	40 Kg	1	\$ 64.000	\$ 64.000
Macromedidor de caudal		1	\$ 630.000	\$ 630.000
Bomba Dosificadora de Diafragma	-	3	\$ 720.000	\$ 2.160.000
Tanque 250 L		1	\$ 119.900	\$ 119.900
Tanque 500L		1	\$ 169.900	\$ 169.900
Curso de operación y mantenimiento de plantas de potabilización	-	1	\$ 795.000	\$ 795.000
Valor parcial				\$ 9.721.306
Instalacion				\$ 1.944.261
Imprevistos				\$ 486.065
Valor total				\$ 12.151.633

Fuente: Autores

En la tabla 20 se presenta el análisis económico de la propuesta, donde el valor total de inversión inicial es de \$12.151.633, por lo que se requiere de una alta inversión principalmente en la compra de equipos de laboratorio;

Por otro lado cabe resaltar que la adquisición de cloruro férrico e hipoclorito de calcio deberá hacerse de forma continua puesto que hace parte de los costos de operación, para garantizar la dosificación continua mensual de coagulante se deberá adquirir mensualmente 3 bidones de 25 litros, representando un gasto mensual de \$269.850 y los 40 kg de hipoclorito podrán ser utilizados para dosificar continuamente durante 80 días, representando la compra de este aproximadamente cada 2 meses y medio. Esto significa un costo operativo general asociado al consumo de productos químicos de \$295.450 mensuales que representan aproximadamente el 10% de los ingresos por cobro de tarifas, lo que garantizaría la sostenibilidad del sistema.

En el análisis de costos no se incluye el reconocimiento y actividades alrededor del filtro puesto que esto no implica un costo de inversión adicional debido a que lo puede realizar la persona encargada de la operación de la planta. Es necesario realizar este

reconocimiento, ya que la asociación de usuarios del acueducto no posee esta información, y ésta es de importancia para reconocer el funcionamiento del filtro e identificar el medio filtrante y la eventual necesidad de ser cambiado. Para disminuir el costo de mantenimiento se recomienda se recomienda realizar un curso de operación y mantenimiento de plantas de potabilización en lugar de contratar entidades externas. Para la realización de los mantenimientos, esto presenta un mayor beneficio para la planta, ya que se contará con una persona capaz de identificar fallencias y tomar las medidas necesarias.

Por otra parte se debe tener en cuenta que el lecho de plástico se puede cambiar anualmente y los módulos de placas de sedimentación tiene una vida útil aproximada de 5 años dependiendo del mantenimiento. Cabe resaltar que la adquisición de los equipos como el medidor de turbidez y cloro y el indicador de pH, es una inversión adicional, la cual se recomienda implementar para tener mayor control de los parámetros del agua que ingresa y sale de la planta.

5 Impacto social

La ganadería y la agricultura (cultivos de papa, zanahoria, arveja, maíz y árboles frutales como el durazno, la pera y la manzana) son las principales fuentes de la economía de Subachoque, siendo estas la principal fuente de contaminación de la quebrada El Salitre, que es la que abastece a la planta de tratamiento de la vereda El Tobal. En la tesis de grado Evaluación de riesgos sobre la calidad del agua en acueductos rurales en el marco del plan de seguridad del agua, caso de estudio: Acueducto el Tobal Subachoque, realizada por Andrés Ballesteros y Sebastián Hernández Gamboa, identifican mediante pruebas de laboratorio que el agua de la quebrada El Salitre está contaminada por las actividades económicas del municipio, ya que tiene elevadas concentraciones de hierro, turbiedad y con presencia de coliformes y E.coli; Estas concentraciones serán removidas cuando la planta esté funcionando en óptimas condiciones, por lo tanto el agua contaminada que ingresa a la planta, será tratada y ya no generara preocupación a la población de la vereda el Tobal, ya que se impedirá el transporte de contaminantes que ocasionan alteraciones a la salud. [21]

La población requiere que se cumpla con su derecho al agua potable, que es lo que se busca obtener si se tiene una planta de tratamiento de agua potable, por lo tanto tener la planta de tratamiento en adecuadas condiciones y en funcionamiento, es imperativo para la comunidad de la vereda que recibirán beneficios reflejados en seguridad hídrica y salud, puesto que el agua distribuida contara con los parámetros estipulados por norma, para que el agua sea apta para su consumo, ya que actualmente la planta no cumple con lo nombrado anteriormente, puesto que la eficiencia de esta depende del funcionamiento individual de cada unidad que la compone. Al realizar la optimización se asegura el funcionamiento adecuado de las unidades y por lo tanto de la planta, esto se verá reflejado en la calidad del agua distribuida para su consumo directo, evitando que los usuarios requieran hervir el agua para su consumo.

El agua no es potable si tiene presencia de agentes patógenos y características físico-químicas provenientes de las actividades económicas de la zona, esto genera problemas graves de salud y afectando a toda la comunidad. [21] Por lo tanto con el funcionamiento de la planta se garantiza a las personas agua en cantidad adecuada, calidad aceptable y con constante suministro a un precio adecuado para que las personas puedan acceder de la disponibilidad de esta. Por otro lado la implementación de planes de seguridad de Agua (PSA), pueden ayudar al acueducto de la vereda El Tobal, a mejorar la operación y mantenimiento del sistema y por ende mejora la calidad de la prestación de los servicios de agua y saneamiento y así el acueducto puede cumplir con el objetivo de suministrar agua apta para el consumo humano. Los Planes de Seguridad del Agua detectan también los peligros asociados

tanto a la calidad del agua, como situaciones que pueden producir alguna afectación a la Infraestructura y al servicio que ofrece el acueducto, este puede estar preparado ante un evento o amenaza que pueda incrementar la vulnerabilidad del sistema tanto en aspectos estructurales como operacionales y por consiguiente podrán manejar adecuadamente los riesgos del sistema de agua potable. [22]

6 Conclusiones

Debido al sobredimensionamiento de la planta, esta no requiere ningún cambio estructural, pues para el caudal demandado actual (1,9 L/s) y para el proyectado (3,2 L/s) no representa problema alguno en el funcionamiento de la planta.

Se determinó que uno de los aspectos más imperativos del plan es el cambio periódico del lecho de carbón por un lecho plástico del aireador para mantener su eficiencia y para favorecer la oxidación del hierro de ferroso a férrico, para su posterior remoción.

Debido al deterioro de los módulos de sedimentación se disminuye la eficiencia del proceso de remoción de partículas, por lo que el cambio de los módulos de sedimentación, permite mejorar la eficiencia del proceso de sedimentación.

El estado de la planta depende mayormente del mantenimiento y de la gestión adecuada, por lo tanto, es necesario seguir los pasos de mantenimiento planteados en el manual de operación y mantenimiento anexado en la propuesta.

Según los resultados de las pruebas de tratabilidad se determinó que el uso de cloruro férrico como coagulante en dosis de 6 a 8 mg/L presenta mejores resultados para la remoción de material suspendido presente en el agua; por lo que su adopción favorecería en gran medida el proceso de floculación-sedimentación.

Para el año 2019, será necesario pedir a la CAR un aumento del caudal concesionado, puesto que el actual no suplirá las necesidades de los usuarios debido al aumento de la población y su demanda.

7 Recomendaciones

Realizar un mejor manejo de la información de la planta, usuarios y puntos de distribución en bases de datos para posteriores proyectos que puedan ser realizados en la planta.

Implementar un plan de capacitación y formación a corto plazo que permita el fortalecimiento institucional del acueducto.

Si la junta decide mantener el lecho de carbón, se recomienda cambiarlo anualmente para mantener una buena eficiencia del proceso.

Se recomienda usar como punto de dosificación de coagulante la parte alta del aireador para así aprovechar los gradientes de velocidad que se generan en dicha unidad, aumentando la efectividad de la mezcla del coagulante.

Cuando los módulos de sedimentación presenten signos de deterioro se recomienda realizar su cambio para mantener la eficiencia del proceso, en promedio la vida útil de estos módulos es de 5 años.

La asociación de usuarios del acueducto debe realizar una identificación interior del filtro para determinar el estado del lecho filtrante cuando debe ser cambiado, para favorecer el proceso, de manera contraria adoptar el diseño del filtro acá estipulado.

Realizar mantenimiento y lavado periódico de las unidades que componen la planta de tratamiento, para mantener en buen estado esta y de igual forma aumentar la vida útil de los lechos y módulos.

Aplicar la metodología tarifaria definida por la Comisión de Regulación de Agua Potable CRA establecida en Res. 717 de 2015 para realizar un reajuste de las tarifas actuales.

8 Bibliografía

- [1] CAR, «Alcaldía de Bogotá,» 2006. [En línea]. Available: http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/adminverblobawa?tabla=T_NORMA_ARCHIVO&p_NORMFIL_ID=305&f_NORMFIL_FILE=X&inputfileext=NORMFIL_FILENAME [Último acceso: 15 2 2016].
- [2] Planeación Ecológica Ltda, «Elaboración del Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá,» 2005.
- [3] J. P. A. GONZÁLEZ y G. A. F. SOLANO, «APOYO EN LA REHABILITACIÓN DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO DE LA VEREDA EL TOBAL, MUNICIPIO DE SUBACHOQUE, CUNDINAMARCA,» Bogotá D.C, 2013.
- [4] «REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS -2000,» [En línea]. Available: http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/4._Sistemas_de_acueducto.pdf. [Último acceso: 1 febrero 2016].
- [5] Ministro de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Ministro de Vivienda, Ciudad y Territorio - RAS 2000, Título C,» [En línea]. Available: <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/Titulo%20C%20-%20Dic%204%202013.pdf>. [Último acceso: 1 agosto 2016].
- [6] D. Castrillon Bedoya y M. D. L. A. Giraldo, *DETERMINACIÓN DE LAS DOSIS ÓPTIMAS DEL COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO GRANULADO TIPO B EN FUNCIÓN DE LA TURBIEDAD Y EL COLOR PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE VILLA SANTANA*, Pereira, 2012.
- [7] Y. Andía Cárdenas, *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*, Lima, 2000.
- [8] HIDRITEC, «HIDRITEC,» [En línea]. Available: <http://www.hidritec.com/hidritec/plantas-compactas-de-tratamiento-de-agua-potable>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [9] «El agua segura es esencial,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Air-Stripping-Systems-technologies.html>.
- [10] I. Y. A. Cárdenas., «TRATAMIENTO DE AGUA COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN,» Lima, 2000.
- [11] I. Y. A. Cardenaz, «TRATAMIENTO DE AGUA COAGULACION Y FLOCULACION,» LIMA, PERU, 2000.

- [12] J. A. Valencia, *TEORIA Y PRACTICA DE LA PURIFICACION DEL AGUA*, LONDRES.
- [13] Junta de Castilla y León Consejería de Sanidad, *Manual de tratamientos del agua de consumo humano*, 2010.
- [14] F. Ballesteros Rodríguez y J. S. Hernández Gamboa, *Evaluación de riesgos sobre la calidad del agua en el Acueducto Rural El Toba, Subachoque*.
- [15] F. Daza y C. Mora, «EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA QUEBRADA EL SALITRE, UTILIZANDO MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS COMO BIOINDICADORES PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO.», Bogota D.C., 2016.
- [16] D. M. Olaya Valdes y D. Muñoz Camargo, *OPTIMIZACIÓN DE LOS MODELOS COMPACTOS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA Y TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA DE LA COMPAÑÍA ACUAPLANTAS INGENIERÍA LTDA.*, Bogota, 2006.
- [17] Ministro de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Ministro de Vivienda, Ciudad y Territorio - RAS 2000, Título B,» [En línea]. Available: <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULOB%20030714.pdf>. [Último acceso: 20 Noviembre 2016].
- [18] Sierra Ramírez, Carlos Alberto, «Calidad del agua evaluación y diagnóstico,» Ediciones de la U, Medellín, Antioquia, 2011.
- [19] Da Mota, Piris, «Hierro y Manganeseo en Aguas Superficiales y Subterránea de la Provincia de Misiones,» Universidad Nacional de Misiones, Argentina.
- [20] «Física - Estática de los fluidos,» [En línea]. Available: http://www.fisicanet.com.ar/fisica/estatica_fluidos/ap05_densidad.php. [Último acceso: 1 12 2016].
- [21] Hesperian Health Guides, «Hesperian- Guías de salud,» 2011. [En línea]. Available: http://hesperian.org/wp-content/uploads/pdf/es_cgeh_2011/es_cgeh_2011_cap05.pdf. [Último acceso: 9 11 2016].
- [22] Ministerio de protección social, *Manual para el Desarrollo de Planes de Seguridad del Agua (PSA) en el Sector Rural y Urbano Marginal de Colombia*, Bogota, 2011.
- [23] *Planta de producción de agua potable tipo compacta*.
- [24] M. T. Leal Ascencio, *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*, Mexico.

- [25] J. H. S. BOLIVAR, • *Diagnóstico y optimización de la planta de tratamiento de agua potable, municipio puente nacional*, 2005.
- [26] D. C. C. Murcia, *Estudio de optimizacion de la planta de tratamiento de agua potable del centro vacacional lago sol*, 2008.
- [27] S. M. S. GAMBA y M. P. P. BERNAL, *PROPUESTA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE BITUIMA, CUNDINAMARCA*, 2011.
- [28] El Sistema Universitario Texas A&M, «Problemas del agua potable: El hierro y el manganeso,» Texas.
- [29] Servicios de Ingeniería e Informática, S.C. , «Actualización del Plan Maestro para el Mejoramiento de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Juárez, Chihuahua.,» Chihuahua.
- [30] I. V. M. Yactayo, «Manual de filtracion».
- [31] Oficina de Sistemas de Información, Análisis y Estadística, *Gobernación de Cundinamarca - Secretaría de Planeación - Mapa base del municipio de Subachoque - 25769*, Bogotá: IGAC - Secretaria de Obras Publicas de Cundinamarca - Base cartográfica grupo SIG.
- [32] Oficina de Sistemas de Información, Análisis y Estadística, *Mapa de uso propuesto del suelo Municipio de Subachoque*, Bogotá: Gobernación de Cundinamarca - Secretaría de Planeación -.
- [33] Geocontext Profiler, «Create a topographic profile,» [En línea]. Available: <http://www.geocontext.org/publ/2010/04/profiler/en/>. [Último acceso: 27 03 2016].
- [34] Ecoforest Ltda. y Planeación Ecológica Ltda., «Elaboración del diagnostico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del Rio Bogotá, Subcuenca del Rio Balsillas - 2120 -08,» CARC-0543, Bogotá D.C.
- [35] ALCALDÍA MUNICIPAL DE SUBACHOQUE , «PLAN TERRITORIAL DE SALUD 2008-2011,» Subachoque, Cundinamarca, 2008.

