



**Diagnóstico y propuesta de optimización de la planta de tratamiento del acueducto
loma el escobero**

Johan Sebastián Patiño Correa

Asesor

Yudy Andrea Londoño cañas,
Ingeniera sanitaria, Doctora en ingeniería Ambiental
Docente Escuela Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, escuela ambiental.
Ingeniería sanitaria
Medellín
2023

Cita	(Apellidos autor 1 & Apellidos autor 2, Año)
Referencia	Patiño Correa, J.S. (2023). <i>Diagnóstico y propuesta de optimización de la planta de tratamiento del acueducto loma el escobero</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín Colombia
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio Cesar Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Lina Berrouët Cadavid.

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

Tabla de contenido

Resumen	6
Abstract	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. Objetivos	10
2.1 Objetivo general:	10
2.2 Objetivos específicos:	10
3. Marco teórico.	10
3.1 Procesos de tratamiento:.....	15
3.2 Monitoreo de calidad del agua:	15
3.3 Control de riesgos.....	15
3.4 Mantenimiento preventivo:	16
3.5 Capacitación del personal:	16
4. Metodología.	16
4.1 Revisión de la literatura y de la norma:.....	16
4.2 Diagnóstico y evaluación del estado de la planta de potabilización:	17
4.3 Pruebas de tratabilidad	17
4.3.1 Test de jarras:	17
4.3.2 Turbiedad:	19
4.4 Análisis de la capacidad de la planta:.....	19
5. Resultados y análisis.	19
5.1 Diagnostico integral de la planta.	19
5.1.1 Descripción de la bocatoma:	20
5.1.2 Descripción del desarenador:	20
5.1.3 Vertedero:	21

5.1.4 Batería de filtros gruesos:	22
5.1.5 Floculador sedimentador:.....	23
5.1.6 Batería de filtros delgados:	23
5.2 Análisis de la capacidad de la planta.....	24
5.3 Estudios de tratabilidad del agua.....	30
5.4 Análisis de operación y consumo de agua.....	33
6. Conclusiones	37
7. Recomendaciones.	38
8. Referencias.....	39

Lista de tablas.

<i>Tabla 1: datos iniciales (PAC).</i>	18
<i>Tabla 2 : sulfato de aluminio tipo A.</i>	18
<i>Tabla 3: sulfato de aluminio tipo B.</i>	18
<i>Tabla 4 Caudales experimentales</i>	26
<i>Tabla 5 Constante de calibración</i>	28
<i>Tabla 6 Calibración del vertedero</i>	29
<i>Tabla 7 Resultados test de jarras del policloruro de aluminio (PAC).</i>	31
<i>Tabla 8 Resultados test de jarras del sulfato de aluminio tipo A</i>	31
<i>Tabla 9 Resultados test de jarras del sulfato de aluminio tipo B</i>	32
<i>Tabla 10 Consumos y altura de láminas de agua en los tanques de almacenamiento con un caudal de 6.17 l/s</i>	33
<i>Tabla 11 Consumos y altura de láminas de agua en los tanques de almacenamiento con un caudal de 6.74 l/s.</i>	34
<i>Tabla 12 Turbiedades en cada una de las estructuras.</i>	35

Lista de ilustraciones.

Ilustración 1. Esquema general de la planta	11
Ilustración 2. Plano de desarenadores	12
Ilustración 3. Plano general alimentación	12
Ilustración 4. Tanque desarenador antiguo	13
Ilustración 5. Plano general de filtros antiguos	14
Ilustración 6: Bocatoma acueducto loma del Escobero	20
Ilustración 7: Desarenador	21
Ilustración 8: Vertedero.....	22
Ilustración 9: Batería de filtros gruesos.....	22
Ilustración 10: Floculador sedimentador.....	23
Ilustración 11: Batería filtros delgados	24
Ilustración 12: Grafica calibración de vertedero	30
Ilustración 13: Grafica de turbiedades en cada una de las estructuras	36

Resumen

El trabajo se centra en el diagnóstico y optimización del Acueducto Loma El Escobero, ubicado en la Vereda Loma El Escobero, municipio de Envigado, Antioquia. El objetivo general es mejorar la eficiencia, calidad y sostenibilidad del suministro de agua potable a la población mediante el análisis del sistema de tratamiento, la identificación de problemas y la construcción de una propuesta que permita atender adecuadamente las problemáticas técnicas y operativas que ponen en riesgo el adecuado suministro de agua a la población atendida.

Las problemáticas técnicas fueron determinadas a partir de la evaluación de la eficiencia de los procesos de tratamiento y para ello se estableció un programa de monitoreo de la calidad del agua y se identificaron los riesgos asociados con la calidad del agua tratada. Se propuso un plan de mantenimiento preventivo para garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos y sistemas de la planta, se capacitó al personal operativo en aspectos técnicos, prácticos y de seguridad.

Finalmente, se propuso mejoras en los procesos de tratamiento que contribuyeron a la calidad del agua tratada, mitigación de riesgos y mantenimiento preventivo en la planta de tratamiento compacta, y se implementó las acciones correspondientes con el objetivo de optimizar su rendimiento y eficiencia. Se realizó un seguimiento y evaluación exhaustiva para medir la efectividad de estas mejoras una vez implementadas, permitiendo los ajustes necesarios para asegurar el impacto esperado.

Además, el trabajo incluye un cronograma detallado de actividades que abarca todo el período de prácticas académicas, garantizando así la organización y el cumplimiento puntual de cada tarea planificada.

Palabras clave: Acueducto; Agua potable; Calidad de agua; Efectividad, Mitigación de riesgos.

Abstract

The work focuses on the diagnosis and optimization of the Loma El Escobero Aqueduct, located in the Loma El Escobero district, Envigado municipality, Antioquia. The general objective is to improve the efficiency, quality, and sustainability of the drinking water supply to the population through the analysis of the treatment system, the identification of problems, and the development of a proposal that allows addressing the technical and operational issues that jeopardize the adequate water supply to the served population.

The technical problems were determined based on the evaluation of the efficiency of treatment processes, for which a water quality monitoring program was established, and the risks associated with treated water quality were identified. Finally, a preventive maintenance plan was proposed to ensure the optimal functioning of equipment and plant systems, and operational staff were trained in technical, practical, and safety aspects.

Furthermore, improvements were proposed in treatment processes, treated water quality, risk mitigation, and preventive maintenance in the compact treatment plant, and the corresponding actions were implemented with the aim of optimizing its performance and efficiency. Comprehensive monitoring and evaluation were carried out to measure the effectiveness of these improvements once implemented, allowing for adjustments if necessary to ensure the expected impact.

Additionally, the work includes a detailed schedule of activities that covers the entire period of academic internships, thus ensuring the organization and punctual fulfillment of each planned task.

Keywords: aqueduct, drinking water, effectiveness, risk mitigation.

1. INTRODUCCIÓN

La obtención de agua dulce y saneamiento básico es un derecho fundamental para la humanidad y es esencial para el desarrollo sostenible (ONU, acnur, 2003). Los servicios relacionados con el agua tienen como objetivo reducir la pobreza, promover el crecimiento económico y garantizar la sostenibilidad ambiental. En julio de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento mediante la resolución 64/292. Para lograr el acceso al agua potable para todos en 2030, se requiere una inversión adecuada en infraestructura, instalaciones sanitarias y prácticas de higiene (ONU, un.org, 2010)

En este contexto, los acueductos comunitarios se presentan como una solución necesaria. Estas entidades jurídicas están establecidas para gestionar el agua, especialmente en áreas rurales, y son autorizadas por la Constitución para prestar servicios. Funcionan a través de la participación de la comunidad en la gestión de los recursos hídricos y el suministro de agua a los usuarios de una zona determinada. Los acueductos comunitarios representan la participación ciudadana en la toma de decisiones relacionadas con el suministro de agua y deben contar con el apoyo de las autoridades estatales para garantizar el suministro de agua a todas las personas en su área de funcionamiento. Además, al igual que las empresas proveedoras de servicios, los acueductos comunitarios están

obligados a garantizar un suministro mínimo de agua para consumo humano, según lo establecido en la jurisprudencia de la Corte Constitucional de Colombia. (Colombia, 2015).

Un ejemplo de acueducto comunitario es el Acueducto Loma El Escobero, ubicado en la Vereda Loma El Escobero, municipio de Envigado, Antioquia. Actualmente, cuenta con una concesión de agua de 4.2 L/s y abastece a unos 300 usuarios, incluyendo residencias, comercios, instituciones educativas y lotes. Este acueducto obtiene agua cruda de la quebrada El Atravesado y su nacimiento se encuentra en el humedal Flor del Monte.

El proceso de tratamiento se basa en un sistema de potabilización en fibra de vidrio compuesto por cuatro unidades de filtración gruesa de flujo ascendente dispuestas en paralelo, una unidad de floculación sedimentación de flujo ascendente (floculación de manto de lodos y sedimentación de alta tasa) y tres unidades de filtración rápida de flujo descendente, así como un sistema electromecánico para la dosificación de coagulante y desinfectante. Sin embargo, en estos momentos, las unidades de filtración de manto grueso se encuentran fallando debido a que se les está aplicando un caudal mayor al establecido como máximo por el fabricante, generando fallas en el proceso de filtración. De igual forma, tampoco se cuenta con una unidad de aforo adecuada para el caudal que ingresa a la planta, esto afecta claramente el proceso, reduciendo las eficiencias esperadas en el sistema de tratamiento de agua.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general:

- Realizar un diagnóstico integral de la planta de tratamiento de agua potable del acueducto Loma el Escobero y desarrollar una propuesta de optimización.

2.2 Objetivos específicos:

- Identificar los puntos críticos en el proceso de tratamiento, desde la captación del agua cruda hasta la distribución del agua tratada.
- Analizar la calidad del agua cruda y del agua tratada, realizando muestreos y análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos.
- Proporcionar recomendaciones específicas para mejorar la eficiencia, calidad y sostenibilidad del proceso de tratamiento de agua potable.
- Evaluar las condiciones de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento, identificando las necesidades de reparación o reemplazo de los equipos y componentes críticos.

3. Marco teórico.

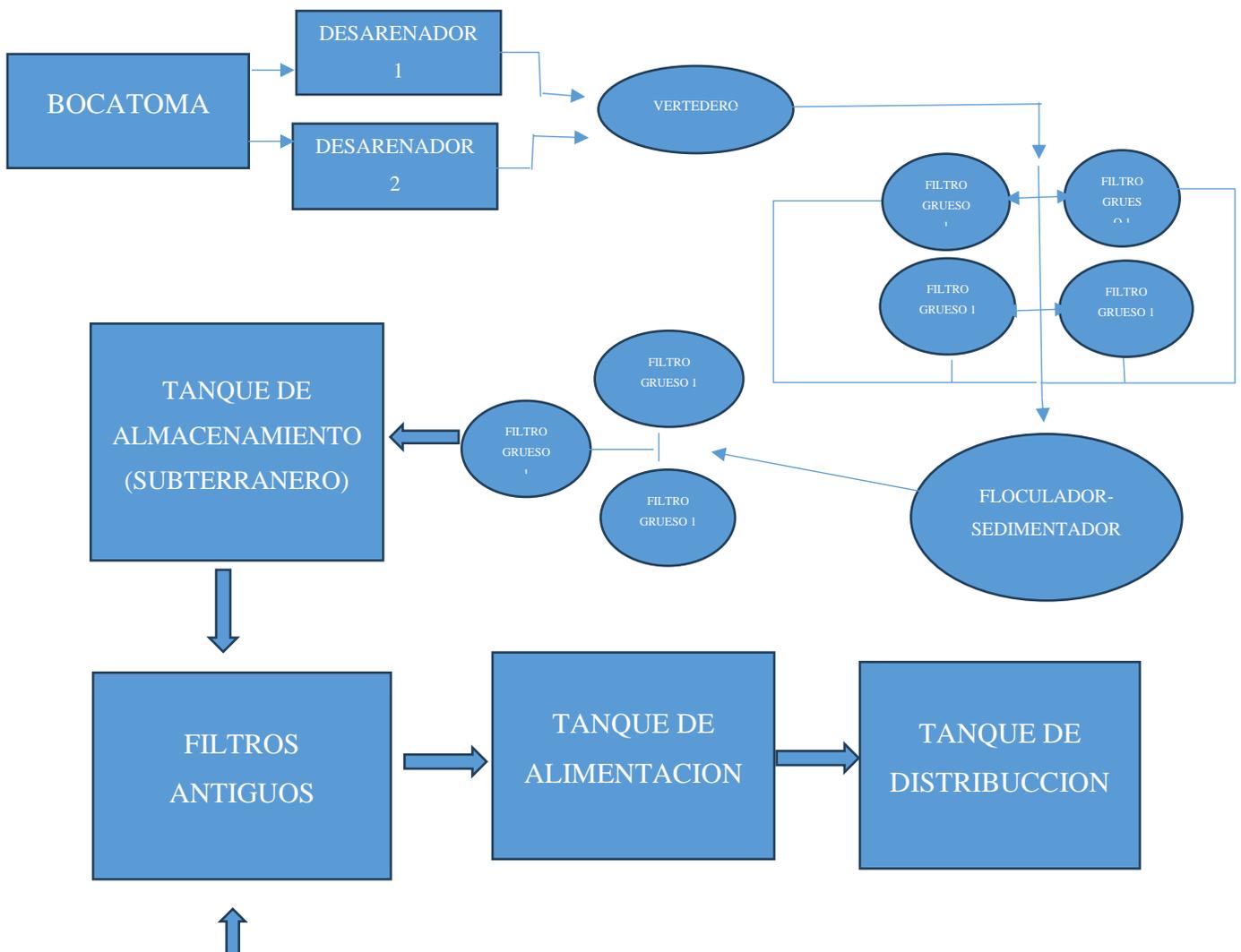
La planta de tratamiento de agua potable es una instalación diseñada para eliminar los contaminantes del agua cruda y convertirla en agua potable de alta calidad. La optimización de la planta de tratamiento de agua potable implica el análisis y mejora de los procesos de tratamiento, así como la evaluación y mitigación de los riesgos asociados con la calidad del agua tratada.

En el acueducto Loma El Escobero, el tratamiento de agua se realiza a través de dos sistemas, el más importante es el sistema de potabilización compacto. Este sistema incluye una bocatoma, dos desarenadores que funcionan en paralelo, un vertedero de abertura triangular de 60°,

cuatro filtros gruesos, un sistema de floculación-sedimentación, tres filtros finos y el almacenamiento en un tanque subterráneo. El segundo sistema es un proceso simple donde simplemente se capta el agua se dirige a un desarenador y luego simplemente se filtra por lo cual este sistema solo se utiliza con turbiedades menores a 5 NTU.

Es importante destacar que este sistema antiguo carece de los procesos necesarios para un completo tratamiento de agua potable, ya que muchas de las estructuras que poseía fueron aprovechadas para la construcción de la planta nueva. No obstante, la calidad de la fuente de la cual se abastece el acueducto es bastante buena, lo cual permite que el tratamiento se realice satisfactoriamente contando únicamente con el desarenador y los filtros de material fino.

A continuación, se muestran esquema de la planta:



Planos de la planta compacta: Este es el sistema más importante debido a que cumple con todos los procesos necesarios para el tratamiento eficiente del agua que se distribuye a la comunidad. Sin embargo, su diseño no cumple con los requisitos mínimos de caudal que la red de distribución requiere y exige. A continuación, se presentan los planos y esquemas de las estructuras de este sistema compacto.

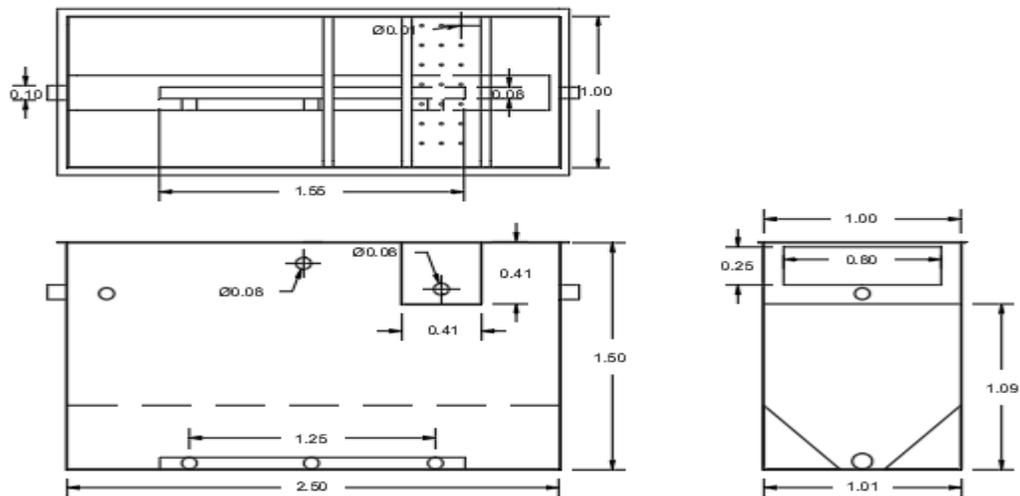


Ilustración 2. Plano de desarenadores

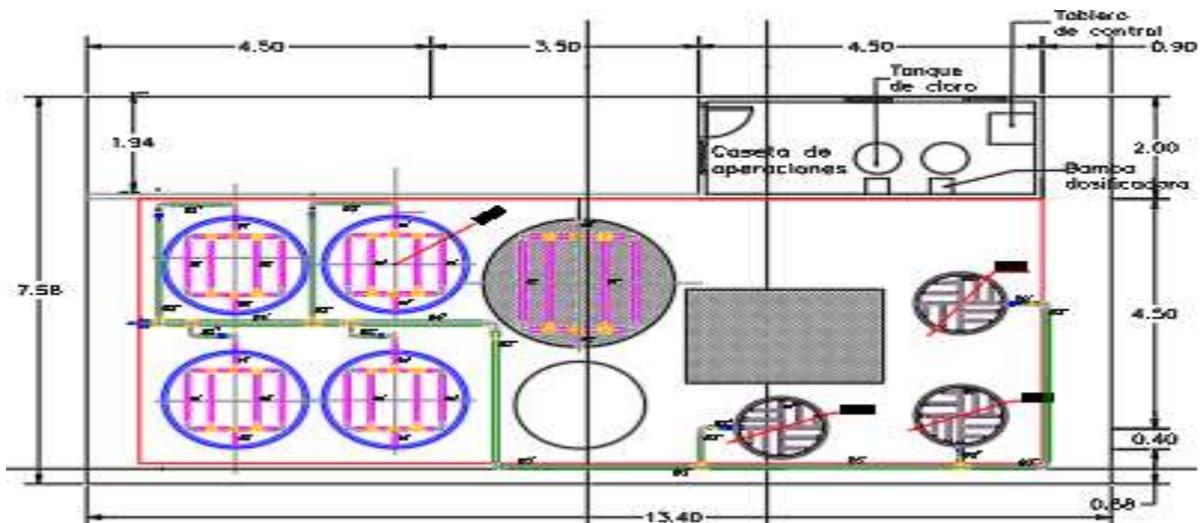


Ilustración 3. Plano general alimentación

Planos de las estructuras del sistema antiguas que aún funcionan: A pesar de no cumplir con todos los procesos requeridos para el tratamiento eficiente del agua, este sistema sigue siendo bastante útil, dado que la fuente de la que se abastece la planta es de muy buena calidad. Esto permite que, en momentos favorables, cuando la turbiedad es bastante baja, menos de 5 NTU, sea posible aprovechar este sistema en caso de desabastecimiento o ante cualquier contingencia que pueda surgir en la planta.

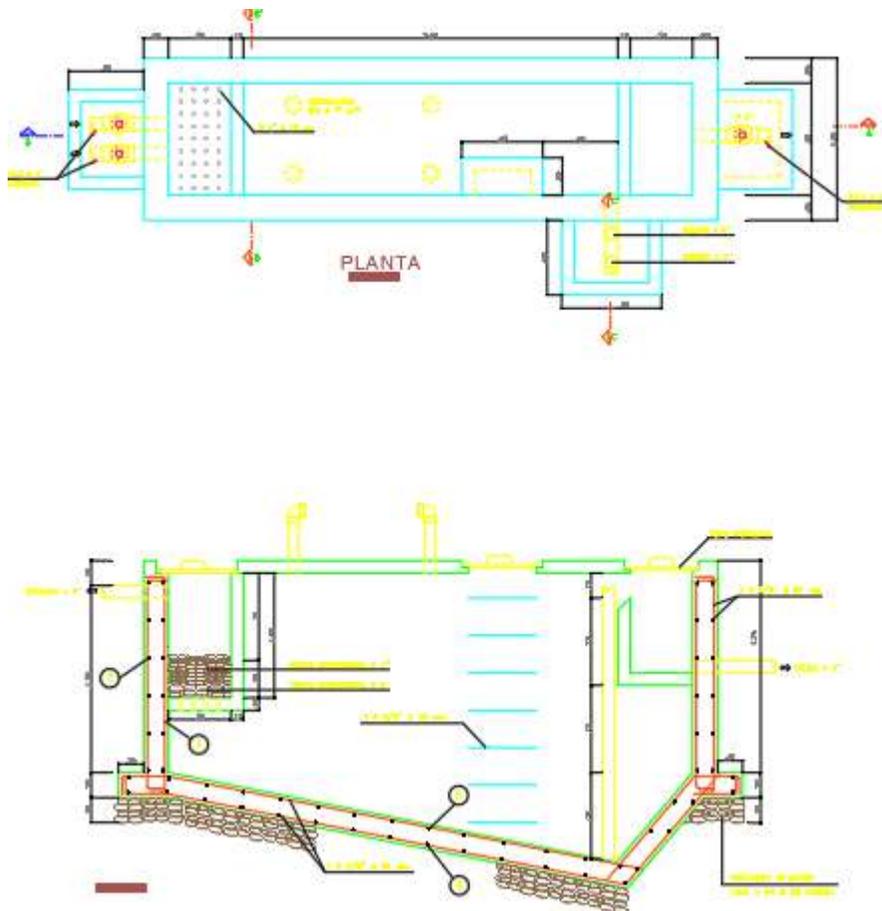


Ilustración 4. Tanque desarenador antiguo

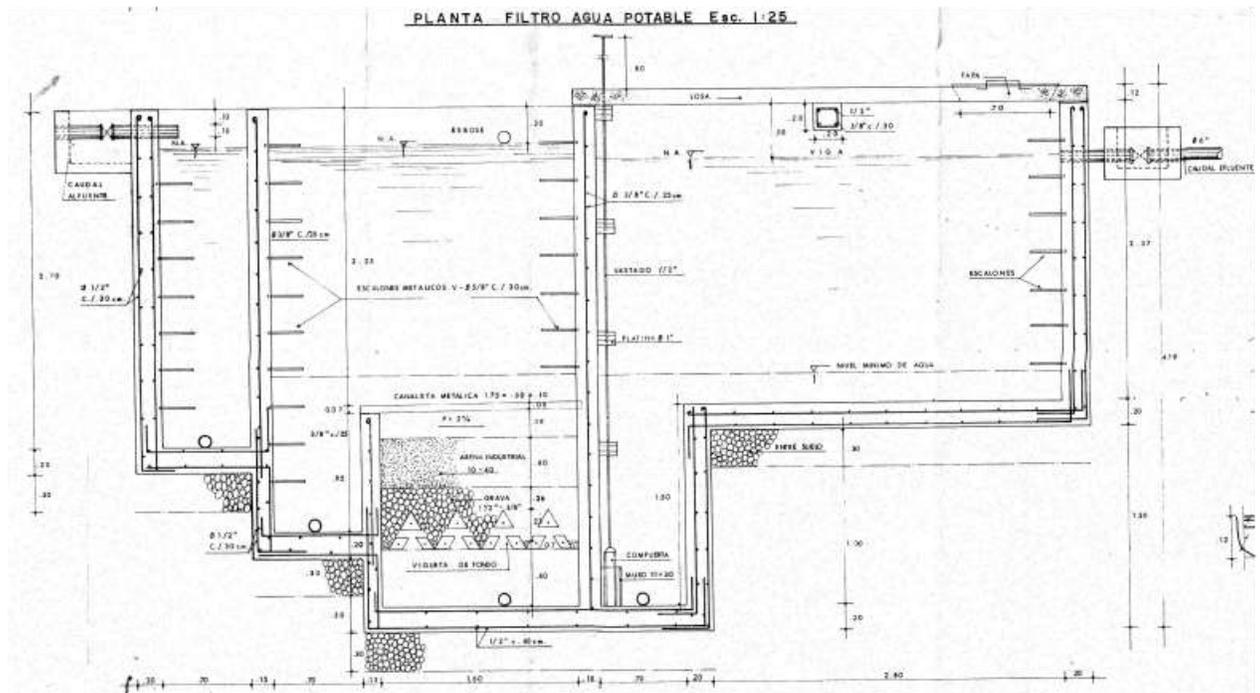
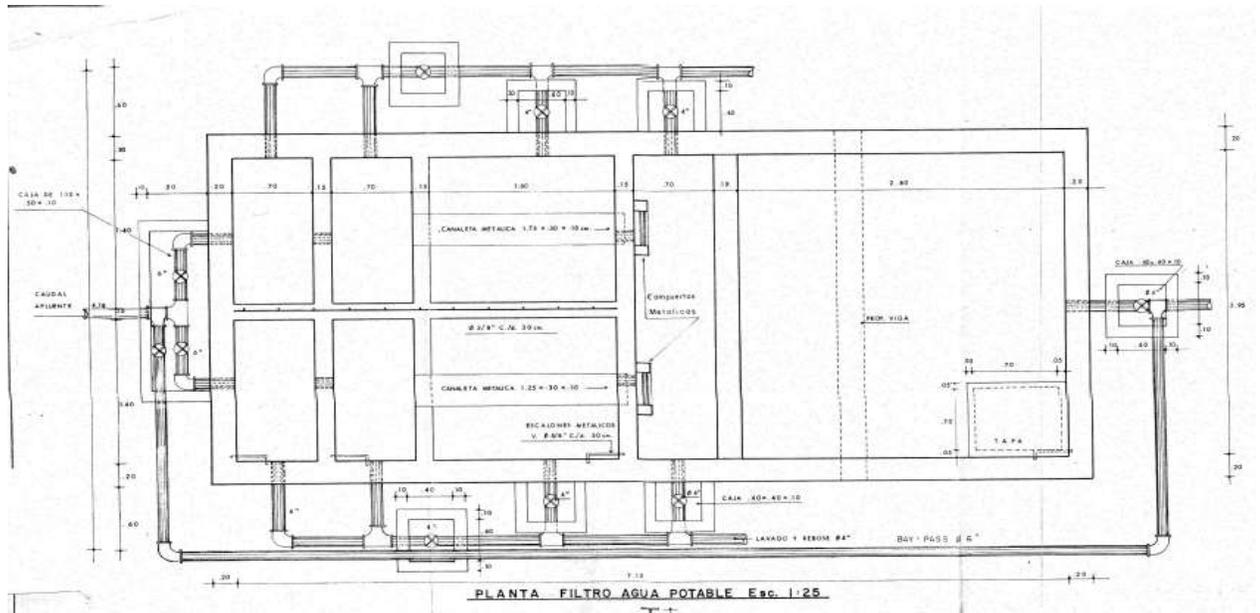


Ilustración 5. Plano general de filtros antiguos

Algunos de los aspectos relevantes que se consideraron para la optimización de la planta son:

3.1 Procesos de tratamiento:

El tren de tratamiento convencional es un proceso utilizado en plantas de tratamiento de agua potable. Consiste en varias etapas, como coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Estas etapas se encargan de eliminar impurezas y microorganismos, convirtiendo el agua cruda en agua potable segura para el consumo humano. La optimización de los procesos de tratamiento de agua potable implica el análisis de la eficiencia de los procesos de tratamiento existentes y la identificación de posibles mejoras. Los procesos de tratamiento comunes incluyen la coagulación, la sedimentación, la filtración y la desinfección. (VIVIENDA, 2017)

3.2 Monitoreo de calidad del agua:

La Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Ambiente de Colombia establece los parámetros y estándares de calidad del agua potable. El monitoreo de la calidad del agua es esencial para asegurar que el agua tratada cumpla con los estándares establecidos. Los parámetros comunes que se monitorean incluyen pH, turbidez, sólidos disueltos totales y cloro residual, entre otros. Este monitoreo garantiza que el agua sea segura para su consumo al evaluar aspectos físicos, químicos y microbiológicos, y detectar la presencia de sustancias y microorganismos no deseados.

3.3 Control de riesgos:

La identificación y mitigación de riesgos asociados con la calidad del agua tratada es fundamental para garantizar que el agua potable sea segura para el consumo humano. Los riesgos

comunes incluyen la presencia de microorganismos patógenos, productos químicos tóxicos, metales pesados, entre otros identificados en el mapa de riesgo evaluado de acuerdo con lo establecido en la resolución 4716 de 2010. Según como se nos indica en la Resolución 2115 de 2007 de Colombia, el Índice de Riesgo de Calidad del Agua para Consumo Humano IRCA es un instrumento que mide la probabilidad de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano.

3.4 Mantenimiento preventivo:

El mantenimiento preventivo de la planta de tratamiento es esencial para garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos y procesos de tratamiento. La implementación de un plan de mantenimiento preventivo puede minimizar los tiempos de inactividad y maximizar la eficiencia de la planta de tratamiento de agua potable.

3.5 Capacitación del personal:

La capacitación del personal es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento y la implementación adecuada de las estrategias de optimización. La capacitación debe incluir aspectos técnicos y prácticos, así como aspectos de seguridad y salud ocupacional para los operarios que no cuenten con la respectiva certificación de una institución educativa.

4. Metodología.

4.1 Revisión de la literatura y de la norma:

La revisión bibliográfica del acueducto implicó la recopilación de información de fuentes relevantes, como manuales de operación, libros, revistas científicas, informes técnicos y estudios

de casos. Posteriormente, se analizó y sintetizó esta información para obtener una comprensión completa del funcionamiento y operación del acueducto. Este proceso permitió obtener conocimientos fundamentales y actualizados sobre la operatividad de la planta.

4.2 Diagnóstico y evaluación del estado de la planta de potabilización:

Se realizará una caracterización detallada del estado y funcionamiento de la planta de tratamiento, incluyendo la evaluación de la calidad del agua cruda, los procesos de tratamiento utilizados, la calidad del agua tratada, los equipos y procedimientos o protocolos de operación. Esto se realizará mediante:

- La evaluación de la eficiencia de los procesos de tratamiento: Se evaluó la eficiencia de los procesos de tratamiento existentes en la planta de tratamiento mediante la realización de pruebas y análisis de la calidad del agua cruda y tratada.
- El monitoreo de la calidad del agua tratada: Se estableció un programa de monitoreo de la calidad del agua tratada para evaluar la eficacia de los procesos de tratamiento y detectar posibles problemas de calidad.

4.3 Pruebas de tratabilidad

4.3.1 Test de jarras: Para este análisis se llevaron a cabo ensayos de jarra utilizando Policloruro de aluminio (PAC), sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B para determinar la dosis óptima de coagulante en respuesta a una turbidez de 100 NTU, que se observó en la entrada de la planta durante un día de alta precipitación. Antes de realizar los ensayos con los coagulantes, se tomaron los datos iniciales de las muestras de agua cruda, que incluyen la temperatura, el pH y la turbidez de la matriz de agua (ver tablas). El ensayo de jarras comenzó con una dosificación del sulfato de aluminio tipo A y tipo B de % P/V, mientras que el PAC se dosificó

en % V/V. Para el ensayo de jarras, se tomaron muestras de 2 litros de agua cruda de la entrada de la planta, a las cuales se les suministraron las siguientes dosificaciones de coagulante: 2 ml para la jarra 1, 4 ml para la jarra 2, 6 ml para la jarra 3, 8 ml para la jarra 4, 10 ml para la jarra 5 y 12 ml para la jarra 6. Estas jarras, junto con la matriz de agua y el coagulante, se sometieron a una agitación de 140 rpm durante 1 minuto para la mezcla rápida, seguida de una agitación de 40 rpm durante 20 minutos para la mezcla lenta. Posteriormente, se permitió un reposo de 20 minutos para permitir la decantación de los floculantes formados. Después de este proceso, se tomaron muestras de cada una de las jarras para medir la disminución de la turbidez generada por cada dosis de coagulante. Para estas mediciones, se utilizó un turbidímetro de marca Hanna, con una capacidad de lectura de 0 a 1000 NTU.

Tabla 1: datos iniciales (PAC).

DATOS INICIALES POLICLORURO DE ALUMINIO (PAC)	
TEMPERATURA (°C)	21
PH	7.2
TURBIEDAD (NTU)	100

Tabla 2 : sulfato de aluminio tipo A

DATOS INICIALES SULFATO DE ALUMINIO TIPO A	
TEMPERATURA (°C)	20
PH	7.5
TURBIEDAD (NTU)	101

Tabla 3: sulfato de aluminio tipo B

DATOS INICIALES SULFATO DE ALUMINIO TIPO B	
TEMPERATURA (°C)	21
PH	7.4
TURBIEDAD (NTU)	102

4.3.2 Turbiedad: Se realizaron mediciones de turbidez en cada una de las estructuras (filtros gruesos, floculador-sedimentador y filtros rápidos) mediante el uso del turbidímetro Hanna el cual maneja un rango de lectura de 0 a 1000 NTU, cada hora, en días estratégicos como los días soleados y los días de intensas lluvias, estos datos fueron plasmados en una tabla con los horas y días en que se realizaron las pruebas y se graficaron los resultados (ver tabla de gráficos). Esto con el objetivo de realizar una comparación precisa entre días óptimos y días con mayores riesgos de afectación a la calidad de agua.

4.4 Análisis de la capacidad de la planta: Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la capacidad de abastecimiento de la planta. Para realizar este análisis, se midió la altura de la lámina de agua en los dos tanques de almacenamiento durante un período continuo de 24 horas en distintos días. El objetivo principal de este análisis fue determinar el caudal mínimo necesario para abastecer la red de distribución sin interrupciones en el servicio. Además, se buscaba diagnosticar si el caudal máximo de agua que la planta puede tratar era suficiente para cubrir las necesidades de abastecimiento de la red.

5. Resultados y análisis.

5.1 Diagnostico integral de la planta:

A continuación, se da una descripción detallada de los resultados obtenidos en el diagnóstico integral de la planta de tratamiento de agua potable del acueducto Loma el Escobero.

5.1.1 Descripción de la bocatoma: es una estructura de unos 35.5 cm de ancho por unos 25 cm de largo y unos 25 centímetros de profundidad con una rejilla en forma de tapa con unos 12 barrotes de media pulgada colocada en el centro del dique



Ilustración 6: Bocatoma acueducto loma del Escobero

Diagnóstico y hallazgos: al analizar el comportamiento del agua en la bocatoma, se observa que en la parte de la rejilla se acumulan hojas debido a la fuerza de arrastre del agua y a la alta presión con la que trabaja la tubería de aducción. Sin embargo, no se detecta evidencia de socavación ni fugas en el resto de la estructura (Ilustración 6)

5.1.2 Descripción del desarenador: son dos estructuras en fibra de vidrio de unos 2.5 metros de largo por 1 metro de ancho y unos 1.5 metros de profundidad que cumplen con la función de sedimentar las partículas discretas que puede traer la corriente de la quebrada El Atravesado son 2 unidades y ambas funcionan de forma paralela.



Ilustración 7: Desarenador

Diagnóstico y hallazgos: Al examinar los desarenadores que operan en paralelo, se puede evidenciar un óptimo rendimiento en la sedimentación de partículas discretas. Durante el mantenimiento de lavado, se observa la presencia de un lecho de partículas discretas en el fondo. Además, las estructuras no presentan fugas ni grietas y están equipadas con sus respectivas válvulas de purga y cierre de caudal. También cuentan con una tubería de rebose que devuelve el agua excedente a la quebrada (Ilustración 7).

5.1.3 Vertedero: Es una estructura de geometría cilíndrica hecha de fibra de vidrio en su interior se encuentra una la mina igualmente hecha de fibra de vidrio que separa el agua es entregada por el desarenador para luego pasar a una tubería que es la que se encarga de suministrar el caudal a la planta de tratamiento para esto se vale de una abertura de forma triangular invertida con un Angulo de abertura de unos 60° .



Ilustración 8: Vertedero

Diagnóstico y hallazgos: Este vertedero tiene una geometría circular con una abertura triangular de 60° . Al observar el comportamiento del agua en el vertedero, se notó que no estaba funcionando a flujo libre, sino a presión. Por este motivo, se decidió realizar la modificación del vertedero para permitir el ingreso de agua en condiciones de flujo libre (Ilustración 8).

5.1.4 Batería de filtros gruesos: esta batería se compone de 4 filtros gruesos verticales de forma cilíndrica de unos 4.5 metros de altura y con un diámetro de unos 1.8 metros hechas en fibra de vidrio que operan en paralelo.



Ilustración 9: Batería de filtros gruesos

Diagnóstico y hallazgos: Se ha observado, mediante análisis de turbidez, que los filtros funcionan adecuadamente tanto en condiciones de invierno como de verano. Durante la temporada de invierno, son capaces de tratar una turbidez de hasta 100 NTU, trabajando en condiciones óptimas a una velocidad de 5 L/s sin embargo pueden llegar a colmatarse bastante de prisa por lo que se requiere un lavado continuo (Ilustración 9).

5.1.5 Floculador sedimentador: Esta estructura es un sistema compacto vertical hecha en fibra de vidrio que utiliza un manto de lodos para generar una floculación por interferencia.



Ilustración 10: Floculador sedimentador

Diagnóstico y hallazgos: Al analizar los niveles de turbidez, se puede apreciar que la estructura es óptima, ya que se observa una disminución considerable en los niveles de turbiedad (Ilustración 10).

5.1.6 Batería de filtros delgados: Esta batería se compone de 3 filtros hechos en fibra de vidrio que funcionan en forma paralela y que tienen unos 3.6 metros de altura y unos 1.1 metros de diámetro.



Ilustración 11: Batería filtros delgados

Diagnóstico y hallazgos: los filtros funcionan de manera óptima, ya que realizan un excelente trabajo de pulimento. Durante las condiciones de invierno, logran mantener niveles de turbidez mínimos de 0.7 NTU y máximos de 1.5 NTU. (Ilustración 11)

5.2 Análisis de la capacidad de la planta

Para analizar la capacidad de la planta de abastecer a la red de distribución, se llevaron a cabo varios ensayos. Estos consistían en reducir el caudal normalmente ingresado a la planta, que es de unos 8 l/s, a unos 6.74 l/s. Se eligió este valor para asegurar la lectura precisa en el vertedero, considerando la calibración previa. Se tuvo en cuenta que el tanque de distribución nunca debería bajar su lámina de agua más allá de un metro de altura, ya que la salida del tanque está ubicada aproximadamente a esta altura.

Para medir la altura de la lámina de agua, se utilizó una vara de aproximadamente 3 metros de largo, suficiente para medir tanto el tanque de distribución como el tanque subterráneo que se

encuentra debajo de la planta actual. Es importante tener en cuenta que el tanque subterráneo no se llenaría hasta que el tanque de distribución estuviera completamente lleno.

Las pruebas comenzaron a las 8 de la mañana, llenando el tanque por completo, y durante las siguientes 24 horas, se midió la altura de la lámina de agua cada hora. Estos datos se registraron en tablas (ver Tabla 9 y 10).

La recopilación de información involucró la recolección de datos pertinentes sobre el rendimiento operativo de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), así como sobre la calidad y cantidad de agua procesada. Esto implicó obtener registros precisos de los caudales de entrada y salida, los niveles de turbidez y los parámetros químicos y microbiológicos clave. Además, se tuvieron en cuenta los informes de mantenimiento y las inspecciones periódicas realizadas para evaluar el estado de los equipos e instalaciones.

El conocimiento preciso de la cantidad de agua que ingresa a la planta es de vital importancia. Por lo tanto, resulta necesario disponer de un método claro y conciso para medir este valor. Aunque la planta dispone de un vertedero con una abertura triangular de 60° , este carecía de una calibración precisa. En consecuencia, se procedió a realizar la calibración del vertedero.

La calibración del vertedero proporciona una forma más sencilla y confiable de determinar el caudal que ingresa a la planta en determinado momento. Sin embargo, este vertedero no cumple ninguna función más allá de esto, lo que dificulta la operación adecuada de la planta al no poder controlar efectivamente el caudal que ingresa a la planta, esto dificulta mucho su correcta operación.

para realizar el aforo del vertedero se requiere el control de los caudales que ingresan a través de él, el procedimiento consta de regular la lámina de agua a diferentes alturas a intervalos de 0.5 cm hasta llegar a una altura de 14.5 cm y medir cuanto tiempo se demora en llenar de agua un volumen de control conocido el cual es 35 L.

La fórmula utilizada para calcular el caudal que está ingresando al vertedero a determinada altura de la lámina de agua es:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Ecuación 1: Caudal experimental.

Donde:

Q(exp) = Caudal a determinada altura de la lámina de agua.

V = volumen de control el cual es 35 L.

t = Tiempo en (s) que demora llenar el volumen de control.

A partir de esto se obtuvo la siguiente tabla

Tabla 4 Caudales experimentales

Calibración del vertedero 60°	
H (cm)	Q (L/s)
1,5	0,045
2	0,080
2,5	0,124
3	0,195
3,5	0,311
4	0,426
5	0,650
5,5	0,763
6,5	1,244
7	1,536
7,5	1,776
8	2,171
11	4,052

13,5	6,800
14,5	7,848

Ahora, después de tener un caudal experimental a cada altura de la lámina de agua, se procede a calcular el caudal generado, por medio del siguiente procedimiento la ecuación:

$$Q(\text{generado}): KH^n$$

Ecuación 2: Caudal generado

Donde:

Q(generado) = Caudal real o generado.

K = Coeficiente

H = Alturas de lámina de agua en el vertedero.

n = Número de contracciones del vertedero

Debido a que conocemos a Q y H y no a K y n pasamos a realizar el siguiente procedimiento

$$\text{Ecuación 3: } \log Q = \log K + n \log H$$

Gracias a la forma que toma la Ecuación 3 podemos tratarla como si fuera una ecuación lineal de la siguiente forma.

$$Y = mX + b$$

Donde:

$$Y = \log Q$$

$$m = n$$

$$X = \log H$$

$$B = \log K$$

Aplicando logaritmos a los caudales reales y las alturas H de la tabla 3 obtenemos la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 4: } Y = 2.3163 - 1.7895$$

De esta ecuación de la recta obtenemos que $n = 2.3163$

Y para el valor de K tenemos que

$$K = \log^{-1}(-1.7895)$$

$$K = 0.01623$$

Tabla 5 Constante de calibración

Datos de Calibración	
n	2.3163
K	0.01623

Si utilizamos la Ecuación 2 con los valores reales de H y aplicamos los datos correspondientes de n y K de la Tabla 5, podremos calcular los valores de calibración específicos para el vertedero de 60° (consulte la Tabla 6). Estos valores nos permitirán determinar el caudal que entra en el vertedero mediante el simple conocimiento de la altura en la que se encuentra la lámina de agua (Lux, M.A.2010).

Tabla 6 Calibración del vertedero

CALIBRACIÓN VERTEDERO MODIFICADO	
H (cm)	Q (generado) (L/s)
1,5	0,04
2	0,08
2,5	0,14
3	0,21
3,5	0,30
4	0,40
4,5	0,53
5	0,68
5,5	0,84
6	1,03
6,5	1,24
7	1,47
7,5	1,73
8	2,01
8,5	2,31
9	2,63
9,5	2,99
10	3,36
10,5	3,76
11	4,19
11,5	4,65
12	5,13
12,5	5,64
13	6,17
13,5	6,74
14	7,33
14,5	7,95
15	8,60
15,5	9,28

A partir de la curva de calibración, también es posible determinar el caudal que atraviesa el vertedero mediante un método gráfico. En este enfoque, solo se requiere conocer la altura y ubicarla

en el eje X de la gráfica de calibración del vertedero (consulte la ilustración 12). Luego, se traza una línea vertical que intersecta la curva y, a partir de este punto de intersección, se traza una línea horizontal hasta llegar al eje Y, donde se indican los valores de caudal. De esta manera, podemos determinar el caudal con precisión.

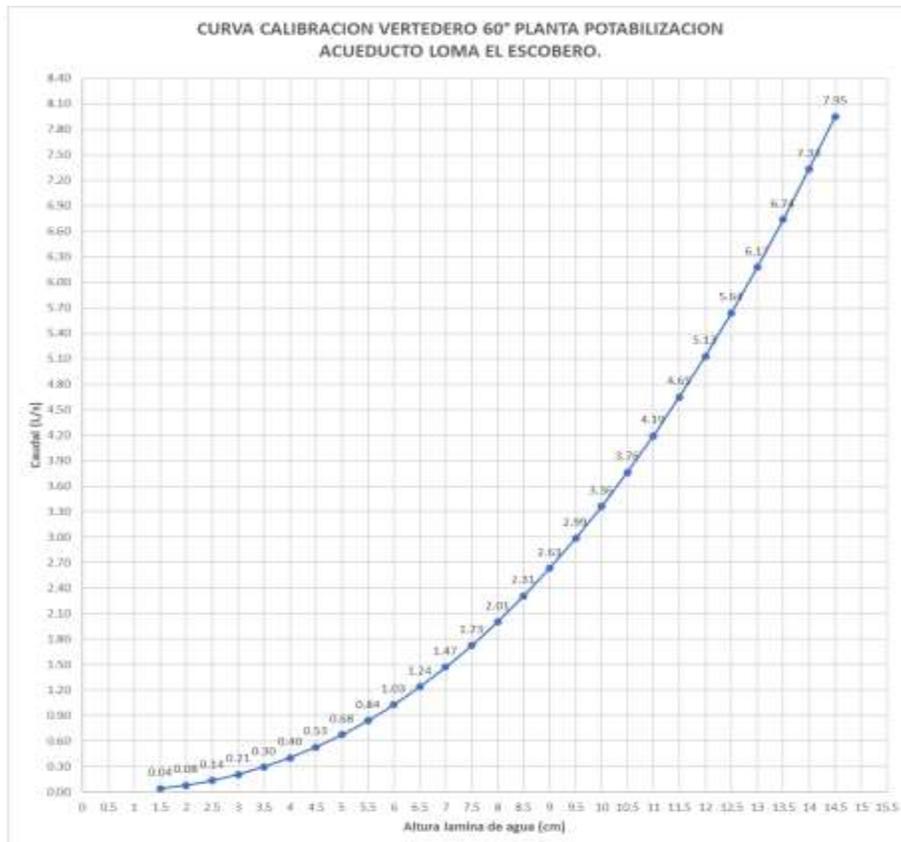


Ilustración 12: Grafica calibración de vertedero

5.3 Estudios de tratabilidad del agua.

Los resultados de las pruebas del test de jarras brindaron información suficiente para realizar comparaciones y tomar decisiones económicas en cuanto al coagulante más beneficioso tanto en términos económicos como en la remoción de turbidez del agua. Según se observó en las

tablas (5, 6 Y 7), los tres coagulantes funcionaron de manera similar, logrando turbideces en valores aceptables. Por lo tanto, la elección del coagulante dependerá exclusivamente de su precio.

Tabla 7 Resultados test de jarras del policloruro de aluminio (PAC)

POLICLORURO DE ALUMINIO (PAC)		
DOSIS (ml)	PH (UN)	TURBIEDAD (NTU)
2	7.02	61.5
4	7.03	40.8
6	7.07	8.49
8	7.06	2.16
10	7.12	1.94
12	7.09	3.02

Como se puede apreciar en la Tabla 7, el uso del policloruro de aluminio ha arrojado resultados altamente efectivos al reducir considerablemente la turbidez de 100 NTU a un mínimo de 1.94 NTU. Además, presenta una ventaja significativa en cuanto al pH, ya que, como se evidencia en la misma tabla, el pH experimentó cambios mínimos, manteniéndose en un promedio de 7.06 unidades. De igual manera, se destaca que la dosificación óptima se encuentra en torno a los 8 ml de solución.

Tabla 8 Resultados test de jarras del sulfato de aluminio tipo A

SULFATO DE ALUMINIO TIPO A		
DOSIS (ml)	PH (UN)	TURBIEDAD (NTU)
2	7.25	68.6
4	6.84	6.8
6	6.88	1.71

8	6.83	3.17
10	6.48	3.28
12	6.43	3.13

El sulfato de aluminio tipo A (ver tabla 8) arrojó resultados igualmente satisfactorios en cuanto a la reducción de la turbidez. Con una dosis de 6 ml, logramos disminuir la turbidez de 100 NTU a un mínimo de 1.71 NTU. No obstante, a pesar de sus ventajas en la reducción de la turbidez, se observa un efecto acidificante en el agua, reduciendo el pH de 7.5 a aproximadamente 6.88. Es importante destacar que esta disminución del pH no resulta significativa y se mantiene dentro del rango permitido de 6.5 a 9.

Tabla 9 Resultados test de jarras del sulfato de aluminio tipo B

SULFATO DE ALUMINIO TIPO B		
DOSIS (ml)	PH (UN)	TURBIEDAD (NTU)
2	7.25	68.6
4	7.02	37.4
6	6.88	4.05
8	6.83	3.78
10	6.48	3.37
12	6.43	3.08

En el caso del sulfato de aluminio tipo B (ver tabla 9), se obtuvieron resultados similares a los obtenidos con el sulfato de aluminio tipo A. Con una dosis de 6 ml de sulfato de aluminio tipo A, logramos una significativa reducción de la turbidez, disminuyendo de 100 NTU a 4.05 NTU. Este último valor es solo ligeramente superior al logrado con el sulfato de aluminio tipo A. Además, ambos coagulantes redujeron el pH del agua, pasando de 7.4 a 6.88. En consecuencia, la elección entre ambos coagulantes debe basarse principalmente en su precio.

5.4 Análisis de operación y consumo de agua.

Durante las pruebas de consumo mínimo, esenciales para garantizar el funcionamiento sostenible de la planta, se llegó a la conclusión de que el caudal mínimo requerido es de 6.74, como se detalla en la Tabla 11. Los valores mínimos previos hacen inviable el funcionamiento autónomo de la planta en cuanto abastecimiento nos referimos, valores menores a estos pueden llegar a ocasionar un desabastecimiento en la red de distribución como se observa en la Tabla 10. En este registro se observa que a las 3pm el tanque de distribución alcanzo su mínimo. Lo que implica que debe operar por encima de su capacidad o contar con el apoyo de otra fuente durante los picos de consumo.

En la actualidad, las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) están operando por encima de su capacidad máxima, lo que provoca que los filtros gruesos, al recibir este exceso de caudal, se vean sobrepasados y comiencen a desbordarse, resultando en la expulsión de agua por la parte superior de los mismos.

Tabla 10 Consumos y altura de láminas de agua en los tanques de almacenamiento con un caudal de 6.17 l/s

Funcionamiento planta a 6.17 (l/s)						
hora	macro 2"	consumo 2"	macro 3"	consumo 3"	tanque subterráneo (m)	tanque distribución (m)
8:00:00 AM	189472		322116		2.4	1.85
9:00:00 AM	189483	11	322138	22	1.09	1.85
10:00:00 AM	189493	10	322154	16	0.04	1.76
11:00:00 AM	189502	9	322170	16	0.03	1.64
12:00:00 PM	189510	8	322193	23	0.03	1.58
1:00:00 PM	189520	10	322215	22	0.03	1.45

2:00:00 PM	189526	6	322234	19	0.03	1.36
3:00:00 PM	189534	8	322252	18	0.03	1.04

Tabla 11 Consumos y altura de láminas de agua en los tanques de almacenamiento con un caudal de 6.74 l/s.

Funcionamiento planta a 6.74 (l/s)						
hora	macro 2"	consumo 2"	macro 3"	consumo 3"	tanque subterráneo (m)	tanque distribución (m)
8:00:00 AM	188168		319743		2.4	1.85
9:00:00 AM	188176	8	319766	23	1.92	1.85
10:00:00 AM	188186	10	319784	18	1.68	1.85
11:00:00 AM	188195	9	319801	17	1.18	1.85
12:00:00 PM	188205	10	319822	21	0.03	1.75
1:00:00 PM	188215	10	319839	17	0.05	1.72
2:00:00 PM	188225	10	319857	18	0.03	1.69
3:00:00 PM	188235	10	319871	14	0.04	1.66
4:00:00 PM	188244	9	319884	13	0.03	1.62
5:00:00 PM	188253	9	319895	11	0.03	1.43
6:00:00 PM	188261	8	319905	10	0.04	1.67
7:00:00 PM	188269	8	319916	11	0.03	1.73
8:00:00 PM	188277	8	319926	10	0.03	1.77
9:00:00 PM	188284	7	319935	9	0.08	1.78
10:00:00 PM	188291	7	319944	9	0.09	1.82
11:00:00 PM	188297	6	319952	8	0.12	1.83
12:00:00 AM	188304	7	319960	8	1.16	1.85
1:00:00 AM	188308	4	319965	5	1.78	1.85
2:00:00 AM	188313	5	319971	6	2.14	1.85
3:00:00 AM	188318	5	319977	6	2.43	1.85
4:00:00 AM	188324	6	319984	7	2.75	1.85
5:00:00 AM	188329	5	319992	8	2.73	1.85
6:00:00 AM	188336	7	320002	10	2.67	1.85
7:00:00 AM	188343	7	320014	12	2.52	1.85
8:00:00 AM	188354	11	320034	20	2.34	1.85

Sin embargo, a pesar de que las estructuras operan por encima de su capacidad y experimentan un aumento en la turbidez debido a las precipitaciones en la cuenca, se ha observado

que estas cumplen cabalmente con su función, ya que logran reducir considerablemente la turbiedad del agua que ingresa a la planta, tanto durante los periodos de lluvia, cuando se obtienen los niveles más altos de turbidez, como en los tiempos de verano, cuando la calidad del agua es óptima ver (Tabla 12) e ilustración 13.

Es importante tener en cuenta que, aunque la planta funcione adecuadamente, superando los máximos de diseño, con el tiempo podrían surgir otros inconvenientes en las estructuras que actualmente ya presentan problemas, como el desbordamiento o agrietamiento de algunas unidades de los filtros gruesos. Estos aspectos deben ser considerados y abordados para garantizar la sostenibilidad y eficiencia a largo plazo de la planta.

Tabla 12 Turbiedades en cada una de las estructuras.

	Hora	Turbiedad a la entrada de la PTAP (NTU)	Turbiedad efluente filtros gruesos (NTU) (16)	Turbiedad efluente floculador-sedimentador (34)	Turbiedad filtros rápidos (28)	Turbiedad efluente cloración (27)
24/05/2023	7:00	2.56	1.22	1.15	0.9	0.99
	8:00	2.77	1.65	1.3	0.94	1.07
	9:00	2.62	1.55	1.58	0.92	1.15
	10:00	2.52	1.39	1.4	0.98	1.06
	11:00	2.88	1.62	1.61	0.98	1.18
	12:00	3.72	1.85	1.84	0.98	1.3
	13:00	3.45	1.84	1.68	0.95	1.13
	14:00	3.01	1.83	1.52	0.93	0.95
	15:00	2.9	1.67	1.43	0.95	1.07
	16:00	105	8.1	1.3	0.85	0.85
	17:00	98	8.9	1.33	0.84	0.89
	18:00	10	2.47	1.35	0.83	0.9

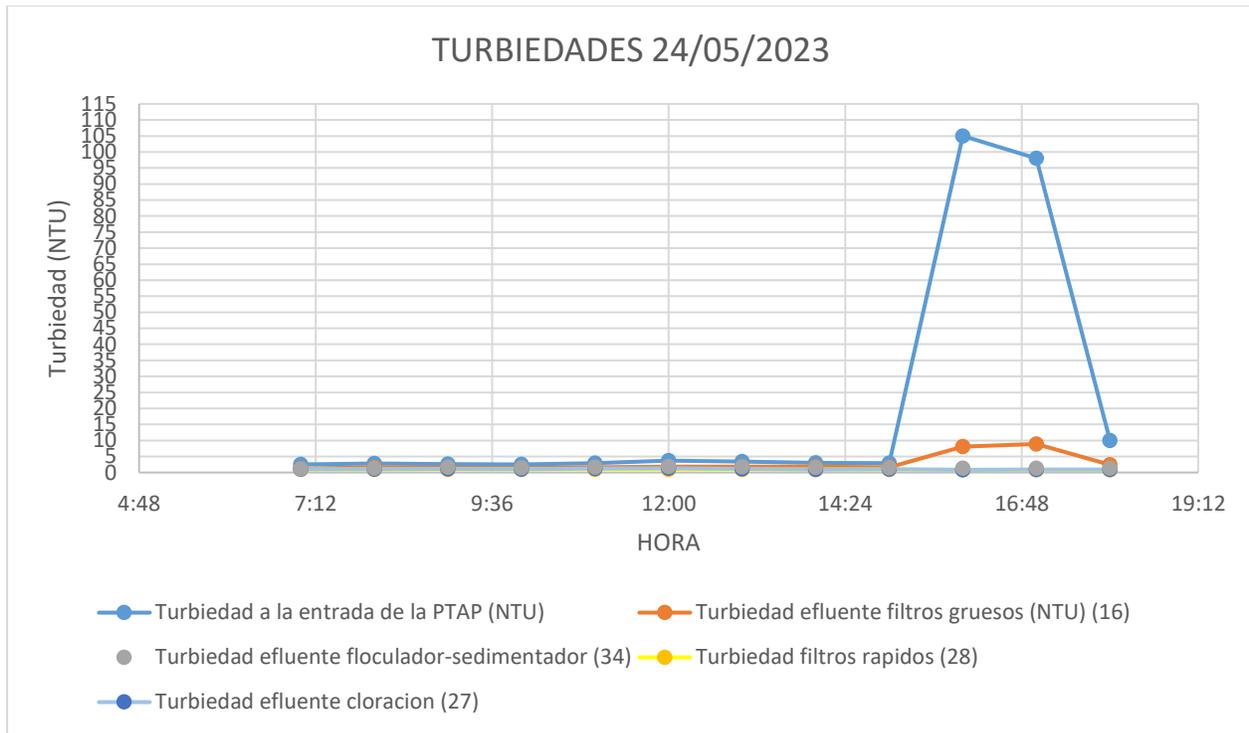


Ilustración 13: Grafica de turbiedades en cada una de las estructuras

En la Ilustración 13, se puede apreciar que la turbidez se mantiene constante en todas las estructuras con valores por debajo de 5 NTU. Sin embargo, es interesante destacar que alrededor de las 3 de la tarde, cuando comienza la lluvia, se registra un aumento notable en la turbidez únicamente en la entrada de la PTAP, que nos proporciona información sobre la turbidez del agua cruda que ingresa a la planta. En este punto, la turbidez alcanza un pico cercano a los 110 NTU como resultado de las condiciones climáticas adversas. Posteriormente, experimenta una caída significativa en las estructuras de los filtros gruesos, descendiendo a valores inferiores a 10 NTU. Este descenso continúa en las estructuras siguientes, manteniéndose la turbidez por debajo de los 5 NTU, lo que demuestra la efectividad del proceso de tratamiento a pesar de las variaciones provocadas por las lluvias. Sin embargo, es importante resaltar la importancia del ajuste de las dosis de coagulantes para favorecer el proceso y mejorar la eficiencia.

6. Conclusiones

La optimización de una planta de tratamiento de agua potable es esencial para garantizar un suministro eficiente y de calidad. Se mejoró la entrada de agua aumentando la abertura del vertedero para tener claridad de la cantidad de agua que ingresa a la planta de tratamiento sin embargo se debe reconsiderar la modificación y la nueva obtención de un vertedero debido a que la estructura existente no funciona como un regulador de caudal si no como un aforador del caudal que ingresa sin posibilidades de controlar el mismo.

El caudal mínimo con el que la planta puede mantener un flujo constante hacia la red en días de máximo consumo es de aproximadamente 6.74 l/s. Sin embargo, la planta principal solo está capacitada para tratar alrededor de 5 l/s. Esto implica que, para mantener un suministro constante a los usuarios, se debe sobrecargar la planta con un caudal mayor al máximo indicado por el fabricante, lo que repercute negativamente en los procesos y también contribuye en el deterioro de las estructuras lo que hoy en día ya se observa.

Debido a la alta demanda que supera los límites establecidos, se necesita ampliar la capacidad de la planta y solicitar un aumento en la concesión existente.

A partir de las pruebas de jarras se logró observar que el coagulante que mejor se adaptó a las características del agua de la fuente es el sulfato de aluminio tipo A consultando con los proveedores encontramos que de igual forma este es el coagulante con el menor precio por lo cual lo hace el óptimo para el tratamiento en la planta.

La capacitación del personal es crucial para el funcionamiento adecuado de la planta, especialmente durante cambios de personal, para evitar riesgos en la satisfacción de la demanda de agua potable.

7. Recomendaciones.

Se sugiere que el acueducto considere la implementación de un nuevo vertedero o, en su defecto, realice mejoras en el vertedero actual con el objetivo de ejercer un control efectivo sobre el caudal que ingresa actualmente a la planta de tratamiento. Esto permitirá mitigar los desperdicios generados debido a la capacidad limitada de la planta en la actualidad.

Además, se recomienda operar la planta sin exceder su capacidad máxima de diseño. Sin embargo, dado que la demanda de la red requiere un caudal mayor al máximo que la planta puede tratar, se sugiere tomar medidas de contingencia en casos en los que la planta y los tanques de almacenamiento no puedan satisfacer dicha demanda de manera efectiva. En estos casos, se propone permitir el funcionamiento de la segunda bocatoma. Aunque no todo el proceso de tratamiento se llevaría a cabo, se podría realizar un proceso de pulimiento en la zona del tanque de alimentación, gracias a los filtros ubicados en esa área y a la calidad aceptable de las aguas provenientes de la quebrada El Atravesado, las cuales presentan una turbidez promedio de aproximadamente 5 NTU.

Es importante monitorear constantemente, al menos cada dos horas, la turbidez con la que ingresan estas aguas crudas a la bocatoma, tomando precauciones para evitar que la turbidez supere los 15 NTU, ya que esto podría obstruir los filtros de manera más rápida.

En caso de no ser factible seguir la recomendación anterior, se sugiere adaptar tuberías de rebosamiento a los filtros gruesos. Esto permitiría redirigir las aguas que los filtros no pueden procesar de nuevo a la quebrada, disminuyendo considerablemente el desperdicio de agua en la planta de tratamiento.

8. Referencias

- Colombia, C. C. (24 de julio de 2015). Accion de tutela para solicitar proteccion del derecho al agua [Sentencia T-245/16]. <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2016/t-245-16.htm>
- Lux, M.A. (2010). *Medidores de flujo en canales abiertos* [tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Studocu .www.studocu.com/co/document/universidad-eafit/hidraulica-aplicada/medidores-de-flujo-en-canales-abiertos-hidraulica/25448758
- ONU. (20 de 1 de 2003). Cuestiones sustantivas que se plantean en la aplicación del pacto internacional de derechos económicos, sociales y culturales. [El derecho al agua (artículos 11 y 12 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales)]. <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2012/8789.pdf>
- ONU. (28 de julio de 2010). Decenio internacional para la acción "el agua fuente de vida". [El derecho humano al agua y al saneamiento]. https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml
l#:~:text=El%2028%20de%20julio%20de,de%20todos%20los%20derechos%20humanos.
- VIVIENDA, M. D. (8 de junio de 2017). resolución 0330. Obtenido de <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>