



**Evaluación integral del estado de operación y funcionamiento de la planta de tratamiento
de agua potable La Mulata del municipio de Mocoa - Putumayo**

Leidy Estefanía Moreno David

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniera Sanitaria

Asesora

Yudy Andrea Londoño Cañas, doctora en ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín

2025

Cita	(Moreno David, 2025)
Referencia	(Moreno David, L. E. (2025). <i>Evaluación integral del estado de operación y funcionamiento de la planta de tratamiento de agua potable La mulata del municipio de Mocoa – Putumayo</i> . [Trabajo de Grado]. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



Grupo de investigación GDCON



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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.

Dedicatoria

A mis padres, Hebert y Flor, por su apoyo constante, por ser mi guía y mi mayor ejemplo. A mis hermanos, Alexánder y Laura, por compartir conmigo risas, lágrimas y sueños. A mi hijo Samuel, mi razón de ser, este triunfo te pertenece. A Andrés, gracias por tu cariño, por ser mi compañero de estudio y por inspirarme a dar lo mejor de mí. A mis familiares, por su afecto incondicional. Y a mi gran amigo Lukas, que, aunque ya no esté a mi lado, vive en mi recuerdo; gracias por las noches de desvelo y tu amor eterno. Este logro también es de ustedes.

Agradecimientos

A Aguas Mocoa y a la ingeniera Jineith Rodríguez por su apoyo y por permitirme desarrollar este trabajo de grado en la PTAP La Mulata. Agradezco de manera especial a mi asesora, Andrea Londoño, por su colaboración en el desarrollo de esta investigación. A mi alma máter, por brindarme la oportunidad de alcanzar una de mis metas. Y un agradecimiento a los profesores y al semillero de investigación Aliados por el planeta por su calidad humana, profesionalismo y por el apoyo brindado a lo largo de mi trayectoria académica.

Tabla de contenido

Resumen	14
Abstract	15
1. Introducción	16
2. Planteamiento del problema.....	17
3. Justificación	18
4. Objetivos	19
4.1 Objetivo general	19
4.2 Objetivos específicos.....	19
5. Marco teórico	20
5.1 Normatividad.....	20
5.1.1 Sector de agua potable	20
5.1.2 Índices de calidad del agua	20
5.2 Teoría de las 6C.....	21
5.3 Sistemas de tratamiento.....	22
5.4 Antecedentes del sistema de potabilización en Mocoa	23
5.5 Antecedentes de la ampliación de la cobertura del servicio de agua	29
5.6 Cobertura.....	32
5.7 Problemáticas del sistema	33
6. Metodología.....	34
6.1 Revisión de la literatura.....	34
6.2 Área de estudio.....	35
6.3 Diagnóstico del sistema de potabilización	36
6.3.1 Diagnóstico del sistema hidráulico y de las componentes de la PTAP La Mulata.....	36
6.3.2 Análisis de la eficiencia de la PTAP: Calidad del agua.....	39

6.3.3 Análisis del servicio agua potable en el municipio de Mocoa a través de la evaluación de las 6C.....	40
6.4 Elaboración del informe	40
6.5 Elaboración del recurso audiovisual	41
7. Resultados	42
7.1 Diagnóstico del sistema de potabilización	42
7.1.1 Diagnóstico de hidráulico y de componentes de la PTAP La Mulata	42
7.2 Análisis del tren de tratamiento de la PTAP	57
7.2.1 Alternativas para tratar altas turbiedades que llegan a la PTAP La Mulata	57
7.2.2 Alternativas para la mezcla rápida	58
7.2.3 Alternativas para la mezcla lenta	61
7.2.4 Alternativas en la sedimentación	61
7.2.5 Alternativas en la desinfección	62
7.3 Análisis de la eficiencia de la PTAP: Calidad del agua	62
7.3.1 Fuentes de abastecimiento	62
7.4 Análisis del servicio agua potable en el municipio de Mocoa a través de la evaluación de las 6C (calidad, cantidad, continuidad, cobertura, costo y cultura hídrica)	70
7.4.1 IRCA al agua tratada.....	70
7.4.2 Cobertura.....	75
7.4.3 Continuidad.....	76
7.4.4 Cantidad	79
7.4.5 Cultura hídrica	81
7.4.6 Costo	82
7.5 Cálculo del IRABAm	87
8. Discusión.....	89
9. Conclusiones	90

Referencias91

Anexos.....95

Lista de tablas

Tabla 1 Fuentes de captación de la PTAP La Mulata	24
Tabla 2 Tanques de almacenamiento	31
Tabla 3 Número de suscriptores de Aguas Mocoa S.A. E.S.P.....	33
Tabla 4 Fichas técnicas de cada una de las unidades de tratamiento de la PTAP La Mulata	36
Tabla 5 Datos de diseño de la cámara de aquietamiento.....	42
Tabla 6 Datos de diseño del canal de entrada	44
Tabla 7 Datos de diseño del vertedero	45
Tabla 8 Datos de diseño de los floculadores	48
Tabla 9 Datos de diseño de los sedimentadores	51
Tabla 10 Datos de diseño de las unidades de filtración	54
Tabla 11 Alternativas para la PTAP La Mulata.	62
Tabla 12 Mapa de riesgo del río Mulato	64
Tabla 13 Mapa de riesgo de la quebrada Chontayaco.....	66
Tabla 14 Mapa de riesgo de la quebrada Mulatico	67
Tabla 15 Puntajes de riesgo asociados a los parámetros evaluados en el IRCA del río Mulato del 2020.....	68
Tabla 16 Puntajes de riesgo asociados a los parámetros evaluados en el IRCA de la quebrada Chontayaco del 2020.....	69
Tabla 17 Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la Red 1	70
Tabla 18 Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la Red 2	71
Tabla 19 IRCA por muestra por persona prestadora (Decreto 1575/2007)	73
Tabla 20 Consolidado del IRCA Anual por Municipio (Decreto 1575/2007) para el período 2020-2024.....	74
Tabla 21 Continuidad del servicio de agua potable en la zona norte, suroccidente y centro.....	76
Tabla 22 Número de descolmataciones correctivas en las bocatomas del 2023	79

Tabla 23 Consumo mensual de una vivienda durante enero y junio del 202382

Tabla 24 Consumo total facturado83

Tabla 25 Número de medidores instalados83

Tabla 26 Tarifas 2023 y 2024.....84

Tabla 27 Subsidios85

Tabla 28 Contribuciones85

Lista de figuras

Figura 1	Sistema de acueducto de Aguas Mocoa y sus fuentes de abastecimiento	26
Figura 2	PTAP La Mulata previo a la reconstrucción del sistema de acueducto de Mocoa.....	27
Figura 3	PTAP La Mulata tras la reconstrucción del sistema de acueducto de Mocoa	29
Figura 4	Fases del desarrollo metodológico del proyecto.....	34
Figura 5	Ubicación de la PTAP La Mulata.....	35
Figura 6	Caseta de contacto con cloro	57
Figura 7	Distancia al punto de aplicación del coagulante.....	60
Figura 8	Punto No. 2 de la Red 2.....	75
Figura 9	Histórico de reportes del estado de prestación del servicio de acueducto	78
Figura 10	Factura de acueducto de Mocoa	86
Figura 11	Factura de acueducto de Medellín	86

Lista de gráficas

Gráfica 1 Caudales Unitarios recomendados para la mezcla rápida en vertedero para caudales mayores entre 10 y 500 L/s – Método Lozano-Rivas	47
Gráfica 2 Consumo diario en Mocoa	79
Gráfica 3 Histórico de promedio de consumo por uso y estrato	80
Gráfica 4 Histórico de promedio de consumo por zona.....	80
Gráfica 5 Consumo residencial promedio mensual	81

Ecuaciones

Ecuación 1 Altura del vertedero	47
Ecuación 2 Ancho del vertedero	47
Ecuación 3 Distancia al punto de aplicación del coagulante – Ecuación de Scimeni.....	60
Ecuación 4 Distancia al punto de aplicación del coagulante.....	60
Ecuación 5 IRCA.....	68
Ecuación 6 Cobertura	76
Ecuación 7 IRABAm.....	87
Ecuación 8 IRABApp.....	87

Siglas, acrónimos y abreviaturas

UdeA	Universidad de Antioquia
PTAP	Planta de tratamiento de agua potable
IRABAm	Índice de riesgo municipal por abastecimiento
IRCA	Índice de riesgo de la calidad del agua
DANE	Departamento Nacional de Estadística
MWH	Montgomery Watson Harza Engineering Company
m	Metros
m²	Metros cuadrados
m³	Metros cúbicos
cm	Centímetros
s	Segundos
mg	Miligramos
L	Litros
ml	Mililitros
Vel.	Velocidad
min.	Minutos
No.	Número
m s. n. m.	Metros sobre el nivel del mar
N	Norte
O	Oeste
<	Menor que
>	Mayor que
=	Igual que
%	Porcentaje
°	Grados
DQO	Demanda química de oxígeno
DBO	Demanda biológica de oxígeno
UNT	Unidad nefelométrica de turbidez
pH	Medida del grado de acidez o alcalinidad

UPC	Unidades de color platino-cobalto
UFC	Unidades formadoras de colonia
cód.	Código
RAS2000	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico
RAS2010	Manuales de Buenas Prácticas de Ingeniería modificados en 2010
SIVICAP	Sistema de Información para la Vigilancia de la Calidad del Agua Potable
SUI	Sistema Único de Información
INS	Instituto Nacional de Salud

Resumen

Este trabajo de grado evaluó la operación y el funcionamiento de la PTAP La Mulata en Mocoa, Putumayo. Se analizaron los índices de calidad del agua de las fuentes de abastecimiento (río Mulato y quebradas Chontayaco y Mulatico), se elaboró un mapa de riesgo para identificar contaminantes y se evaluaron los procesos unitarios de la planta comparándolos con la normativa colombiana vigente. Además, se estimó la calidad, cantidad, continuidad, cobertura, costo, cultura hídrica y el índice de riesgo municipal por abastecimiento de agua. Como resultado, se propusieron alternativas de optimización para la planta, y se produjo una pieza audiovisual para fortalecer la cultura del agua y promover buenas prácticas en el uso del recurso hídrico.

Palabras clave: Planta de tratamiento de agua potable, normativas, parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, IRABAm, IRCA, cámara de entrada, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y almacenamiento.

Abstract

This degree project evaluated the operation and functioning of the La Mulata Water Treatment Plant in Mocoa, Putumayo. An analysis of water quality indices from the supply sources (Mulato River and Chontayaco Creek) was conducted, a risk map was created to identify contaminants, and the plant's unit processes were evaluated against current Colombian regulations. Furthermore, aspects such as water quality, quantity, continuity, coverage, cost, water culture, and the municipal water supply risk index were assessed. As a result, optimization alternatives for the plant were proposed, and an audiovisual product was created to strengthen water culture and promote best practices in water resource management.

Keywords: Drinking water treatment plant, regulations, physicochemical and microbiological parameters, IRABAm, IRCA, inlet chamber, coagulation, flocculation, sedimentation, filtration, disinfection and storage.

1. Introducción

El acceso al agua potable es un derecho fundamental y una necesidad básica para el desarrollo humano. Sin embargo, en Colombia, la cobertura de este servicio varía significativamente entre departamentos y aún en la actualidad sigue siendo un desafío el lograr una mayor cobertura. Según datos suministrados por el DANE para el año 2018, el departamento del Putumayo reportó una cobertura de agua potable del 51.7%, mientras que el municipio de Mocoa alcanzó el 91.3% de cobertura (DANE, 2018).

Aguas Mocoa S.A. E.S.P. es la empresa encargada de operar la planta de tratamiento La Mulata, suministrando agua potable a las zonas nororiental, centro y suroccidente (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2022). Para el año 2023, esta planta alcanzó una cobertura del 75.8%. Por otro lado, se determinó que las pérdidas mensuales son el 74% del total del agua tratada, lo que equivale a 297500 m³ de agua (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021).

Durante la temporada de lluvias las bocatomas y aducciones han sido afectadas por represamientos, inundaciones y socavación, lo que ha ocasionado la suspensión del servicio. Asimismo, la presencia de vertimientos de aguas residuales provenientes de viviendas y actividades económicas como la agricultura, ganadería, minería y extracción de material de arrastre han afectado la calidad de las fuentes de abastecimiento (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021).

Este trabajo de grado evaluó la operación y el funcionamiento de la PTAP La Mulata en términos de su idoneidad para prestar el servicio a partir del análisis de las 6C que incluye calidad, cantidad, continuidad, cobertura, costo y cultura hídrica. Para lograr este objetivo, se realizó una investigación cualitativa y cuantitativa, basada en la revisión de documentos técnicos, reportes de laboratorio de las fuentes abastecedoras y del agua tratada y una visita a la PTAP La Mulata. Además, se diagnosticó el estado de la infraestructura y la eficiencia de la Planta mediante los parámetros de diseño establecidos en la normatividad vigente colombiana, luego se identificó las posibles fallas en la cámara de entrada, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Finalmente, se propuso medidas correctivas para su optimización y así garantizar el cumplimiento de la normatividad. Con los resultados de este proyecto se elaboró una pieza audiovisual para fomentar la importancia del agua potable, los procesos de tratamiento y los hábitos de consumo responsable.

2. Planteamiento del problema

El acceso al agua potable en Colombia, especialmente en regiones como el Putumayo, sigue siendo un desafío (Díaz et al., 2014), debido a la ineficiencia de los sistemas de abastecimiento, la intermitencia del servicio y la dificultad para satisfacer la creciente demanda.

En Mocoa, la PTAP La Mulata, abastece al 75.8% de la población. Sin embargo, presenta deficiencias operativas que causan frecuentes interrupciones en el suministro, impactando negativamente la continuidad del servicio (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021).

Las interrupciones en el suministro se deben principalmente a la vulnerabilidad de la PTAP La Mulata ante eventos climáticos. Durante la temporada de lluvias, el aumento del caudal y la velocidad del río Mulato y la quebrada Chontayaco, junto con deslizamientos de tierra, arrastran sedimentos y material particulado hacia las estructuras de captación. Esta acumulación incrementa significativamente la turbidez del agua, superando la capacidad de tratamiento de la planta lo que ocasiona la suspensión del servicio y limita el acceso continuo al agua (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Además de las interrupciones, la planta no cuenta con la capacidad suficiente para cubrir la demanda total de la población, situación que se agrava en épocas secas debido a la disminución del caudal de las fuentes de abastecimiento. Para mitigar esta escasez, se ha implementado un sistema de sectorización del suministro, con restricciones rotativas y distribución por zonas. Si bien esta medida busca mitigar la situación, genera inconvenientes para los usuarios y evidencia la necesidad de soluciones a largo plazo (Rodríguez, 2024).

Ante esta problemática, resulta necesario realizar una evaluación integral de la PTAP La Mulata. Dicha evaluación permitirá diagnosticar el estado actual de la planta, identificar las deficiencias operativas y proponer soluciones técnicas y operativas que garanticen un suministro de agua potable continuo y que satisfaga la demanda de la población de Mocoa.

3. Justificación

La prestación del servicio de Aguas Mocoa enfrenta interrupciones tanto en épocas de lluvia como temporadas secas. Durante la temporada de lluvias, los altos niveles de turbiedad en las fuentes hídricas dificultan el tratamiento del agua, mientras que, en la época seca, la disminución del caudal reduce la disponibilidad del recurso.

Específicamente, durante las lluvias, la PTAP La Mulata se ve afectada por la turbiedad del agua cruda, la cual excede la capacidad de tratamiento de la planta (Alcaldía de Mocoa, 2023). Esta situación se manifiesta en la suspensión del servicio debido a las fuertes lluvias sobre el río Mulato y Quebradas Mulatico y Chontayaco, que provocan altos niveles de turbiedad y la colmatación de las bocatomas (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2020).

Por otro lado, la disminución del caudal en las fuentes de abastecimiento durante la época seca obliga a la implementación de un sistema de sectorización del servicio, lo que impacta directamente la continuidad del suministro en diferentes zonas según un cronograma preestablecido (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2020). Si bien esta medida busca optimizar la distribución del agua disponible, genera interrupciones que afectan a la comunidad.

Este trabajo de Grado busca realizar una evaluación integral de la planta, analizando los datos de calidad del agua, el estado de la infraestructura y la eficiencia de los procesos. El objetivo es identificar las principales deficiencias y proponer medidas de optimización para garantizar el cumplimiento de la normativa vigente y asegurar un suministro sostenible de agua potable a la comunidad. Además, de diseñar una herramienta educativa para promover el uso eficiente del agua y la conservación del recurso hídrico.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar el estado de operación y funcionamiento de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Mocoa de acuerdo con la normatividad vigente colombiana.

4.2 Objetivos específicos

Analizar las características de calidad de agua de la fuente abastecedora y de agua tratada de acuerdo con los datos registrados por los programas de vigilancia y control.

Diagnosticar el estado de la infraestructura de la PTAP, en cuanto a sus procesos de tratamiento y condiciones hidráulicas e identificar sus deficiencias y proponer alternativas para optimizar su funcionamiento.

Evaluar el proceso de tratamiento de la planta, considerando los aspectos de calidad, cantidad, continuidad, cobertura, costo y cultura hídrica.

Diseñar una ayuda audiovisual dirigida a las instituciones educativas para facilitar la transferencia del conocimiento sobre la importancia del agua potable, los procesos de tratamiento y hábitos de consumo responsable.

5. Marco teórico

5.1 Normatividad

5.1.1 Sector de agua potable

La normativa colombiana para el sector de agua potable y saneamiento básico se fundamenta principalmente en Resolución 0330 de 2017 y Resolución 799 de 2021.

La Resolución 0330 de 2017 constituye el marco normativo de referencia para el sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia. Establece los lineamientos generales que deben seguirse en el diseño, construcción y operación de los sistemas de tratamiento de agua (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017).

La Resolución 799 de 2021 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio es una modificación de la Resolución 330 de 2017, donde se incluyen mejoras en la gestión del recurso hídrico y la calidad de los servicios (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2021).

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, en su Título C, establece criterios para la concepción y el desarrollo de sistemas de potabilización del agua. Este título también orienta la planificación, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la operación, el mantenimiento y el seguimiento de la operación de estos sistemas y sus componentes; sin embargo, su aplicación no es de carácter obligatorio (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2010).

5.1.2 Índices de calidad del agua

La potabilización es un proceso que busca transformar el agua cruda en agua apta para el consumo humano, de acuerdo con los parámetros establecidos en la Resolución 2115 de 2007. La selección y el diseño de los procesos unitarios varían en función de las características específicas del agua cruda, así como de las limitaciones económicas y operativas del sistema. Además, la capacitación del personal es fundamental para asegurar un funcionamiento eficiente y la producción de agua de calidad (Conagua, 2016).

Para garantizar la calidad del suministro de agua potable, es fundamental evaluar la calidad de la fuente de agua cruda de acuerdo con los parámetros establecidos en la Resolución 2115 de 2007 y éstos deben ser evaluados en base a los riesgos identificados en el mapa de riesgo definido en la Resolución 4716 de 2010, al momento de la toma de decisiones y al elaborar el tren de tratamiento (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007).

La Resolución 2115 de 2007 establece el índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA) como una herramienta de gestión de la calidad del agua para tomar acciones de mejora en los sistemas de abastecimiento. Además, se calcula a partir de los resultados de análisis de laboratorio de diversos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y permite evaluar el cumplimiento o no de los requisitos establecidos en esta normativa (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007).

El Índice de Riesgo Municipal por Abastecimiento de Agua (IRABAm) es una escala que va de 0 a 100 puntos. Un valor de 0 indica que el sistema cumple con todos los requisitos de tratamiento, distribución y continuidad, mientras que 100 representa el máximo riesgo, al no cumplir ninguno (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007)

5.2 Teoría de las 6C

La eficacia de un sistema de abastecimiento de agua para consumo humano no se limita a su calidad fisicoquímica y microbiológica, sino que debe considerar las "6C": cantidad, continuidad, calidad, costos, cobertura y cultura hídrica (Mora-Alvarado et al., 2019).

La cantidad o nivel del servicio se refiere a la proporción de la población con acceso a diferentes niveles de abastecimiento, que van desde la carencia total hasta un acceso óptimo, pasando por niveles básico e intermedio (Mora-Alvarado et al., 2019).

Un sistema de abastecimiento de calidad cuenta con un Plan de Seguridad del Agua aprobado, validado y sujeto a auditorías periódicas (Mora-Alvarado et al., 2019)

La continuidad del servicio es el porcentaje de tiempo durante el cual se dispone de agua para consumo, considerando variaciones diarias, semanales y estacionales (Mora-Alvarado et al., 2019).

La cobertura y accesibilidad es el porcentaje de la población con acceso razonable a un sistema de abastecimiento mejorado con agua potable (Mora-Alvarado et al., 2019).

Los costos son la tarifa que pagan los consumidores domésticos (Mora-Alvarado et al., 2019).

En la cultura hídrica implica reconocer el valor del agua y la importancia de su conservación, promoviendo la concientización y sensibilización sobre sus múltiples dimensiones: éticas, ambientales, sociales, económicas, políticas y emocionales. Se fundamenta en el principio universal del derecho humano al agua, a la vida y su relación con el ambiente, la salud y el desarrollo de todas las formas de vida (Mora-Alvarado et al., 2019).

5.3 Sistemas de tratamiento

El tratamiento del agua para consumo humano implica diversos procesos cuya complejidad varía según las características del agua cruda. Su importancia radica en la eliminación de microorganismos patógenos, sustancias tóxicas o nocivas para la salud. Por tanto, el agua debe cumplir ciertas normas bacteriológicas y físico-químicas para que pueda ser considerada potable (Chulluncuy, 2011). Además de remover las sustancias perjudiciales para la salud, la purificación del agua busca mejorar sus cualidades organolépticas, como la turbidez, el color y el olor (Garavito, 1973).

El sistema de tratamiento de agua potable de Mocoa está compuesto por un sistema convencional que incluye una cámara de aquietamiento, un canal de entrada, un vertedero para mezcla rápida, floculadores para mezcla lenta, sedimentadores, filtración y desinfección (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

- La cámara de aquietamiento: es un componente esencial en las plantas de tratamiento de agua potable, diseñado para reducir la velocidad del flujo de agua a la entrada del sistema. Esta reducción de velocidad es fundamental para garantizar una distribución uniforme del caudal y mejorar las condiciones hidráulicas en las etapas posteriores del proceso (Facultad de ingeniería - Universidad del Quindío, 2009).
- La coagulación química usa coagulantes (comúnmente sales de aluminio o hierro) para neutralizar la carga de partículas suspendidas en el agua. Esto permite la formación de flóculos que se separan fácilmente, removiendo turbiedad y color. El pH y la alcalinidad del agua afectan su eficacia (Vargas, 2004), por tanto, deben ser variables controladas

durante el proceso.

- La floculación: el agua coagulada se agita suavemente para promover el crecimiento de los flóculos. Esta agitación, con velocidades decrecientes, facilita la formación de flóculos grandes que se separarán fácilmente en la etapa de sedimentación. La energía para la agitación puede ser hidráulica o mecánica (Vargas, 2004).
- La sedimentación es el proceso mediante el cual se separa las partículas suspendidas en agua mediante la acción de la gravedad, aprovechando condiciones de reposo para que las partículas más densas se depositen. Se complementa con la coagulación para mejorar la remoción de partículas (Vargas, 2004).
- La filtración es un proceso de purificación de agua que consiste en hacerla pasar a través de un medio poroso, comúnmente arena, aunque también se utilizan otros materiales como antracita y granate. Al pasar el agua a través de este medio, se retienen las partículas sólidas suspendidas, que no lograron ser retenidas en el proceso de sedimentación, mediante diversos mecanismos de remoción. La eficiencia de la filtración depende tanto de las características del agua a tratar como de las propiedades del medio filtrante. La filtración se puede emplear como tratamiento único cuando el agua presenta baja turbiedad, o bien como etapa final de pulido después de otros procesos en el tratamiento de aguas más turbias (Vargas, 2004).
- La desinfección se centra en la eliminación de microorganismos patógenos del agua tratada, utilizando principalmente cloro u ozono. Este proceso no solo completa la remoción de microorganismos que no fueron retenidos en la filtración, sino que también es fundamental para mantener la calidad del agua durante su transporte y distribución (Vargas, 2004).

5.4 Antecedentes del sistema de potabilización en Mocoa

La red de distribución de agua potable en la cabecera municipal de Mocoa se divide en cinco zonas, cuatro de las cuales son operadas por Aguas Mocoa S.A. E.S.P, estas son: la zona 1 (Suroccidente), 2 (Centro), 4 (Nororienté) y 5 (Zona de expansión), mientras que la zona 3 (Noroccidente - Barrios Unidos) está a cargo del Acueducto Comunitario Barrios Unidos (Ver Figura 1) (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021). En total, estas zonas abarcan 97 barrios, distribuidos

de la siguiente manera: 24 en la zona 1, 31 en la zona 2, 16 en la zona 3, 22 en la zona 4 y 4 en la zona en desarrollo (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Aguas Mocoa S.A. E.S.P., es una sociedad anónima constituida por acciones mediante documento privado número 01 del 13 de diciembre de 2012, conforme al artículo 2°, numeral 1° de la Ley 1429 de 2010 y el artículo 1° del Decreto 545 de 2011 (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023). Su estructura accionaria se compone de la siguiente manera: la Alcaldía de Mocoa con el 99% y la Empresa de Servicios Comerciales y Administrativos y Terminal Provisional de Transporte de Mocoa con el 1%. Adicionalmente, la construcción de la PTAP La Mulata se inició el 11 de mayo de 2002 y comenzó a operar el 25 de enero de 2013 (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

La Tabla 1 presenta las fuentes de captación de la PTAP La Mulata, sus zonas de abastecimiento y los riesgos asociados a su calidad y estado.

Tabla 1

Fuentes de captación de la PTAP La Mulata

Sistema	Fuente	Zonas que abastece	Riesgos de calidad o estado del sistema	Habilitado/ Deshabilitado
Las Palmeras	Río Mulato (ver Figura 1)	1 y 4	Actualmente, la captación de agua en la PTAP La Mulata se continúa realizando en el río Mulato a través del Sistema Palmeras (ver Figura 1); sin embargo, debido al daño en su bocatoma, se construyeron dos captaciones artesanales que, mediante una tubería, conducen el agua a un desarenador preexistente y, desde allí, a la planta para su tratamiento y posterior distribución.	Habilitado
El Líbano	Río Mulato (ver Figura 1)	2	Su zona de influencia fue afectada por actividades antrópicas, que incluyen la extracción de material de arrastre y actividades agrícolas. Asimismo, se identificaron 24 vertimientos de aguas residuales. La PTAP La Mulata utilizó esta bocatoma para suministrar agua a la zona 2 hasta 2021.	Deshabilitado

			Adicionalmente, en el 2021 esta fuente fue descartada debido a sus altos niveles de turbiedad y a la ausencia de un tratamiento previo antes de su distribución a la población.	
Acueducto Comunitario Barrios Unidos	Quebradas Taruquita y Conejo	3	Sin información.	Habilitado
Acueducto Alto Afán	Quebrada El Almorzadero (ver Figura 1)	4	<p>En cuanto a la bocatoma El Almorzadero, esta abastecía al sector nororiental de la población, incluyendo usuarios rurales en las veredas Alto Afán y Pueblo Viejo, así como nuevos barrios de desplazados en zonas aledañas. Sin embargo, la rehabilitación de su desarenador no se consideró viable, ya que su capacidad de 23.4 L/s resulta insuficiente para satisfacer la demanda futura del sistema, estimada en 218 L/s según el estudio de demanda.</p> <p>Además, la conducción presentaba graves deficiencias ya que más del 70% de la tubería está expuesta a la intemperie, presenta múltiples perforaciones y varios tramos elevados son soportados de forma artesanal.</p> <p>En cuanto al tanque de almacenamiento, si bien no presenta problemas estructurales que comprometan su estabilidad, se observa la proliferación de algas y moho en los muros debido a la humedad ambiental y la falta de mantenimiento preventivo. Adicionalmente, se acumula agua lluvia en la cubierta.</p>	Deshabilitado
Sistema alternativo	Quebradas Mulatico y	2	El agua captada de estas fuentes, después de pasar por un nuevo	Habilitado

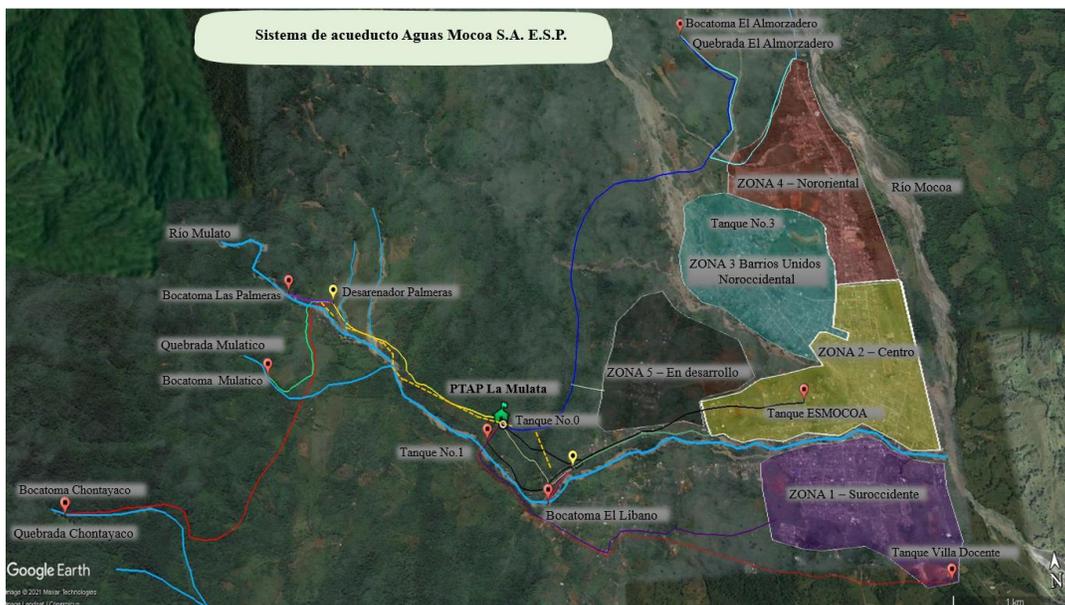
	Chontayaco (ver Figura 1)		desarenador, se transporta a través de una línea de aducción paralela al sistema Palmeras. No obstante, la PTAP La Mulata no está diseñada para procesar este caudal adicional, y considerando que estas fuentes presentan niveles de turbiedad cercanas a cero, el agua se somete a un proceso de cloración y se distribuye directamente.
--	---------------------------	--	--

Nota. Adoptado de (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017), (Quenoran , 2017), (Rodríguez, 2024) y (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

La Figura 1 representa el sistema de acueducto de Aguas Mocoa, mostrando las bocatomas utilizadas anteriormente (El Líbano y El almorzadero) y las actualmente en uso (Palmeras, Mulatico y Chontayaco). La línea amarilla continua indica la línea de aducción del Sistema Las Palmeras hacia la PTAP La Mulata (identificada con una casa verde). La línea amarilla discontinua representa la línea de aducción del sistema alternativo. Además, se observan los tanques de almacenamiento de agua (identificados como No. 0, 1, 3, Villa Docente y ESMOCOA) y las cinco zonas de distribución de agua en Mocoa.

Figura 1

Sistema de acueducto de Aguas Mocoa y sus fuentes de abastecimiento

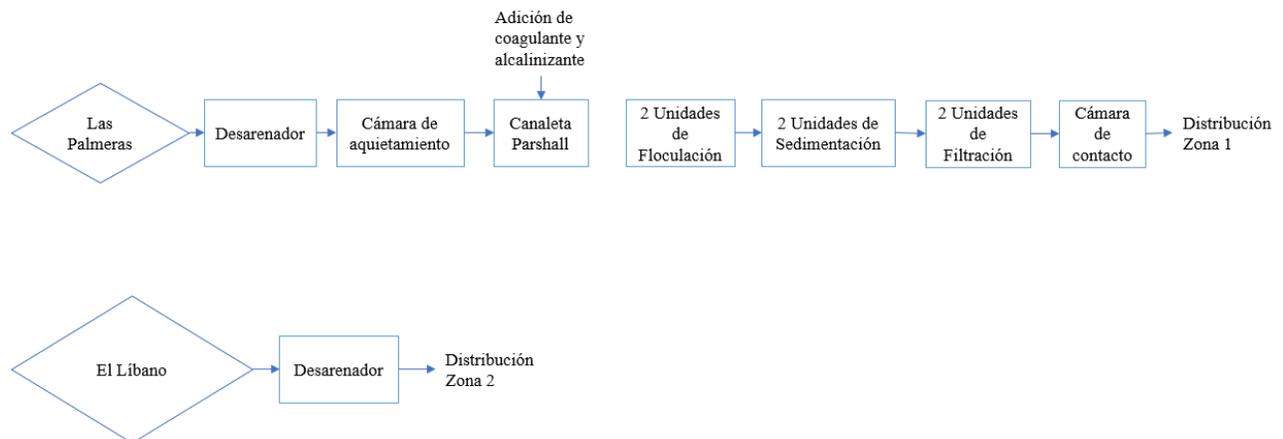


Nota. Fuente Adaptado de (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Por otra parte, el diseño de la PTAP La Mulata, previo a la reconstrucción del sistema de acueducto (ver Figura 2), incluía una cámara de aquietamiento sin canal de entrada, una canaleta Parshall de 9 pulgadas para la medición de caudal, dos floculadores hidráulicos verticales con ocho cámaras cada uno, dos sedimentadores de alta tasa con placas planas de asbesto cemento (AC) para la remoción del floc, ocho unidades de filtración con lecho filtrante mixto compuesto por arena y antracita, un lecho de soporte conformado por grava y un sistema de drenaje con viguetas prefabricadas tipo V invertida. La desinfección se llevaba a cabo mediante la adición de cloro gaseoso en solución en un tanque de contacto (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Figura 2

PTAP La Mulata previo a la reconstrucción del sistema de acueducto de Mocoa



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Nota. (a) Esquema del sistema Las Palmeras y El Líbano antes de la reconstrucción del sistema de acueducto de Mocoa Fuente Adaptado de (Agua Mocoa S.A. E.S.P., 2024). (b) Canaleta Parshall del sistema Las Palmeras Fuente (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). (c) Sedimentador del sistema Las Palmeras Fuente (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). (d) Floculador del sistema Las Palmeras Fuente (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). (e) Filtros del sistema Las Palmeras Fuente (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). (f) Caseta de contacto con cloro del sistema Las Palmeras Fuente (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

5.5 Antecedentes de la ampliación de la cobertura del servicio de agua

Tras el proyecto de reconstrucción, el diseño de la PTAP La Mulata se modificó. Ahora, la planta incluye una cámara de quietamiento, un canal de entrada y un vertedero para la mezcla rápida (ver Figura 3). Desde este punto, el agua se distribuye, a través de una cámara de distribución, a dos trenes de tratamiento en paralelo: uno existente y uno nuevo. El tren nuevo tiene una capacidad de diseño de 107.5 L/s, mientras que el existente tiene una capacidad de 100 L/s. En cada tren se llevan a cabo los procesos de floculación, sedimentación y filtración. El agua filtrada en el tren existente pasa por una cámara de contacto con cloro antes de ser almacenada y distribuida a la zona 1 y 4. En cambio, el agua tratada en el nuevo tren se conduce directamente al tanque de almacenamiento para su posterior distribución a la zona 2. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Figura 3

PTAP La Mulata tras la reconstrucción del sistema de acueducto de Mocoa



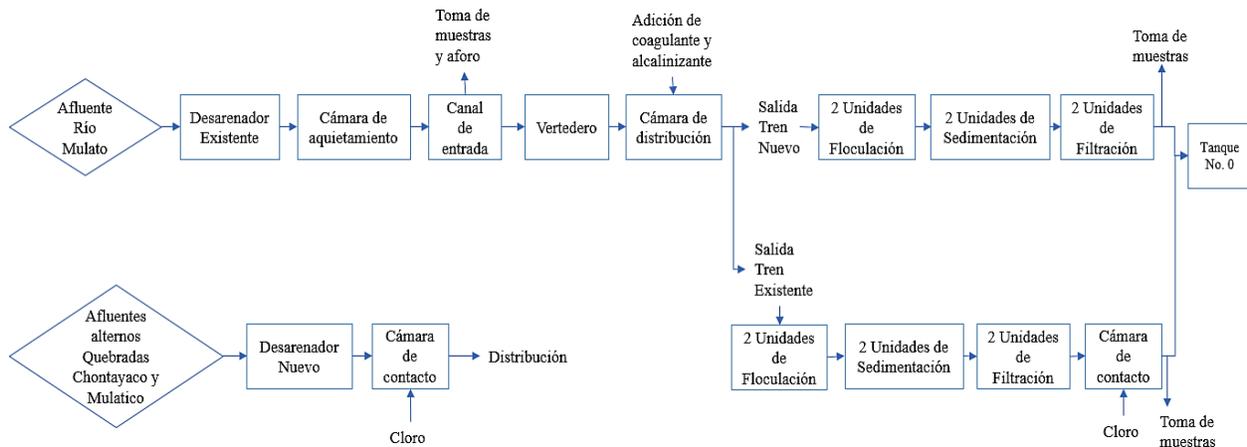
(a)



(b)



(c)



(d)

Nota. (a) Tren de tratamiento nuevo Fuente Propia. (b) Tren de tratamiento existente Fuente Propia. (c) PTAP La Mulata en construcción Fuente Adaptado de (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024). (d) Esquema del actual sistema de potabilización de la PTAP La Mulata Fuente Adaptado de (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024) y (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Por otro lado, la composición de los lodos producidos en la PTAP La Mulata incluye hidróxidos metálicos de aluminio y una variedad de partículas sólidas como arcilla, limo y materia orgánica e inorgánica. Aunque la planta no dispone actualmente de un sistema de tratamiento de lodos, se proyecta la implementación de un sistema de gestión que comprenderá: decantadores estáticos de flujo intermitente para el tratamiento de los lodos procedentes de los sedimentadores y filtros; lagunas de secado gravitacional donde, mediante evaporación e infiltración, se concentrarán los lodos provenientes de los decantadores estáticos; y un patio de almacenamiento temporal para la pasta de lodo desecada, previo a su disposición final en un sitio autorizado (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017). No obstante, en la actualidad, los lodos generados se disponen en un lote cercano sin la debida autorización de la autoridad ambiental (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Además, la planta dispone de unos tanques de almacenamientos con una capacidad total de almacenamiento de 3719 m³. Dentro de sus metas a largo plazo se encuentra la construcción del tanque No. 3 con capacidad de 803 m³ y del tanque No. 4 con capacidad de 422 m³ (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017). En la Tabla 2 se observan los tanques de almacenamiento de la PTAP La Mulata.

Tabla 2

Tanques de almacenamiento

Número	Foto	Ubicación	Capacidad (m ³)	Zona
Tanque No.0		Instalaciones PTAP	576	Almacena agua tren de tratamiento nuevo y existente
Tanque No.1		Vereda Palmeras (Ingreso a PTAP)	927	Recibía agua de la Bocatoma El Líbano. Almacena agua tren de tratamiento nuevo y existente.
Tanque No.2		Vereda Guaduales	1533	4
Tanque ESMOCOA		La loma (Oficinas de Aguas Mocoa)	610	2

Tanque Villa Docente		Barrio Villa Docente	73	1
----------------------	---	----------------------	----	---

Nota. Adoptado de (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024) y (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021).

Es importante mencionar que las obras de reconstrucción del Sistema de Acueducto de Mocoa, fueron abandonadas por el contratista con un avance del 90.49%, lo que afectó la cobertura, calidad y continuidad del servicio de acueducto. En consecuencia, esta interrupción impidió garantizar el suministro de agua potable en la zona 2 (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021).

A finales del año 2021, se implementó la instalación de cuatro macromedidores en la PTAP La Mulata, con el fin de obtener una estimación de pérdidas de agua. Adicionalmente, se instalaron siete medidores en las zonas de mayor consumo (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). Para el 31 de diciembre de 2023, en el marco de la Etapa II de reconstrucción del sistema de acueducto de Mocoa, se instalaron 2914 micromedidores, alcanzando una cobertura del 38.05% del total de usuarios (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

Por otra parte, la concesión del río Mulato, con un caudal de 300 L/s y titularidad de Esmocoa E.S.P., tiene vigencia hasta el 2 de diciembre de 2025 y las concesiones del río Chontayaco (250 l/s) y la quebrada Mulatico (33,56 l/s), que expiraron el 8 de octubre de 2019 y el 21 de agosto de 2019, respectivamente, se encuentran a nombre de la Alcaldía de Mocoa (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

5.6 Cobertura

Según Aguas Mocoa S.A. E.S.P (2024) hasta abril del 2024 atendió a 8008 suscriptores, que representan una población de 36036 habitantes (ver Tabla 3).

Tabla 3

Número de suscriptores de Aguas Mocoa S.A. E.S.P

Zona	Acueducto		
	Suscriptores	%	Habitantes
1 - Sur occidente	3058	38%	13761
2 - Centro	3133	39%	14099
4 - Norte	1427	18%	6422
5 - En desarrollo	390	5%	1755
Total	8008	100%	36036

Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

La Zona 3 cuenta con una población de 11633 habitantes y 2585 suscriptores. El abastecimiento de agua potable en esta zona está a cargo del acueducto comunitario Barrios Unidos (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

5.7 Problemáticas del sistema

Las variaciones climáticas impactan el sistema de potabilización de Mocoa. Durante la temporada de lluvias, las intensas precipitaciones arrastran grandes cantidades de sedimentos, elevando la turbidez del agua a niveles superiores a 3000 UNT (Alcaldía de Mocoa, 2023). Esta alta turbidez sobrepasa la capacidad de tratamiento de la planta, dificultando la potabilización eficiente (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023). Adicionalmente, los fenómenos geológicos asociados a las lluvias, como crecientes súbitas y deslizamientos de tierra, deterioran las infraestructuras de captación y las líneas de conducción. Estos daños provocan interrupciones en el suministro de agua y comprometen la calidad del agua que llega a los usuarios (Alcaldía de Mocoa, 2023).

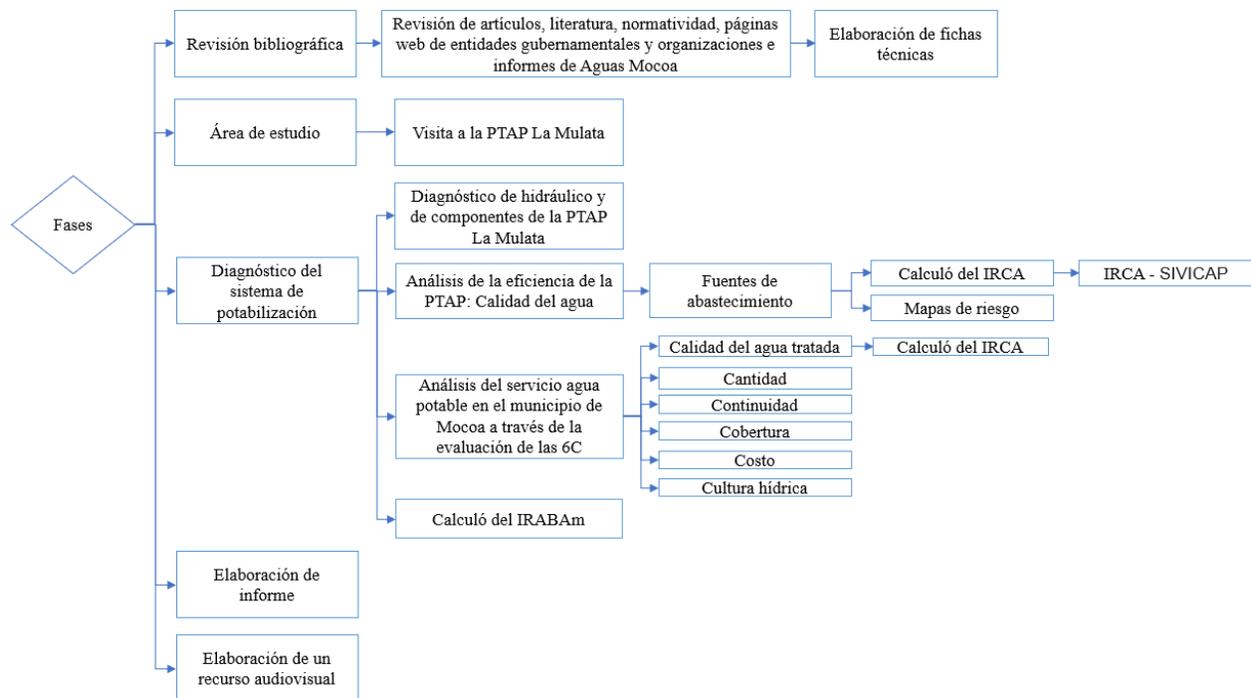
Por otro lado, en la época seca, la disminución del caudal de las fuentes hídricas obliga a implementar medidas de sectorización en el suministro de agua. Esta estrategia busca optimizar la distribución del recurso limitado, pero puede generar restricciones y periodos sin servicio en diferentes zonas de Mocoa (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2020).

6. Metodología

El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo a través de 5 fases las cuales se resumen en figura 4.

Figura 4

Fases del desarrollo metodológico del proyecto



6.1 Revisión de la literatura

Se realizó una búsqueda de información en diversas fuentes. Se consultaron artículos de universidades como la Pontificia Bolivariana, el Instituto Tecnológico del Putumayo, la Universidad del Quindío y la Universidad Tecnológica Nacional, además de libros especializados en diseño, tratamiento de aguas e hidráulica, y recursos del CEPIS/OPS. Se exploraron revistas indexadas como SciELO, Tecnología en Marcha y ResearchGate, así como páginas web de entidades gubernamentales y organizaciones, incluyendo el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, el DANE, Aguas Mocoa S.A.E.S.P., el Instituto Nacional de Salud y la Organización de las Naciones Unidas para

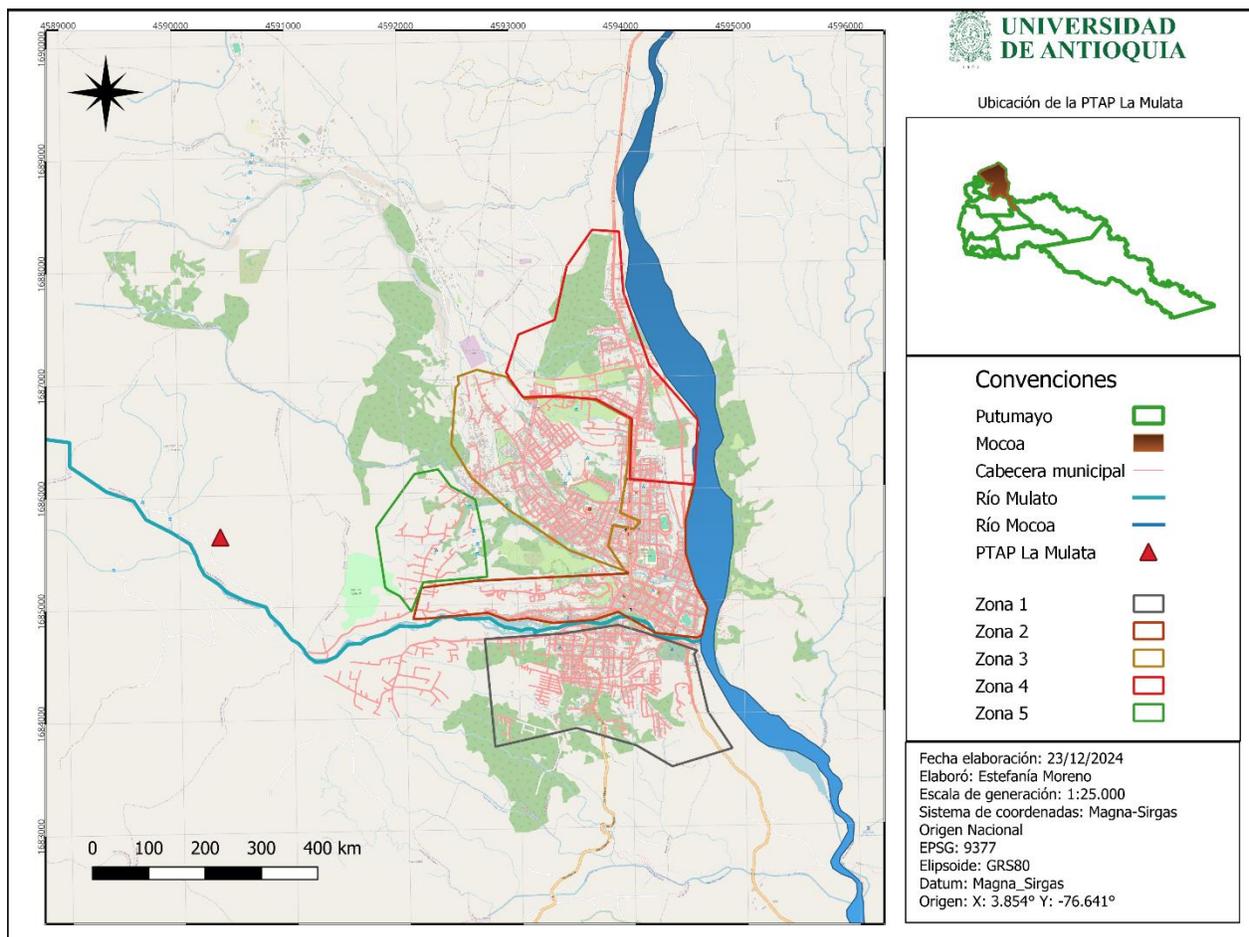
la Alimentación y la Agricultura (FAO). Adicionalmente, se recopilieron informes proporcionados por Aguas Mocoa y entrevistas a la ingeniera Rodríguez, a cargo de la PTAP La Mulata.

6.2 Área de estudio

La PTAP La Mulata se encuentra ubicada a 840.60 m s. n. m., en una pequeña planicie dentro de una reserva indígena de la región. Sus coordenadas geográficas son 1°09'23.3" N y 76°41'39.4" O, con respecto al meridiano de Greenwich (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Figura 5

Ubicación de la PTAP La Mulata



6.3 Diagnóstico del sistema de potabilización

6.3.1 Diagnóstico del sistema hidráulico y de las componentes de la PTAP La Mulata

Inicialmente, se llevó a cabo una revisión de literatura y normatividad vigente. Asimismo, se contó con la información proporcionada por Aguas Mocoa, lo que brindó un contexto operativo y de gestión relevante. Posteriormente, se elaboraron fichas técnicas para cada unidad de tratamiento, las cuales permitieron una caracterización detallada de sus componentes y funcionamiento. Adicionalmente, se realizó una visita técnica a la PTAP La Mulata, con el fin de observar in situ las condiciones de la planta y complementar la información recopilada. Finalmente, se realizó el diagnóstico hidráulico y de componentes de la PTAP La Mulata. Este diagnóstico es fundamental para comprender el funcionamiento actual de la planta y proponer mejoras que optimicen su eficiencia y garanticen la calidad del agua tratada.

La Tabla 4 presenta las fichas técnicas de las unidades de tratamiento de la PTAP La Mulata. Los criterios definidos para cada unidad se basan en la literatura (Romero, Vargas, Trujillo, Domínguez), el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/OPS y la normativa colombiana vigente (Resoluciones 0330 de 2017 y 799 de 2021).

Tabla 4

Fichas técnicas de cada una de las unidades de tratamiento de la PTAP La Mulata

Datos generales					
Municipio					
PTAP					
Altura	msnm				
Caudal	L/s				
Temperatura	°C				
Observaciones generales					
Características físico-química y microbiológicas					
Características	Parámetro	Valor	Unidades	Cumple norma	Observaciones
Físicas	Color				
	Metales				
	Turbiedad				
Químicas	pH				

Microbiológicas	Coliformes				
Cámara de quietamiento					
Parámetro	Valor o rango	Unidades	Literatura o norma	Cumple norma	Observaciones
Velocidad ascensional			0.2 - 0.6 / 0.04 - 0.1 m/s		
TRH			10 - 30 / 30 - 60 s		
Ancho			-		
Longitud			-		
Altura			1 - 2 m		
Pérdida de carga			-		
Rebose			-		
Borde libre			0.3 - 0.4 m		
Canal de entrada					
Parámetro	Valor o rango	Unidades	Literatura o norma	Cumple norma	Observaciones
Longitud			4.5 B		
Ancho			-		
Relación Ancho/Alto			1:1 - 2:1		
Pendiente			<= 0.5 %		
Borde libre			0.6 - 0.8 m		
Altura lámina de agua			-		
Velocidad de flujo			0.4 - 1.4 m/s		
Mezcla Rápida - Vertedero					
Parámetro	Valor o rango	Unidades	Literatura o norma	Cumple norma	Observaciones
Altura del tabique			h/6		
Ancho del vertedero			-		
Prof. Antes resalto h1			-		
Prof. después resalto h2			-		
v1 antes resalto			-		
v2 Después resalto			-		
Altura agua antes cresta			-		
Número de Froude			4.5 - 9.0		
Tiempo de mezcla			< 1 s		
Gradiente hidráulico			1000-2000 s ⁻¹		
Distancia aplicada del coagulante			-		
Tipo de coagulante			1:1 - 2:1		
Dosis de coagulante			<= 0.5 %		
Mezcla Lenta – Floculador					
Parámetro	Valor o rango	Unidades	Literatura o norma	Cumple norma	Observaciones

Caudal			Caudales <250 L/s hidráulico o mecánico		
Zonas floculación			3		
Gradiente velocidad			10-70 s ⁻¹		
Tiempo retención			20-40 min		
Cámaras			5 / 9 -12		Material de las placas
Longitud zona de floculación			1.50		
Ancho cada zona de floculación			0.50		
Velocidad codos			0.2-0.4 m/s		
Sedimentador					
Parámetro	Valor o rango	Unidades	Literatura o norma	Cumple norma	Observaciones
Módulos	1.20		Alta tasa		
Carga superficial			Módulos angostos 120-185 m ³ /m ² /día		
Velocidad			15-30 cm/min		
Tiempo retención			10-20 min		
Número Reynolds			<250		
Longitud relativa					
Número espaciamentos			-		
Número placas			-		
Inclinación placas			20°-40°/60° limpieza		
Longitud sedimentador			-		
Número múltiples			-		
Diámetro múltiple			-		
Número Orificios			-		
Distancia orificios a centro a			-		
Distancia orificios a pared			-		
Ancho canaletas			-		
Número de canaletas			-		
Altura lámina de agua			-		
Número de vertederos			-		
Altura lámina agua en el vertedero			-		
Filtración rápida con lecho mixto					
Parámetro	Valor o rango	Unidades	Literatura o norma	Cumple norma	Observaciones

Unidades			4		
Material filtrante			-		
Número de filtros			-		
Tasa de filtración			180-250 m ³ /m ² /día		
Ancho			-		
Largo			-		
Ancho vigas			-		
Espaciamiento			-		
Número de vigas			-		
Número de orificios			-		
Longitud vigas			-		
Profundidad Antracita			0.4-0.6 m		
Profundidad Arena			0.15-0.3 m		
Vel. ascensional			>0.6 m/min		
Vel. lavado			0.6-1.0 m/min		
Expansión lecho			20%-40%		
Carrera filtración			12-36 horas		
Pérdida inicial filtro			0.3 m		
Pérdida final filtro			2.4-3.0 m		
Turbiedad filtro			<1.0 UNT		
Desinfección					
Parámetro	Valor o rango	Unidades	Literatura o norma	Cumple norma	Observaciones
Desinfectante			-		
Tipo de desinfectante			-		
Concentración			-		
Tiempo de contacto			20-30 min		
Cloro residual			0,3 y 2,0 mg/L		

Nota. Adoptado de (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017) y (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2021).

6.3.2 Análisis de la eficiencia de la PTAP: Calidad del agua

Para evaluar la calidad del agua cruda, se analizó los resultados de laboratorio de la PTAP La Mulata proporcionados por Aguas Mocoa, calculándose el IRCA para las fuentes de abastecimiento del río Mulato y la quebrada Chontayaco. No se dispuso de resultados de laboratorio para la quebrada Mulatico. Adicionalmente, se elaboró mapas de riesgo para cada una

de estas tres fuentes con el objetivo de identificar posibles puntos de contaminación o vulnerabilidad.

En el caso del agua tratada, se calculó el IRCA utilizando los resultados de laboratorio proporcionados por Aguas Mocoa. La información obtenida fue complementada y contrastada con los datos disponibles en el Sistema de Información para la Vigilancia de la Calidad del Agua Potable (SIVICAP).

6.3.3 Análisis del servicio agua potable en el municipio de Mocoa a través de la evaluación de las 6C

El análisis del servicio de agua potable en el municipio de Mocoa se basó en la evaluación de las 6C: Calidad del agua tratada, Cantidad, Continuidad, Cobertura, Costo y Cultura hídrica. Específicamente, la calidad del agua tratada se determinó mediante el cálculo del IRCA. Además, la evaluación de las 6C es fundamental para analizar integralmente el servicio de agua potable. Evaluar la calidad asegura que el agua cumpla con los estándares sanitarios y no represente un riesgo para la salud; la cantidad se refiere a la disponibilidad suficiente del recurso para satisfacer las necesidades de la población; la continuidad garantiza el suministro constante y sin interrupciones; la cobertura mide el acceso equitativo al servicio para todos los habitantes; el costo analiza la asequibilidad del agua para evitar exclusiones por razones económicas; y la cultura hídrica considera los conocimientos, actitudes y prácticas de la comunidad en relación con el uso y la conservación del agua, promoviendo un manejo sostenible del recurso. En conjunto, las 6C permiten identificar fortalezas y debilidades del sistema de abastecimiento, orientando la toma de decisiones para mejorar la gestión, la eficiencia y la sostenibilidad del servicio de agua potable, impactando positivamente en la salud y el bienestar de la población.

6.4 Elaboración del informe

Finalmente, se elaboró el informe de sobre la Evaluación Integral del estado de operación y funcionamiento de la PTAP La Mulata, ubicada en el municipio de Mocoa, Putumayo, con el objetivo de identificar áreas de mejora y optimizar el proceso de potabilización.

6.5 Elaboración del recurso audiovisual

Se creó un recurso audiovisual destinado a instituciones educativas para promover la importancia del agua potable. Este material didáctico aborda los procesos de tratamiento del agua, explicando las etapas clave para su potabilización. Además, se enfoca en fomentar hábitos de consumo responsable, concientizando sobre el uso eficiente del recurso hídrico.

7. Resultados

7.1 Diagnóstico del sistema de potabilización

7.1.1 Diagnóstico de hidráulico y de componentes de la PTAP La Mulata

7.1.1.1 Cámara de aquietamiento. A continuación, se presentan los datos de diseño, el análisis del estado, el cumplimiento normativo (o con la literatura) y el diagnóstico hidráulico de la cámara de aquietamiento.

Tabla 5

Datos de diseño de la cámara de aquietamiento

Tipo de sistema	Hidráulico
Material	Concreto



Nota. (a) Fuente Propia. (b) Fuente (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Descripción de la unidad	Esta estructura, de sección rectangular, está diseñada para recibir un caudal de 215 L/s, con una velocidad máxima de llegada de 2.93 m/s. Además, cuenta con un vertedero de excesos de compuerta lateral para controlar el caudal. Las pérdidas en la cámara son de 0.22 m
Dimensiones	1.60 m de ancho, 2.10 m de largo y 2.63 m de altura, con un borde libre de 0.25 m
TRH	4.45 s
Velocidad ascensional	0.10 m/s

Fuente. (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017) y (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Análisis del estado de la cámara de aquietamiento. La estructura se encuentra en buen estado, sin grietas ni daños estructurales.

Normatividad o literatura. En la guía de Sistemas de medición y Aquietamiento de la facultad de ingeniería de la Universidad del Quindío (2009) se propone que la altura de la cámara debería encontrarse dentro del intervalo de 1 a 2 metros. Sin embargo, la cámara de aquietamiento presenta una altura de 2.63 m, excediendo la recomendación de diseño. Por otro lado, Lozano-Rivas y Lozano (2015) recomiendan que el borde libre se encuentre entre 0.30 m y 0.40 m. El borde libre de la cámara, de 0.25 m, está por debajo del rango recomendado. Además, Garavito (1973) sugiere una velocidad ascensional entre 0.04 m/s y 0.1 m/s, y un tiempo de retención hidráulico entre 30 y 60 segundos. Por otro lado, en los criterios de Taborda se propone una velocidad ascensional entre 0.2 m/s y 0.6 m/s, y un tiempo de retención hidráulico entre 10 y 30 segundos (Lozano-Rivas y Lozano, 2015). El tiempo de retención en la cámara de aquietamiento es de 4.45 segundos, valor que se encuentra por debajo del rango recomendado. Por otro lado, cumple con la sugerencia de velocidad ascensional sugerida por Garavito, pero no cumple la recomendada por Taborda.

Análisis hidráulico de la cámara de aquietamiento. La cámara de aquietamiento cumple con la recomendación de velocidad ascensional, pero presenta deficiencias en el tiempo de retención hidráulico y el borde libre. El bajo TRH podría comprometer la eficiencia del aquietamiento ya que no se está dando el tiempo necesario para el agua se aquiete, provocando de esta manera que el agua llegue demasiado rápido a los procesos siguientes (Cárdenas y Ruiz , 2020), mientras que el borde libre insuficiente aumenta el riesgo de rebose (Castellanos et al., 2017), pero al contar con un vertedero lateral se controla el caudal. Por último, la altura de la cámara, aunque excede la recomendación, podría estar relacionada con la necesidad de disipar la energía del caudal de diseño, pero esta relación no se justifica explícitamente en la información disponible.

7.1.1.2 Canal de entrada. A continuación, se presentan el diseño, el análisis del estado, el cumplimiento normativo (o con la literatura) y el diagnóstico hidráulico del canal de entrada.

Tabla 6

Datos de diseño del canal de entrada

Tipo de sistema	Hidráulico
Material	Concreto



Nota. Fuente Propia.

Descripción de la unidad	Esta estructura recibe un caudal de 215 L/s
Dimensiones	0.80 m de ancho y 4.40 m de longitud, con un borde libre de 0.25 m
Pendiente	2%
Velocidad	1.0 m/s

Fuente. (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017).

Análisis del estado del canal de entrada. La estructura se encuentra en buen estado, sin grietas ni daños estructurales.

Normatividad o literatura. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO (2024) sugiere que la pendiente de los canales sea igual o menor al 5%. El canal de entrada, con una pendiente del 2%, cumple con esta recomendación. Además, según Lozano-Rivas y Lozano (2015), para garantizar el ingreso de un flujo estable en el sistema de aforo y mezcla rápida, la longitud ideal del canal debería ser 4.5 veces su ancho. Esto implica una longitud de 3.6 m para un ancho de 0.80 m. Sin embargo, el canal de entrada presenta una longitud de 4.4 m, lo que difiere de la longitud ideal sugerida. Por otro lado, el canal de entrada presenta un borde libre de 0.25 m, el cual no cumple con las recomendaciones establecidas por diversas fuentes. La Autoridad Nacional del Agua de Perú (2010) sugiere un borde libre de 0.40 m para canales con un ancho de 0.80 m. Adicionalmente, Castellanos et al. (2017) recomiendan un borde

libre de 0.80 m, es decir, el 30% de la altura total. Sin embargo, este aspecto puede no ser tan crucial ya que la planta cuenta con un vertedero de excesos.

Análisis hidráulico del canal de entrada. La pendiente del 2% cumple con la recomendación del 5%; sin embargo, la longitud del canal (4.4 m) supera el valor ideal de 3.6 m, y el borde libre (0.25 m) es significativamente menor a los 0.40 m y 0.80 m sugeridos. Este insuficiente borde libre incrementa el riesgo de desbordamiento (Castellanos et al., 2017) y podría comprometer la eficiencia hidráulica, pero se aclara la importancia del vertedero de excesos con el que cuenta el sistema.

7.1.1.3 Mezcla rápida – Vertedero. A continuación, se muestran los datos de diseño, el análisis del estado, el cumplimiento normativo (o con la literatura) y el diagnóstico hidráulico del vertedero.

Tabla 7

Datos de diseño del vertedero

Tipo de sistema	Hidráulico
Material	Concreto



(a)



(b)

Nota. (a) Fuente Propia. (b) Fuente Propia.

Descripción de la unidad	El vertedero, con un caudal de 215 L/s. Se registran profundidades de 0.07 m antes del resalto, 0.19 m en la sección crítica y 0.50 m después del resalto. La altura del tabique de salida es de 0.14 m. La aplicación del coagulante se realiza antes del resalto hidráulico
Dimensiones	0.80 m de ancho y 1.20 m de longitud
Número de Froude	4.6

TRH	1.20 s
Gradiente de mezcla	2185.61 s ⁻¹

Fuente. (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017).

Análisis del estado del vertedero. La estructura se encuentra en buen estado, sin grietas ni daños estructurales.

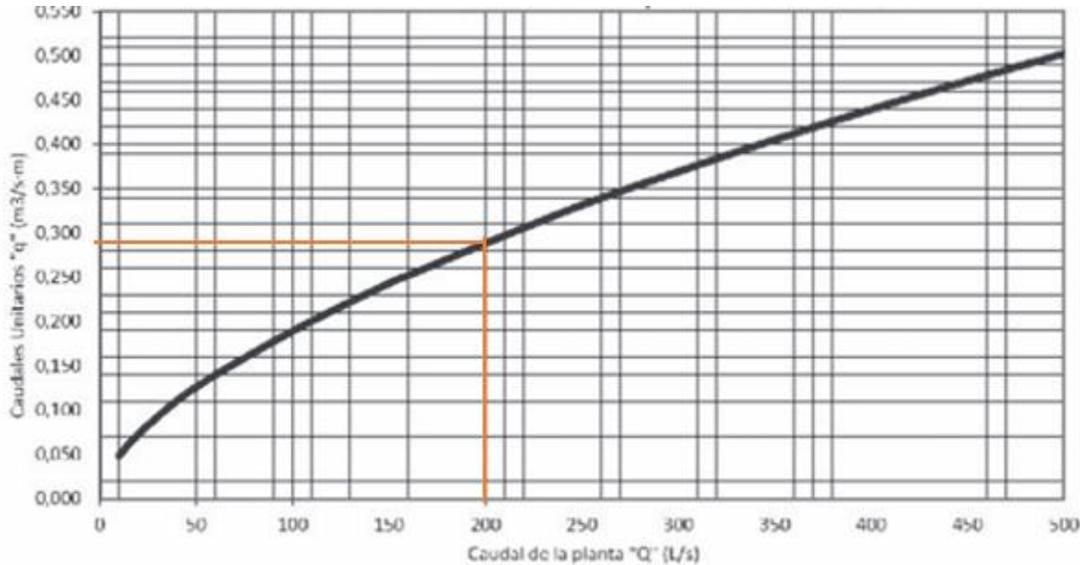
Normatividad o literatura. En la Resolución 0330 del 2017, el número de Froude para mezcladores hidráulicos debe encontrarse entre 4.5 y 9.0 para tener un resalto estable y una mezcla eficiente, por lo tanto, el vertedero cumple al encontrarse dentro de este rango (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017). Sin embargo, el tiempo de retención de 1.20 segundos supera el límite máximo de 1.0 segundos establecido en la Resolución 0330 del 2017 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017).

Además, el gradiente hidráulico de 2185.61 s⁻¹ excede el rango recomendado en la Resolución 0330 del 2017 de 1000-2000 s⁻¹ (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017).

El método de Lozano-Rivas para determinar el gradiente de mezcla utiliza el caudal de diseño como punto de partida. Este valor, ingresado en la Gráfica 1, permite obtener un caudal unitario sugerido. A partir de este, se calculan la caída de agua (P) y el ancho del vertedero (B) empleando las Ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

Gráfica 1

Caudales Unitarios recomendados para la mezcla rápida en vertedero para caudales mayores entre 10 y 500 L/s – Método Lozano-Rivas



Fuente. (Lozano-Rivas y Lozano, 2015).

Ecuación 1

Altura del vertedero

$$P = 4.2 * (q^{\frac{2}{3}})$$

Fuente. (Lozano-Rivas y Lozano, 2015).

Ecuación 2

Ancho del vertedero

$$B = \frac{Q}{q}$$

Fuente. (Lozano-Rivas y Lozano, 2015).

Análisis hidráulico del vertedero. El número de Froude se encuentra dentro del rango aceptable de 4.5 a 9.0, garantizando un resalto estable y una mezcla eficiente; tanto el tiempo de retención como el gradiente hidráulico exceden los límites establecidos. Específicamente, el tiempo de retención de 1.20 segundos supera el máximo de 1.0 segundos, y el gradiente hidráulico de

2185.61 s⁻¹ excede el rango de 1000-2000 s⁻¹, por lo tanto, el incumplimiento de la normatividad indica la necesidad de revisar el diseño del vertedero para asegurar su cumplimiento y optimizar su desempeño hidráulico. El método de Lozano-Rivas sugiere un caudal unitario de 0.28 m³/m*s, un ancho de 0.73 m y una altura de 1.82 m, lo que proporciona un tiempo de retención de 0.98 s. Sin embargo, el gradiente de mezcla calculado (2350.2 s⁻¹) excede los valores recomendados. En caso de ser esos valores se debe resaltar que no se cumple con las condiciones óptimas para la mezcla rápida y este es un paso fundamental para el proceso de clarificación y remoción de la turbiedad, si este componente falla, falla todas las unidades posteriores.

7.1.1.4 Mezcla lenta – Floculadores. A continuación, se presentan el diseño, el análisis del estado, el cumplimiento normativo (o con la literatura) y el diagnóstico hidráulico de los floculadores.

Tabla 8

Datos de diseño de los floculadores

Tipo de sistema	Hidráulico
Material	Concreto



(a)



(b)



(c)

Nota. (a) Cámara de distribución Fuente Propia. (b) Tren de tratamiento nuevo Fuente Propia. (c) Tren de tratamiento existente Fuente Propia.

Descripción de la unidad	<p>Para asegurar una distribución equitativa del caudal a las cuatro unidades de floculación hidráulica tipo Alabama modificada de flujo vertical ascendente-descendente (dos para el tren de tratamiento existente y dos para el tren nuevo), se dispone de una cámara de distribución. Esta cámara cuenta con cuatro vertederos rectangulares, cada uno con una capacidad de descarga de 53.75 L/s.</p> <p>En los floculadores tipo Alabama, el paso entre las cámaras se hace por medio de codos de 90° que inducen el flujo ascendente – descendente. En el tren de tratamiento nuevo y existente se emplea el uso de floculación hidráulica tipo Alabama modificada, en la cual el paso entre las cámaras se hace por medio de unos orificios inferiores, ubicados en zigzag y con un tabique intermedio.</p>
Unidades de floculación existentes	
Cámaras	8
TRH	20 minutos
Volumen total	64.52 m ³
Volumen por cámara	8.06 m ³
Dimensiones por cámara	1.73 m de ancho, 1.80 m de largo y profundidad de 2.59 m
Velocidades de paso	Entre 0.56 y 0.21 m/s
Gradientes de velocidad	Entre 49.50 y 18.50 s ⁻¹
Gradiente medio	34.70 s ⁻¹
Pérdida de carga total	0.18 m
Unidades de floculación nuevas	
Cámaras	9
TRH	20 minutos
Volumen total	64.70 m ³
Volumen por cámara	7.19 m ³
Dimensiones por cámara	1.78 m de ancho, 1.97 m de largo y 2.05 m de profundidad
Velocidades de paso	Entre 0.56 y 0.21 m/s
Gradientes de velocidad	Entre 52.50 y 19.60 s ⁻¹
Gradiente medio	35.0 s ⁻¹
Pérdida de carga total	0.19 m

Fuente. (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017).

Análisis del estado de los floculadores. La estructura se encuentra en buen estado, sin grietas ni daños estructurales.

Normatividad o literatura. En la Resolución 0330 de 2017 se establece que las unidades de mezcla rápida y lenta en una planta de tratamiento deben estar ubicadas lo más cerca posible una

de la otra. Para caudales menores a 250 L/s, se permite el uso de floculadores hidráulicos o mecánicos. Además, la resolución exige que los nuevos proyectos incluyan al menos tres zonas de floculación, con el objetivo de reducir gradualmente los gradientes de velocidad desde 10 s^{-1} hasta 70 s^{-1} . El gradiente de velocidad promedio debe ser de 40 s^{-1} . Por último, se requiere un tiempo de retención hidráulica total entre 20 y 40 minutos para garantizar una adecuada floculación (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017).

Tanto los floculadores del tren de tratamiento nuevo como los de la existente cumplen con el tiempo de retención requerido y con la reducción gradual del gradiente de velocidad, según lo establecido en la Resolución 0330 de 2017. Sin embargo, los floculadores del tren existente no cumplen con el requisito de proximidad a la zona de mezcla rápida.

De acuerdo con Romero (2000), se requiere un mínimo de 5 cámaras en cada floculador. Tanto el tren nuevo, con 9 cámaras, como el existente, con 8, cumplen con esta disposición. Esta decisión se fundamenta en que a mayor número de cámaras se favorece la eficiencia del proceso de floculación ya que permite un mejor control de los gradientes de velocidad y un mayor tiempo de retención.

En el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento se recomienda que un floculador tipo Alabama cuente con un mínimo de 9 cámaras, preferiblemente 12, o el número de unidades necesarias según el volumen de agua a tratar. Las cámaras deben tener una longitud entre 0.75 y 1.50 m, y un ancho entre 0.50 y 1.25 m. El tren nuevo, si bien se cumplen las 9 cámaras, las dimensiones de 1.78 m de ancho y 1.97 m de largo no cumplen con las sugerencias. De manera similar, el tren existente, con 8 cámaras, incumple la recomendación en cuanto al número de cámaras y presenta dimensiones de 1.73 m de ancho y 1.80 m de largo, las cuales tampoco se ajustan a lo propuesto (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2010).

En el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento se establece que, en los codos, la velocidad debe mantenerse entre 0.2 m/s y 0.4 m/s para evitar la ruptura del flóculo. En el tren existente y nuevo se observaron velocidades de paso entre 0.21 m/s y 0.56 m/s. Las velocidades superiores a 0.4 m/s provocan la ruptura del flóculo en ambas plantas Básico (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2010).

Según Zapata y Gonzalías (2020), velocidades inferiores a 0.2 m/s generan zonas muertas y aumentan el tiempo de tratamiento de retención. En ambos trenes se observaron velocidades superiores a este valor.

Rodriguez (2024) señaló que los caudales en la PTAP La Mulata experimentan variaciones según las temporadas secas o de lluvia. Según Vargas (2004) los sistemas de floculación hidráulica presentan poca flexibilidad ante dichas variaciones por ejemplo cuando disminuyen el caudal, aumentan el tiempo de retención y disminuyen el gradiente de velocidad, o viceversa.

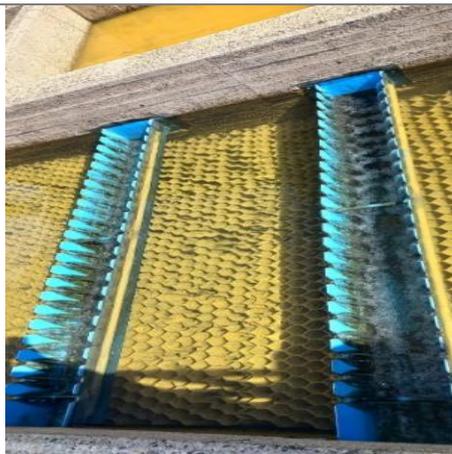
Análisis hidráulico de los floculadores. Ambos trenes de tratamiento cumplen con el tiempo de retención requerido (20-40 minutos), la reducción gradual del gradiente de velocidad ($10-70 \text{ s}^{-1}$ con un gradiente medio de 40 s^{-1}) y el número mínimo de cámaras, con 9 y 8 cámaras para el tren de tratamiento nuevo y existente, respectivamente. Sin embargo, el tren existente incumple el requisito de proximidad a la zona de mezcla rápida. Además, ambos trenes de tratamiento presentan dimensiones de cámara que no se ajustan a las recomendaciones. Finalmente, se observaron velocidades de paso entre 0.21 m/s y 0.56 m/s , superando el límite superior recomendado de 0.4 m/s , lo que podría generar ruptura del flóculo, aunque se cumplen con las velocidades mínimas de 0.2 m/s para evitar zonas muertas.

7.1.1.5 Sedimentación. A continuación, se presentan el diseño, el análisis del estado, el cumplimiento normativo (o con la literatura) y el diagnóstico hidráulico de los sedimentadores.

Tabla 9

Datos de diseño de los sedimentadores

Tipo de sistema	Hidráulico de alta tasa
Material	Concreto



(a)



(b)

Nota. (a) Planta nueva Fuente Propia. (b) Planta existente Fuente Propia.

Descripción de la unidad	Tanto las unidades de sedimentación nuevas como las existentes están equipadas con 2 sedimentadores de alta tasa. Estos sedimentadores utilizan módulos de poliestireno de alto impacto, compuestos por tubos hexagonales de 5 cm x 5 cm, inclinados 60° y con una altura de 1.04 m
Unidades de sedimentación existentes	
Unidades	2
Capacidad por unidad	0.05375 m ³ /s
Dimensiones	2.40 m ancho, 6.55 m de largo y una profundidad total de 4.42 m
Orificios de recolección	8
Carga de sedimentación	150 m ³ /m ² /día
Velocidad de flujo en los ductos	12 cm/min
Número de Reynolds	175
Carga superficial equivalente	17.10 m ³ /m ² /día
Orificios de distribución	40
Altura de tolva de lodos	1 m
Unidades de sedimentación nuevas	
Unidades	2
Capacidad por unidad	0.05375 m ³ /s
Dimensiones	2.40 m ancho, 6.55 m de largo y una profundidad total de 4.40 m
Orificios de recolección	8
Carga de sedimentación	144.5 m ³ /m ² /día
Velocidad de flujo en los ductos	11.58 cm/min
Número de Reynolds	168.4
Carga superficial equivalente	16.4 m ³ /m ² /día
Orificios de distribución	68
Altura de tolva de lodos	1 m

Fuente. (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017) y (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Análisis del estado de los sedimentadores. La estructura se encuentra en buen estado, sin grietas ni daños estructurales.

Normatividad o literatura. En la Resolución 0330 de 2017 se definen los límites de operación para sedimentadores de alta tasa con módulos angostos de 1.2 metros. Estos sedimentadores deben trabajar con una carga superficial entre 120 y 185 m³/m²/día, un tiempo de retención hidráulica de 10 a 20 minutos y una velocidad crítica de sedimentación de 15 a 30 cm/min

(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017). La carga superficial en ambos trenes de tratamiento, nuevo y existente, se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la Resolución 0330 del 2017. Sin embargo, la velocidad crítica de sedimentación en ambas se encuentra por debajo del rango, 11.58 cm/min y 12 cm/min, respectivamente.

Romero (2000), indica que, para garantizar un flujo laminar en partículas floculantes, el número de Reynolds debe ser menor a 500, condición que se cumple en ambas plantas.

Además, Romero (2000) manifiesta que la máxima eficiencia de los paneles se alcanza entre 20° y 40° de inclinación, pero se recomienda un ángulo de 60° para facilitar su limpieza, ambos trenes de tratamiento cumplen con la sugerencia.

Por otra parte, la eficiencia en la remoción de partículas depende del tiempo de retención y la profundidad del sedimentador. Romero (2000) sugiere una profundidad entre 3 y 5 metros, rango que se cumple en ambos trenes.

Análisis hidráulico de los sedimentadores. En los sedimentadores de alta tasa en los trenes de tratamiento nuevo y existente, la carga superficial se encuentra dentro del rango normativo (120-185 m³/m²/día), la velocidad crítica de sedimentación en ambos trenes está por debajo del rango establecido (15-30 cm/min), lo cual podría afectar la eficiencia de la remoción de partículas. Sin embargo, se cumplen otros criterios importantes: el número de Reynolds es menor a 500, garantizando flujo laminar; la inclinación de las placas es de 60°, facilitando la limpieza, aunque la máxima eficiencia se da entre 20° y 40°; y la profundidad de los sedimentadores se encuentra entre 3 y 5 metros.

7.1.1.6 Filtración. A continuación, se presentan el diseño, el análisis del estado, el cumplimiento normativo (o con la literatura) y el diagnóstico hidráulico de las unidades de filtración.

Tabla 10

Datos de diseño de las unidades de filtración

Tipo de sistema	Hidráulico
Material	Concreto



(a)



(b)

Nota. (a) Planta nueva Fuente Propia. (b) Planta existente Fuente Propia.

Descripción de la unidad	El sistema de filtración está compuesto por 12 filtros: 8 del tren de tratamiento existente y 4 en el tren nuevo. Ambos trenes operan con tasa declinante y lavado mutuo o autolavado. Además, su sistema de filtración cuenta con un lecho filtrante dual de 0.75 m de espesor, conformado por una capa de arena de 0.30 m y una capa de antracita de 0.45 m. Este lecho se apoya sobre 0.30 m de grava graduada, con tamaños que varían entre 1 ½” y 1/12”. Asimismo, cuentan con viguetas de drenaje tipo V invertida y una carrera de filtración de 36 horas
Unidades de filtración existentes	
Filtros	8
Módulos	2
Unidad por módulo	4
Dimensiones por filtro	2.25 m de ancho, 2.25 m de largo y una profundidad de 4.60 m
Caudal	26.87 L/s
Drenaje	9 vigas en forma de “V” invertida, cada una con 40 perforaciones de $\phi \frac{3}{4}$ ” distribuidas uniformemente
Tasa de filtración	229.4 m ³ /m ² /día
Pérdida de carga inicial	0.008 m
Pérdida de carga final	0.80 m
Caudal de lavado	0.5375 m ³ /s
Velocidad de lavado del lecho	0.64 m/min
Expansión del lecho	0.35 m equivalente al 58.3%
Unidades de filtración nuevas	
Filtros	4

Módulos	2
Unidad por módulo	4
Dimensiones por filtro	2.72 metros de ancho por 3.88 metros de largo y una profundidad de 4.60 metros
Caudal	26.87 L/s
Drenaje	12 vigas en forma de "V" invertida, con 52 orificios de $\phi \frac{3}{4}$ " distribuidos uniformemente
Tasa de filtración	220 m ³ /m ² /día
Pérdida de carga inicial	0.003 m
Pérdida de carga final	0.86 m
Caudal de lavado	0.1075 m ³ /s
Velocidad de lavado del lecho	0.61 m/min
Expansión del lecho	0.30 m lo cual representa un 40%

Fuente. (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017) y (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Análisis del estado de las unidades de filtración. La estructura se encuentra en buen estado, sin grietas ni daños estructurales.

Normatividad o literatura. Según lo establecido en la Resolución 0799 de 2021 para sistemas de filtración rápida con lecho mixto, la tasa de filtración debe encontrarse entre 180 y 250 m³/m²/día, en caso de que se llegue a una óptima operación y mantenimiento del sistema puede llegar a 350. La profundidad del lecho filtrante, compuesto por antracita y arena, debe variar entre 0.4 y 0.6 metros para la antracita y entre 0.15 y 0.3 metros para la arena. Para el lavado de filtros rápidos, se requiere al menos tres unidades si se utiliza una fuente externa o tanque de lavado, y cuatro unidades si se emplea lavado mutuo y una velocidad ascensional no menor a 0.6 m/min (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2021).

Tanto el tren de tratamiento nuevo como el existente cumplen con los requisitos de la Resolución 0799 de 2021 en cuanto a tasa de filtración, profundidad del material filtrante y velocidad ascensional.

En el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS2000 Título B, los sistemas de filtración deben cumplir con los siguientes parámetros: la velocidad de lavado debe estar entre 0.6 y 1.0 m/min; se requiere un mínimo de 4 unidades de filtración. En cuanto a la expansión del lecho durante el lavado debe ser de entre 20% y 40% (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Ambos trenes cumplen también con las recomendaciones del RAS2000 respecto a la velocidad de lavado y el número mínimo de unidades de filtración. Sin embargo, solo el tren nuevo cumple con el rango de expansión del lecho durante el lavado.

Romero (2000) propone que, para filtros de alta tasa con medio filtrante de arena y antracita, se debe hacer un lavado cuando la carrera de filtración alcance entre 12 y 36 horas, la pérdida de carga inicial sea de 0.3 m, la carga final se encuentre entre 2.4 y 3.0 m y el filtro sobrepase una turbiedad de 1.0 UNT. Además, ambos trenes cumplen con los criterios de carrera de filtración, pérdida de carga inicial y final sugeridos.

Análisis hidráulico de las unidades de filtración. Ambos trenes de tratamiento cumplen con la tasa de filtración (180-250 m³/m²/día), la profundidad del material filtrante (antracita 0.4-0.6 m, arena 0.15-0.3 m), la velocidad ascensional (≥ 0.6 m/min), la velocidad de lavado (0.6-1.0 m/min) y el número mínimo de unidades de filtración (4). Además, cumplen con los criterios de carrera de filtración (12-36 horas), pérdida de carga inicial (0.3 m) y final (2.4-3.0 m). La única discrepancia se presenta en la expansión del lecho durante el lavado (20-40%), que solo se cumple en el tren de tratamiento nuevo.

7.1.1.7 Desinfección. La desinfección en la planta se realiza mediante cloración con cloro gaseoso (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

En el tren de tratamiento existente, el agua filtrada se combina con una solución de cloro en la cámara de contacto y es enviada al tanque No. 0. Sin embargo, el tiempo de contacto actual no cumple con el mínimo requerido de 20-30 minutos. Para solucionar esto, el agua clorada es almacenada en los tanques 1 y 2 antes de ser suministrada a la red, garantizando así un tiempo de contacto adecuado (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017).

Mientras que, en el tren nuevo, se realizó una conexión provisional entre la tubería de salida del canal de agua filtrada y el tanque de almacenamiento No.0. Esta conexión temporal tiene como finalidad utilizar el tanque No.0 como una cámara de contacto para que mejore el proceso de tratamiento del agua (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017).

En la figura 6 se observa la caseta de contacto con cloro de la PTAP La Mulata.

Figura 6

Caseta de contacto con cloro



Nota. Fuente Propia.

7.2 Análisis del tren de tratamiento de la PTAP

7.2.1 Alternativas para tratar altas turbiedades que llegan a la PTAP La Mulata

La elección del proceso de tratamiento depende en gran medida de las características del agua cruda, especialmente de su turbiedad. Según Kawamura (2010) para aguas con turbiedades superiores a 1000 y 3000 UNT se requiere presedimentación, mientras que MWH (2005) recomienda clarificadores de manto de lodos para aguas con características relativamente estables y caudales constantes, y un mecanismo de barrido de lodos para turbiedades superiores a 500 UNT.

Por otro lado, en Estados Unidos, una PTAP que capta agua del río Truckee implementó un programa de capacitación para sus operadores en respuesta a incrementos drásticos de turbiedad, que pueden exceder las 4000 UNT. Mediante el ajuste de la dosificación de coagulante (aumentando el sulfato de aluminio a más de 200 mg/L y ajustando el pH con Na₂CO₃), los operadores lograron producir agua filtrada con una turbiedad inferior a 0,1 UNT (Montoya et al., 2011).

Las PTAP en Cali, Río Cauca y Puerto Mallarino, diseñadas para tratar aguas con turbiedades máximas de 3000 UNT han enfrentado eventos de alta turbiedad que exceden las 10000 UNT, ocasionando interrupciones en el servicio. Para mitigar estos problemas, en 2009 se puso en

operación un reservorio de agua clarificada, destinado a prevenir la suspensión del servicio ante turbiedades superiores a 3000 UNT o niveles de oxígeno disuelto inferiores a 2.5 mg/L (Montoya et al., 2011).

Rodríguez (2024) identificó la ausencia de una bocatoma en el río Mulato como la principal causa de la escasez de agua en Mocoa. Adicionalmente, explicó que, si bien la planta está diseñada para el tratamiento de aguas con turbiedades entre 3000 y 4000 UNT, se ve obligada a interrumpir el suministro durante episodios de alta turbidez, cuyos valores pueden oscilar entre 10000 y 30000 UNT.

Finalmente, se proponen tres medidas: (a) Estudios de tratabilidad; (b) la construcción de una laguna de presedimentación para reducir la turbiedad del agua cruda; y (c) la construcción de una bocatoma lateral, recomendada para condiciones de presencia de caudales significativos, alto riesgo de obstrucción de la rejilla por material grueso, pendiente del cauce moderada o baja, y un nivel mínimo de agua alto (Lozano-Rivas y Lozano, 2015), esto para una captación más eficiente.

7.2.2 Alternativas para la mezcla rápida

En el vertedero de la PTAP La Mulata se dosifica el coagulante en el canal de aproximación justo antes del resalto hidráulico. Según Rodríguez (2024) el operario de la planta instaló una tabla inclinada para tener una mezcla homogénea del coagulante con el agua.

Verificar la eficiencia del proceso de coagulación es fundamental para el correcto funcionamiento del tratamiento de agua. Domínguez (2010) señaló que las turbulencias desiguales en el sistema de mezcla conllevan a una dispersión no uniforme del coagulante, creando zonas con concentraciones dispares de este químico. Esta situación tiene dos implicaciones principales: (a) compromete la eficiencia del tratamiento al no asegurar una desestabilización efectiva de todas las partículas presentes en el agua, y (b) puede resultar en un sobreconsumo de productos químicos al intentar compensar la falta de homogeneidad. En contraste, una agitación uniforme e intensa facilita una distribución homogénea del coagulante en el agua, promoviendo las colisiones entre las partículas y las reacciones químicas necesarias para su desestabilización. Se concluye, por tanto, que la tabla actualmente utilizada en el vertedero interfiere con la agitación, afectando la eficiencia del proceso de coagulación.

Domínguez (2010) destaca la influencia del tiempo de mezcla y el gradiente de velocidad en la formación de flóculos para la sedimentación. Un tiempo de mezcla corto es fundamental para una adecuada desestabilización de las partículas; sin embargo, en la PTAP La Mulata, este tiempo supera los valores Resolución 0330 del 2017. Asimismo, Domínguez (2010) indica que, al emplear sales de aluminio, se requiere un tiempo de mezcla mínimo debido a la rápida polimerización del coagulante y su absorción por las partículas. De no cumplirse esta condición, la neutralización de los coloides sería deficiente y el coagulante precipitaría como hidróxido metálico. En la planta, el alto gradiente de velocidad conlleva una lenta formación de flóculos.

La presencia de hidróxidos metálicos de aluminio en los lodos (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017) se atribuye a una dispersión inadecuada del coagulante que impide una neutralización efectiva de los coloides, lo que provoca su precipitación como hidróxido metálico (Domínguez, 2010).

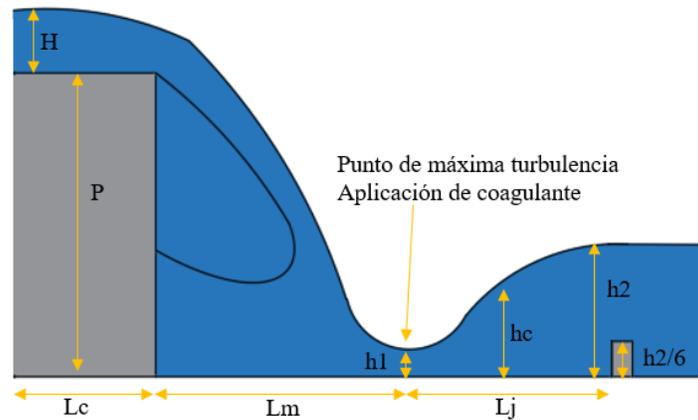
Por otro lado, Trujillo et al. (2014) describen varias desventajas asociadas al uso de sales metálicas en la coagulación, incluyendo la reducción de alcalinidad y pH, precipitación deficiente y la generación de un alto volumen de lodos. Esta problemática se observa en la PTAP La Mulata, donde el uso de sulfato de aluminio ha provocado baja alcalinidad en el agua tratada (Estudios técnicos y construcciones LTDA, 2017). Como posible solución, Meyers, (2001) propone el uso de polímeros naturales como coadyuvantes en la coagulación/floculación. Entre estos, Trujillo et al. (2014) destacan el almidón por su eficacia en la floculación de partículas minerales ultrafinas y metales de hierro.

Asimismo, Arboleda (2000) sugiere el uso de polímeros naturales, como los almidones, en plantas de tratamiento, debido a sus propiedades coagulantes o floculantes y a su baja toxicidad, lo que contribuye a mejorar su rendimiento.

Además, Trujillo et al. (2014) propone aplicar el coagulante en la zona de turbulencia verificando que se disperse de manera uniforme en todo el volumen de agua. En el Manual de Buenas Prácticas de Ingeniería (2010) también se sugiere que la aplicación del coagulante debe realizarse a través de la longitud del vertedero. Para mejorar la eficiencia en la coagulación se sugiere reubicar el punto de dosificación del coagulante (Ver Figura 7) mediante la Ecuación 3 y 4.

Figura 7

Distancia al punto de aplicación del coagulante



Nota. Fuente Adaptado de (Lozano-Rivas & Lozano, 2015) y (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2010).

Donde: altura del vertedero P , lámina de agua H , distancia al punto de dosificación del coagulante L_m , longitud del canal L_c , longitud del resalto L_j , profundidad antes del resalto h_1 , profundidad crítica del flujo h_c , profundidad después del resalto h_2 y altura del tabique de salida $h_2/6$.

Ecuación 3

Distancia al punto de aplicación del coagulante – Ecuación de Scimeni

$$L_m = 4.3 * P^{0.1} * h_c^{0.9}$$

Fuente. (Lozano-Rivas y Lozano, 2015).

Ecuación 4

Distancia al punto de aplicación del coagulante

$$L_m = 1.45 * P^{0.54} * H^{0.46}$$

Fuente. (Lozano-Rivas y Lozano, 2015).

Se determinó que la distancia óptima al punto de aplicación del coagulante sería de 1 metro según la ecuación 3 y de 0.78 metros según la Ecuación 4.

Para prevenir desbordamientos, se propone reducir la altura del tabique de salida de 0.14 m a 0.08 m, lo que corresponde a un sexto de la profundidad del resalto (Vargas, 2004).

7.2.3 Alternativas para la mezcla lenta

La velocidad de agitación es un parámetro crítico en la floculación, ya que una agitación excesiva fragmenta los flóculos, mientras que una agitación insuficiente causa su sedimentación prematura. La distancia entre la mezcla rápida (en el tren de tratamiento nuevo) y la mezcla lenta de la PTAP existente puede afectar este proceso. Trujillo et al. (2014) recomiendan, para la optimización de la floculación, controlar el tiempo y dosificación de coagulantes y floculantes.

Además de la agitación, las condiciones hidráulicas en las tuberías de conexión también son importantes. Según Mott (2006), se deben asegurar diámetros grandes y superficies internas lisas para minimizar las pérdidas de carga y la turbulencia, favoreciendo así la formación y transporte adecuado de los flóculos.

7.2.4 Alternativas en la sedimentación

Al presentar ambos trenes velocidades críticas de sedimentación inferiores al rango establecido en la Resolución 0330/2017, de acuerdo a Orellana (2022) la adición de un coadyuvante en el proceso de coagulación/floculación resulta casi siempre beneficioso. Este promueve un aumento en la velocidad de sedimentación, obteniéndose un agua mejor clarificada.

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/OPS (2005) recomienda que, en la zona de sedimentación, es fundamental que las líneas de flujo no se encuentren obstrucciones que alteren su trayectoria. Además, sugiere realizar un mantenimiento preventivo semanal, incluyendo la limpieza de la estructura, o con mayor frecuencia si la acumulación de sedimentos lo requiere, a fin de evitar obstrucciones. En la PTAP La Mulata tienen estipulado realizarlo cada trimestre o conforme la calidad del agua que se está tratando y la posible sobrecarga de la planta (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024). Se sugiere seguir las recomendaciones del CEPIS/OPS.

7.2.5 Alternativas en la desinfección

El agua filtrada del tren de tratamiento nuevo no está siendo sometida a cloración. Por lo tanto, se sugiere la implementación de un tanque de cloración, tal como lo establece la Resolución 0330 de 2017, la cual exige la inclusión de la etapa de desinfección en todos los sistemas de potabilización (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017).

Adicionalmente, se recomienda incrementar la capacidad del tanque existente para garantizar el cumplimiento del tiempo de retención de 20 minutos requerido para una desinfección efectiva. En la Tabla 11 se resume las alternativas para la PTAP La Mulata.

Tabla 11

Alternativas para la PTAP La Mulata.

Alternativas para tratar turbiedades altas	Capacitación de los operarios para dosificar el coagulante. Construcción de una laguna de presedimentación y de una bocatoma lateral.
Alternativas para el mezclador rápido	Eliminar la tabla en el vertedero. Realizar estudios de tratabilidad del agua para verificar las dosis óptimas del Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$. Adición de un polímero natural como coadyuvante en el proceso de coagulación/floculación como el almidón. Reubicar el punto de dosificación del coagulante. Reducir la altura del tabique de salida.
Alternativas para la mezcla lenta	Controlar el tiempo de floculación y dosificación de los coagulantes y floculantes en la PTAP existente. Verificar el diámetro y superficies internas de las tuberías de conexión a la PTAP existente.
Alternativas en la sedimentación	Mantenimiento preventivo semanal, incluyendo la limpieza de la estructura, o con mayor frecuencia si la acumulación de sedimentos lo requiere, a fin de evitar obstrucciones.
Alternativas en la desinfección	Implementación de un tanque de cloración para el tren de tratamiento nuevo. Ampliación del tanque de cloración para el tren de tratamiento existente.

7.3 Análisis de la eficiencia de la PTAP: Calidad del agua

7.3.1 Fuentes de abastecimiento

El sistema de acueducto de la Empresa de Servicios Públicos Aguas Mocoa S.A E.S.P se abastece principalmente del río Mulato. A través de una línea de aducción, el agua llega al PTAP La Mulata, que cubre el norte y suroccidente del municipio (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2022). La microcuenca del río Mulato se ubica en el piedemonte amazónico, sobre el borde oriental de la Cordillera Oriental, la microcuenca vierte sus aguas al río Mocoa. El 49,6% del área total de la microcuenca está cubierto por bosque primario con baja intervención. Sin embargo, presenta un alto grado de procesos erosivos debido a las condiciones climáticas de la región, caracterizadas por altas precipitaciones, y a la inestabilidad geológica, que genera movimientos de masa y degradación de los suelos. Estos factores inciden en la pérdida de la capa productiva, la socavación de los taludes de las quebradas y el aumento de la sedimentación, lo que conlleva a una alta contaminación de las aguas (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2022).

Adicionalmente, se identificaron diversos puntos de vertimiento de aguas residuales provenientes de viviendas y un centro educativo. Asimismo, en las zonas alta y media de la cuenca del río Mulato, se desarrollan actividades económicas como el cultivo de café y caña, la ganadería y la extracción de material de arrastre, generalmente de baja intensidad. Si bien esto implica un menor uso de químicos en las cosechas, se identificó el empleo de Metil Paratión (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021).

A raíz de los eventos fluviotorrenenciales que se han presentado en Mocoa en los últimos años, el suministro de agua se ha visto comprometido. Los derrumbes ocurridos aguas arriba de la bocatoma del río Mulato producen una alta turbidez en el agua, forzando el cierre de la PTAP y desencadenando problemas sociales y de salud en la comunidad. Debido a esta situación, Aguas Mocoa determinó la búsqueda de fuentes alternativas para abastecer a la cabecera municipal (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2022).

Como fuentes alternas, se utilizan las quebradas Chontayaco y Mulatico, cuyas aguas se cloran y distribuyen directamente al centro del municipio, debido a que la PTAP La Mulata no tiene la capacidad para tratarlas y a que presentan turbiedades cercanas a cero (Rodriguez, 2024).

La quebrada Chontayaco presenta un punto de captación caracterizado por un entorno montañoso y boscoso, con pendientes superiores al 75%, valles en V y suelos superficiales. Este cuerpo de agua nace en una zona boscosa declarada área de conservación y protección forestal. Las altas pendientes y la saturación del suelo hacen que las épocas de invierno o de altas precipitaciones favorezcan la formación de represamientos, inundaciones, desbordamientos y socavación, debido

al arrastre de sólidos y al transporte de sedimentos desde la parte alta de la cordillera. Estos fenómenos pueden dañar la infraestructura del sistema (bocatoma y línea de aducción) y alterar las características fisicoquímicas del agua, lo que podría ocasionar la suspensión del servicio (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021).

Sin embargo, es importante destacar que el punto de captación sobre la Quebrada Chontayaco se ubica en un baldío nacional sin presencia de viviendas. El asentamiento más cercano, la Vereda San Luis de Chontayaco, se encuentra a aproximadamente 1 kilómetro de distancia y alberga a 40 familias. Por lo tanto, esta fuente de agua no se ve directamente afectada por contaminación antrópica (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2022).

En cuanto al riesgo de contaminación, las evaluaciones fisicoquímicas y microbiológicas del agua cruda de la quebrada Chontayaco determinaron concentraciones de hierro superiores a los límites permisibles de la resolución 2115 del 2007. También se evidenció la presencia de Coliformes Totales y fecales, lo que indica que el agua cruda no es apta para el consumo humano y requiere tratamiento previo a su distribución a la población (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021).

Por otro lado, el punto de captación de la quebrada Mulatico presenta una cobertura vegetal sin actividades agropecuarias ni viviendas, debido a las agrestes condiciones geomorfológicas del terreno. De acuerdo con la clasificación de bosques del IDEAM, corresponde a Selva húmeda tropical, también conocida como Bosque basal amazónico. Cabe destacar que en las riberas de la quebrada no se observaron residuos sólidos ni vertimientos de aguas negras o residuales. (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2021).

7.3.1.1 Mapas de riesgo de las fuentes de abastecimiento. Con el fin de evaluar la vulnerabilidad de las zonas adyacentes al río Mulato y las quebradas Chontayaco y Mulatico, se elaboraron mapas de riesgo. Los resultados de este análisis se presentan en las Tablas 12, 13 y 14.

Tabla 12

Mapa de riesgo del río Mulato

Características	Actividad contaminante de la fuente abastecedora	Usos del Suelo	Erosión	Movimiento de masa	Socavación	Extracción de minerales	Descargas Residenciales	Descarga vertimientos	Descargas Agropecuarias	Producción de hortalizas y legumbres	Cría de ganado vacuno y porcino	Otras Descargas	De Origen Natural
Físicas	Color Aparente		x	x	x	x		x					x

Tabla 13

Mapa de riesgo de la quebrada Chontayaco

Características	Actividad contaminante de la fuente abastecedora												
		Usos del Suelo	Erosión	Movimiento de masa	Socavación	Extracción de minerales	Descargas Residuales	Descarga vertimientos	Descargas Agropecuarias	Producción hortalizas y legumbres	Cría de ganado vacuno y porcino	Otras Descargas	De Origen Natural
Físicas	Color Aparente		x	x	x	x		x					x
	Turbiedad		x	x	x	x		x					x
	Sólidos Totales		x	x	x	x							x
	Solidos sedimentables		x	x	x	x							x
	pH												x
	Temperatura												x
	Conductividad		x										x
Químicas con reconocido efecto adverso en la salud humana	Cadmio												x
	Cianuro Libre												x
	Cobre												x
	Mercurio					x							
	Nitrógeno total							x					
	Nitrógeno amoniacal							x					
	Plomo												x
Químicas con consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana	DBO							x					
	DQO							x					
	Oxígeno Disuelto							x					
	Carbono Orgánico Total												x
	Nitritos		x			x					x		
	Nitratos		x			x					x		
	Fluoruros		x			x							
	Calcio		x			x					x		
	Alcalinidad Total		x			x							x
	Aluminio		x			x							
	Dureza Total		x			x							x
	Hierro Total		x			x							x
	Sulfatos		x			x							
Fosfatos												x	
Químicas plaguicidas y otras sustancias	Otros orgánicos sintéticos					x							
	Coliformes Totales							x			x		x
Microbiológicas	Coliformes Fecales							x			x		x

Nota. Adoptado de (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024) y de (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2022).

Tabla 14

Mapa de riesgo de la quebrada Mulatico

Características	Actividad contaminante de la fuente abastecedora	Usos del Suelo	Erosión	Movimiento de masa	Socavación	Otras Descargas	De Origen Natural
Físicas Químicas con consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana	Color Aparente		x	x	x		x
	Turbiedad		x	x	x		x
	Sólidos Totales		x	x	x		x
	Solidos sedimentables		x	x	x		x
	pH						x
	Temperatura						x
	Conductividad		x				x
	Carbono Orgánico Total						x
	Nitritos		x				
	Nitratos		x				
	Fluoruros		x				
	Calcio		x				
	Alcalinidad Total		x				x
	Aluminio		x				
	Dureza Total		x				x
	Hierro Total		x				x
	Sulfatos		x				
Fosfatos						x	
Microbiológicas	Coliformes Totales						x
	Coliformes Fecales						x

Nota. Adoptado de (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024) y de (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2022).

Los mapas de riesgo evidencian que el río Mulato y la quebrada Chontayaco, se encuentran sometidos a una afectación antrópica y natural mientras que la quebrada Mulatico solo se encuentra afectada por procesos naturales. Las condiciones climáticas, como las altas precipitaciones, y la inestabilidad geológica de la región favorecen procesos erosivos, movimientos en masa y pérdida de la capa vegetal. Estos factores, sumados a la presencia de actividades humanas como la agricultura, ganadería y los vertimientos de aguas residuales, generan una alta sedimentación, aumentando la turbidez del agua y afectando la calidad del recurso hídrico. Además, la socavación de los taludes, la pérdida de la capa productiva y los represamientos en las zonas de captación incrementan la vulnerabilidad de las zonas adyacentes a los ríos. En consecuencia, se presenta la interrupción del sistema de acueducto (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2022).

De acuerdo con Montoya (2011) la calidad del agua se ve afectada por diversos factores. Por un lado, el cambio climático y la degradación de las cuencas hidrográficas, causados por la

contaminación y la deforestación, aumentan la frecuencia y la intensidad de eventos extremos que afectan la calidad del agua. Por otro lado, actividades humanas como los vertimientos de aguas residuales y la escorrentía superficial, elevan los niveles de contaminantes como sólidos suspendidos, turbidez, color, DQO, amoníaco y reducen parámetros como conductividad, temperatura y alcalinidad como se puede apreciar en las Tablas 12, 13 y 14.

Ante esta situación, la PTAP La Mulata tiene el desafío de garantizar la calidad y la continuidad del agua a sus usuarios. Para lograrlo, se debe tener un sistema de tratamiento adecuado, que cumpla los estándares de calidad establecidos en la normatividad.

7.3.1.2 IRCA de las fuentes de abastecimiento. Se calculó el IRCA para el río Mulato y la quebrada Chontayaco mediante la ecuación 5. Este índice se empleó para evaluar las características de estas fuentes de abastecimiento y los puntajes de riesgo obtenidos se presentan en las Tablas 15 y 16. Estas muestras fueron tomadas el 2 de diciembre de 2020.

Ecuación 5

IRCA

$$IRCA \text{ por muestra} = \frac{\sum \text{Puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{Puntajes de riesgo asignado a todas características analizadas}} * 100$$

Fuente. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007).

Tabla 15

Puntajes de riesgo asociados a los parámetros evaluados en el IRCA del río Mulato del 2020

Parámetro	Resultado	Unidades	Puntaje de Riesgo (analizadas)	Puntaje de Riesgo (no aceptables)
Color aparente	32.0	UPC	6	6
Turbiedad	117.0	UNT	15	15
pH	7.13	Unidades de pH	1.5	0
Alcalinidad Total	30.0	mg/L	1	0
Calcio	10.0	mg/L	1	0
Manganeso	0.05	mg/L	1	0
Molibdeno	0.05	mg/L	1	0
Magnesio	5	mg/L	1	0
Dureza total	17.8	mg/L	1	0
Sulfatos	25.0	mg/L	1	0
Hierro	0.050	mg/L	1.5	0
Cloruros	8.0	mg/L	1	0

Nitratos	0.5	mg/L	1	0
Nitritos	0.005	mg/L	3	0
Aluminio	0.05	mg/L	3	0
Fluoruros	0.03	mg/L	1	0
COT	3.5	mg/L	3	0
Coliformes Totales	540	UFC /100 mL	15	15
Coliformes Fecales	350.0	UFC/100 mL	25	25
Puntaje total	-----	-----	83	61

Tabla 16

Puntajes de riesgo asociados a los parámetros evaluados en el IRCA de la quebrada Chontayaco del 2020

Parámetro	Resultado	Unidades	Puntaje de Riesgo (analizadas)	Puntaje de Riesgo (no aceptables)
Color aparente	8.91	UPC	6	0
Turbiedad	0.42	UNT	15	0
pH	7.54	Unidades de pH	1.5	0
Alcalinidad Total	9.0	mg/L	1	0
Calcio	2.0	mg/L	1	0
Fosfatos	0.2	mg/L	1	0
Dureza total	11.8	mg/L	1	0
Sulfatos	10.0	mg/L	1	0
Hierro	0.112	mg/L	1.5	0
Cloruros	3.0	mg/L	1	0
Nitratos	0.01	mg/L	1	0
Nitritos	0.01	mg/L	3	0
Aluminio	0.046	mg/L	3	0
Fluoruros	0.2	mg/L	1	0
COT	2.44	mg/L	3	0
Coliformes Totales	385	UFC /100 mL	15	15
Coliformes Fecales	10.0	UFC/100 mL	25	25
Puntaje total	-----	-----	81	40

Los resultados del IRCA indican un nivel de riesgo alto tanto para el río Mulato (73.5%) como para la quebrada Chontayaco (49.4%). De acuerdo con la Resolución 2115 de 2017, el agua de ambas fuentes no es apta para consumo humano directo y requiere de un tratamiento adecuado

por parte de las empresas prestadoras de servicios públicos y las autoridades locales (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007).

7.4 Análisis del servicio agua potable en el municipio de Mocoa a través de la evaluación de las 6C (calidad, cantidad, continuidad, cobertura, costo y cultura hídrica)

A continuación, se presenta la evaluación del proceso de tratamiento de la planta, considerando los aspectos de calidad, cantidad, continuidad, cobertura, costo y cultura hídrica.

7.4.1 IRCA al agua tratada

El cálculo del IRCA para el agua tratada se realizó con base en los datos suministrados por Aguas Mocoa para el periodo de enero a mayo del 2024. Para complementar esta información, se descargaron todos los datos del IRCA disponibles en el SIVICAP, que cubren desde enero hasta septiembre del 2024.

Las Tablas 17 y 18 muestran los resultados de turbiedad, cloro, pH y coliformes totales y fecales del agua tratada en los puntos de muestreo de las redes 1 y 2, respectivamente.

Tabla 17

Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la Red 1

Mes	Punto de muestreo	Fecha de muestreo	Red 1 (Línea alterna)						IRCA	Clasificación Resolución 2115/2007
			Análisis fisicoquímicos			Análisis microbiológico				
			Turbiedad (UNT)	Cloro (mg/L Cl ₂)	pH (unidades de pH)	Coliformes Totales (UFC/100ml)	Coliformes fecales (UFC/100ml)			
Enero	B/ Miraflores - Vivienda José Pinta - cód.: 860010101 - Sector centro	30/01/2024	0.6	0.43	6.9	0	0	0.0%	Sin riesgo	
	B/ Centro - Vivienda María López - cód.: 860010102 - Sector centro	30/01/2024	0.4	0.63	7.18	0	0	0.0%	Sin riesgo	

Febrero	No hubo toma de muestras por falta de servicio en la red								
Marzo	B/ Miraflores - Vivienda José Pinta - cód.: 860010101 - Sector centro	19/03/2024	0.4	1	7.48	0	0	0.0%	Sin riesgo
	B/ Centro - Vivienda María López - cód.: 860010102- Sector centro	19/03/2024	0.5	0.93	7.45	0	0	0.0%	Sin riesgo
Abril	No hubo toma de muestras por falta de servicio en la red								
Mayo	B/ Miraflores - Vivienda José Pinta - cód.: 860010101 - Sector centro	15/05/2024	1.3	0.65	7.24	0	0	0.0%	Sin riesgo
	Av. Colombia Almacén Honda. Henry Chávez - cód.: 860010104 - Sector centro	15/05/2024	2.3	0.98	7.19	0	0	20.69 %	Medio

Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Tabla 18

Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la Red 2

Mes	Punto de muestreo	Fecha de muestreo	Red 2 (PTAP)						
			Análisis fisicoquímicos			Análisis microbiológico		IRCA	Clasificación Resolución 2115/2007
			Turbiedad (UNT)	Cloro (mg/L Cl ₂)	pH (unidades de pH)	Coliformes Totales (UFC/100ml)	Coliformes fecales (UFC/100ml)		
Enero	B/ Sauces - Vivienda Betsabet - cód.:	31/01/2024	0.5	0.7	7.38	0	0	0.0%	Sin riesgo

	860010201 - Sector suroccidente								
	B/ Villa Diana - Vivienda Víctor Liñeiro - cód.: 86001-0204- sector Norte	31/01/2024	0.5	0.66	7.37	0	0	0.0%	Sin riesgo
Febrero	B/ Sauces - Vivienda Betsabet - cód.: 86001-0201 - sector suroccidente	28/02/2024	0.3	1.36	7.1	0	0	0.0%	Sin riesgo
	B/ Reserva - Colegio Fidel de Monclart - cód.: 86001-0205- sector Norte	28/02/2024	0.4	1.34	7.27	0	0	0.0%	Sin riesgo
Marzo	B/ Sauces - Vivienda Betsabet - cód.: 86001-0201 - sector suroccidente	19/03/2024	0.4	0.98	7.42	0	0	0.0%	Sin riesgo
	B/ Reserva - Colegio Fidel de Monclart - cód. 86001-0205- sector Norte	19/03/2024	0.7	0.79	7.38	0	0	0.0%	Sin riesgo
Abril	B/ Sauces - Vivienda Betsabet - cód.: 86001-0201 - sector suroccidente	11/04/2024	0.4	1.09	7.12	0	0	0.0%	Sin riesgo
	B/ Reserva - Colegio Fidel de Monclart - cód. 86001-0205- sector Norte	11/04/2024	0.5	1.1	7.06	0	0	0.0%	Sin riesgo
Mayo	B/ Sauces - Vivienda Betsabet - cód.: 86001-0201 - sector suroccidente	16/05/2024	0.6	1.52	6.81	0	0	0.0%	Sin riesgo
	B/ Reserva - Colegio Fidel de Monclart - cód.: 86001-0205- sector Norte	16/05/2024	1.7	1.26	6.95	0	0	0.0%	Sin riesgo

Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

En cumplimiento de la Resolución 2115 de 2007, Aguas Mocoa S.A. E.S.P. ha reportado los Índices de Riesgo de la Calidad del Agua al Sistema Único de Información. La Tabla 19 presenta los valores de IRCA por muestra, según lo estipulado en el Decreto 1575 de 2007, correspondientes a la PTAP La Mulata. Estos datos, obtenidos del SIVICAP (Instituto Nacional de Salud, 2024), abarcan los meses de enero a septiembre del 2024 (únicos disponibles).

Tabla 19

IRCA por muestra por persona prestadora (Decreto 1575/2007)

Año	Municipio	Persona prestadora	Fecha de la toma	IRCA a reportar	Nivel de riesgo
2024	Mocoa	Empresa Municipal de Servicios Públicos Domiciliarios de Mocoa Aguas Mocoa E.S.P.	30/01/2024 02:43:00	0	Sin riesgo
			30/01/2024 03:02:00	0	Sin riesgo
			31/01/2024 02:30:00	0	Sin riesgo
			31/01/2024 03:40:00	0	Sin riesgo
			28/02/2024 02:40:00	0	Sin riesgo
			28/02/2024 03:20:00	0	Sin riesgo
			19/03/2024 10:00:00	0	Sin riesgo
			19/03/2024 09:40:00	0	Sin riesgo
			19/03/2024 09:10:00	0	Sin riesgo
			19/03/2024 10:20:00	0	Sin riesgo
			11/04/2024 09:30:00	0	Sin riesgo
			11/04/2024 10:00:00	0	Sin riesgo
			15/05/2024 09:20:00	0	Sin riesgo
			15/05/2024 09:50:00	20.6896	Medio
			16/05/2024 09:20:00	0	Sin riesgo
			16/05/2024 09:45:00	0	Sin riesgo
			25/06/2024 03:45:00	0	Sin riesgo
			25/06/2024 04:05:00	0	Sin riesgo
			26/06/2024 10:45:00	0	Sin riesgo
			26/06/2024 11:20:00	0	Sin riesgo
			10/07/2024 10:05:00	0	Sin riesgo
			10/07/2024 10:20:00	0	Sin riesgo
			11/07/2024 09:15:00	0	Sin riesgo
			11/07/2024 09:40:00	0	Sin riesgo
			08/08/2024 03:30:00	0	Sin riesgo
			08/08/2024 03:35:00	20.6896	Medio
			08/08/2024 03:43:00	0	Sin riesgo
11/09/2024 11:00:00	0	Sin riesgo			
11/09/2024 11:28:00	0	Sin riesgo			
12/09/2024 10:22:00	0	Sin riesgo			
12/09/2024 10:47:00	0	Sin riesgo			

Fuente. (Instituto Nacional de Salud, 2024).

De acuerdo con los resultados de los análisis realizados el 15 de junio y el 8 de agosto del 2024, el IRCA se clasificó como medio, indicando que el agua no era apta para consumo humano.

Según la Resolución 0330 del 2017 esta situación requirió una gestión directa por parte de la entidad prestadora del servicio (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007).

Durante el periodo comprendido entre enero y septiembre del presente año, la calidad del agua se mantuvo sin riesgo, lo que la clasifica como apta para el consumo humano (Instituto Nacional de Salud, 2024). Sin embargo, de acuerdo con el decreto 475 del 1998 se recomienda continuar con el programa de monitoreo y vigilancia establecido (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 1998).

Los reportes de la red 1, de enero a mayo, evidencian que no se tomaron muestras en febrero y abril debido a la interrupción del servicio. En mayo, se registró un nivel de riesgo medio.

De hecho, la época de lluvias ocasiona problemas en el sistema de suministro de agua potable de Mocoa. Los altos niveles de turbidez, superiores a 3000 UNT, producto del arrastre de sedimentos por las fuertes lluvias, superan la capacidad de tratamiento de la planta. Paralelamente, los eventos geológicos como las crecientes súbitas y los deslizamientos de tierra han afectado las infraestructuras de captación y la línea de conducción, generando interrupciones en el suministro y afectando la calidad del agua disponible (Alcaldía de Mocoa, 2023).

Por otro lado, se consultó el Informe Consolidado del IRCA Anual por Municipio (Decreto 1575/2007) para el período 2020-2024 a través del SIVICAP, cuyos datos se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20

Consolidado del IRCA Anual por Municipio (Decreto 1575/2007) para el período 2020-2024

Año	Nombre Municipio	Ubicación	IRCA	Nivel de Riesgo
2020	Mocoa	Urbano	20.4462	Medio
2021	Mocoa	Urbano	13.5346	Bajo
2022	Mocoa	Urbano	11.0304	Bajo
2023	Mocoa	Urbano	2.3222	Sin Riesgo
2024	Mocoa	Urbano	0.8445	Sin Riesgo

Fuente. (Instituto Nacional de Salud, 2024).

En 2020 se registró un nivel de riesgo medio; en 2021 y 2022, un riesgo bajo. Estos niveles de riesgo indican que el agua no cumple la Resolución 2115 del 2007 durante dichos períodos (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007). Desde 2023 hasta la fecha, el

agua se ha mantenido dentro de los parámetros, es decir, sin riesgo (Instituto Nacional de Salud, 2024).

Asimismo, el artículo 3 de la Resolución 811 de 2008, se requiere un mínimo de 8 puntos de muestreo para poblaciones entre 20001 y 100000 habitantes (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2008). Actualmente, según la última actualización de las actas de concertación, se han establecido 10 puntos de muestreo en la red de distribución. Los puntos de muestreo se encuentran distribuidos entre dos redes: la red 1, que se abastece del sistema alterno, y la red 2, proveniente de la PTAP La Mulata. En la Figura 8 se observa el punto de muestreo número 2 de la red 2 (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Figura 8

Punto No. 2 de la Red 2



Nota. Fuente (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

7.4.2 Cobertura

Aguas Mocoa cuenta con 8008 suscriptores, distribuidos en cinco zonas (ver figura 1). Las zonas 1, 2 ,4 y 5 concentran 3058, 3133, 1427 y 390 usuarios, respectivamente. La zona 3 corresponde al Acueducto Comunitario Barrios Unidos de Mocoa (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Para determinar el porcentaje de cobertura, se empleó la Ecuación 6, que relaciona el número de conexiones con el número de viviendas en el municipio. Con 6616 conexiones y 8724

viviendas, el resultado del cálculo es una cobertura del 75.8% (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Ecuación 6

Cobertura

$$\% \text{ cobertura acueducto} = (\text{Número de conexiones} / \text{número de viviendas}) * 100$$

Fuente. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017).

7.4.3 Continuidad

La Tabla 21 muestra que, hasta la fecha, la PTAP La Mulata no ha garantizado un suministro continuo de agua potable durante las 24 horas del día en las zonas norte, suroccidente y centro de Mocoa del año 2024. Se observan fluctuaciones en la continuidad del servicio con patrones distintos según la zona.

Tabla 21

Continuidad del servicio de agua potable en la zona norte, suroccidente y centro

Mes	Norte			Suroccidente			Centro		
	Horas /Día	Clasificación Resolución 2115/2007	Horas suspendidas	Horas /Día	Clasificación Resolución 2115/2007	Horas suspendidas	Horas /Día	Clasificación Resolución 2115/2007	Horas suspendidas
Enero	23.64	Continuo	11	23.77	Continuo	7	22.88	Suficiente	34
Febrero	23.25	Continuo	26	23.1	Continuo	27	22.16	Suficiente	56
Marzo	19.30	Suficiente	143	20.220	Suficiente	115	20.55	Suficiente	105
Abril	21.86	Suficiente	65	21.86	Suficiente	65	19.99	Suficiente	122
Mayo	23.01	Continuo	30	23.41	Continuo	30	20.91	Suficiente	94
Junio	21.07	Suficiente	89	22.42	Suficiente	48	20.12	Suficiente	118
Julio	20.91	Suficiente	94	22.55	Suficiente	44	22.22	Suficiente	54

Agosto	23.08	Continuo	28	23.24	Continuo	23	23.20	Continuo	24
Septiembre	23.28	Continuo	22	22.95	Suficiente	32	22.00	Suficiente	62
Octubre	22.75	Suficiente	38	23.24	Continuo	23	22.85	Suficiente	35
Noviembre	21.70	Suficiente	70	22.29	Suficiente	52	20.84	Suficiente	96
Diciembre	22.55	Suficiente	44	22.22	Suficiente	54	21.40	Suficiente	79

Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

En las zonas norte y suroccidente, se identificaron dos patrones: durante cinco meses se proveyó un servicio de aproximadamente 23 horas/día, mientras que, en los siete meses restantes, el suministro osciló entre 19 y 22 horas/día. En contraste, la zona centro presentó una mayor variación, con solo un mes (agosto) en el que se alcanzó un servicio de 23 horas/día.

Adicionalmente, la clasificación del servicio según la Resolución 2115 del 2007, indica que tanto en la zona norte como en el suroccidente predominó la clasificación suficiente durante siete meses. No obstante, la zona norte registró un único mes (agosto) con servicio continuo, manteniendo la clasificación suficiente durante el resto del año.

Finalmente, se registraron interrupciones del servicio en las tres zonas durante enero y diciembre de 2023. La zona centro fue la más afectada en términos de frecuencia y duración de estas interrupciones, seguida por la zona norte y, en menor medida, el suroccidente.

Asimismo, en la página web de Aguas Mocoa se reportan las fechas y horas correspondientes a la habilitación, suspensión y sectorización del servicio de agua (ver Figura 9) (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2020).

Figura 9

Histórico de reportes del estado de prestación del servicio de acueducto

FECHA Y HORA	SISTEMA PALMERAS	SISTEMA CHONTAYACO	ZONA CENTRO	ZONA SUR OCCIDENTE	ZONA NORTE	
10-Octubre-2024 11:10 AM	Habilitado	Habilitado	Habilitado	Habilitado	Suspendido	Ver reporte
25-Septiembre-2024 8:40 AM	Habilitado	Habilitado	Habilitado	Suspendido	Habilitado	Ver reporte
18-Septiembre-2024 4:50 PM	Suspendido	Habilitado	Habilitado	Habilitado	Suspendido	Ver reporte
16-Septiembre-2024 4:25 PM	Suspendido	Habilitado	Suspendido	Suspendido	Suspendido	Ver reporte
6-Septiembre-2024 2:30 PM	Suspendido	Habilitado	Suspendido	Suspendido	Suspendido	Ver reporte
16-Agosto-2024 3:50 PM	Suspendido	Habilitado	Sectorización	Sectorización	Sectorización	Ver reporte

Nota. Fuente (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2020).

Por otro lado, la infraestructura del sistema de acueducto es vulnerable a inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales, eventos que pueden causar colapsos y afectar la continuidad del servicio. Los racionamientos resultantes varían en duración, desde interrupciones prolongadas de hasta dos días hasta cortes más breves de varias horas en un día (Aguas Mocoa S.A E.S.P, 2022).

Adicionalmente, según Aguas Mocoa S.A. E.S.P. (2024), la continuidad del servicio se ve afectada por dos factores principales: la alta turbiedad del río Mulato durante las lluvias, que provoca interrupciones en un 3.03% promedio, y las suspensiones eventuales por mantenimiento.

Como consecuencia de las crecientes súbitas que afectaron la captación del sistema y por ende la prestación del servicio, se realizaron descolmataciones correctivas en las bocatomas, las cuales se registran también en la Tabla 22.

Tabla 22

Número de descolmataciones correctivas en las bocatomas del 2023

Mes	Palmeras	Mulatico	Chontayaco
Enero	4	4	5
Febrero	3	3	4
Marzo	4	1	5
Abril	6	0	5
Mayo	5	0	3
Junio	4	0	4
Julio	4	0	4
Agosto	3	1	3
Septiembre	3	2	3
Octubre	4	2	4
Noviembre	2	2	2
Diciembre	2	2	2

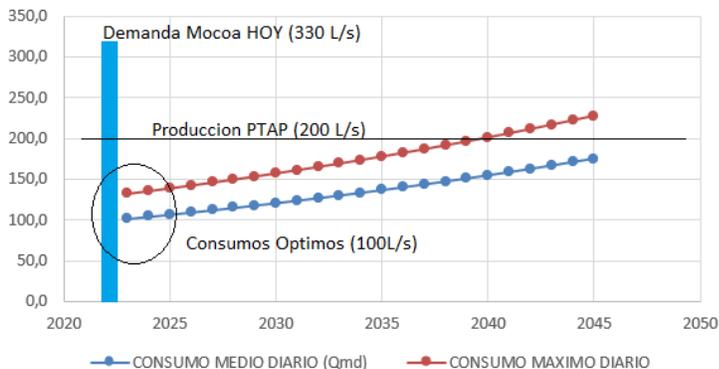
Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

7.4.4 Cantidad

De acuerdo con la Gráfica 2, el consumo diario de agua en Mocoa presenta un rango de 100 a 180 L/s para el consumo medio, y de 140 a 235 L/s para el consumo máximo. Sin embargo, la PTAP La Mulata tiene una capacidad de producción diaria de tan solo 200 L/s. Esta capacidad resulta insuficiente para satisfacer la demanda diaria de la ciudad, estimada en 330 L/s (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Gráfica 2

Consumo diario en Mocoa



Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

En la Gráfica 3 se evidencia una notoria diferencia en el consumo de agua entre el sector comercial y los estratos socioeconómicos residenciales. El sector comercial presenta el mayor consumo, con un rango entre 66 y 135 m³. En los estratos residenciales, el estrato 1 registra el mayor consumo promedio (entre 27 y 71 m³), seguido por el estrato 2 (entre 24 y 63 m³) y, finalmente, el estrato 3 (entre 22 y 38 m³) por mes (Alcaldía de Mocoa, 2023).

Gráfica 3
Histórico de promedio de consumo por uso y estrato



Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

La Gráfica 4 muestra una disminución significativa del consumo mensual en Mocoa, atribuida principalmente al seguimiento de inmuebles de alto consumo. Tras las visitas técnicas y la identificación de las causas del derroche, los usuarios realizaron las reparaciones pertinentes, lo que ha resultado en un uso más eficiente y un ahorro del recurso hídrico (Alcaldía de Mocoa, 2023).

Gráfica 4
Histórico de promedio de consumo por zona

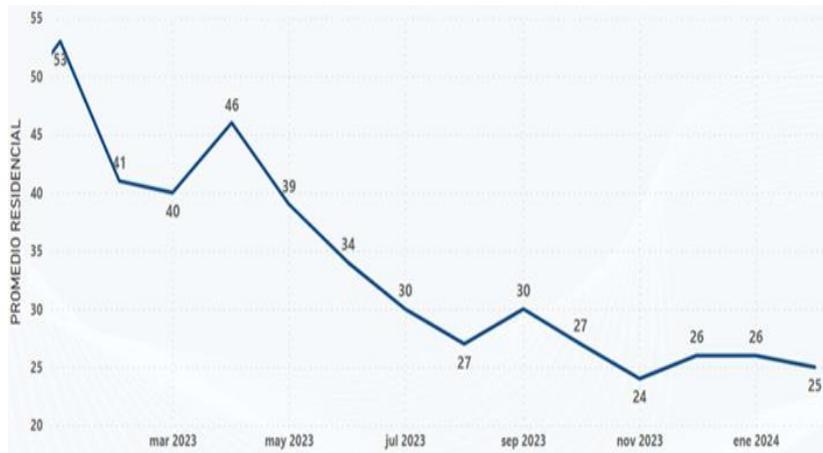


Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

La Gráfica 5 muestra que el consumo residencial promedio mensual de agua fluctuó entre 24 y 53 m³ entre marzo de 2023 y enero de 2024. Estos datos sirvieron de base para el cálculo de las tarifas de facturación (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Gráfica 5

Consumo residencial promedio mensual



Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

Según Aguas Mocoa S.A. E.S.P. (2023), la disminución gradual del consumo promedio ha tenido un impacto positivo en la protección de las fuentes hídricas, mejorando significativamente la presión, continuidad y calidad del servicio.

7.4.5 Cultura hídrica

De acuerdo con Aguas Mocoa S.A. E.S.P. (2024), el sistema presenta pérdidas estimadas en un 74%. Además, según Rodríguez (2024) han observado un uso inadecuado del recurso hídrico por parte de la población durante períodos de racionamiento, como el lavado de vehículos y patios.

Adicionalmente, la falta de control, cultura de ahorro y el hiperconsumo han incrementado la demanda de agua, requiriendo un mayor caudal para el abastecimiento. Se han detectado consumos excesivamente altos en algunos barrios con micromedición, un comportamiento que podría haberse presentado durante años. Sin embargo, fue a partir de la instalación de medidores en 2021 que se pudieron identificar y caracterizar las viviendas con consumos entre 60 m³ y 500 m³ mensuales. Este derroche de agua tratada, que no se está facturando, genera pérdidas

económicas debido al aumento en los costos de tratamiento y potabilización (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

En la Tabla 23 se presenta el consumo de una vivienda durante un periodo de 6 meses, registrando un total de 6428 m³. Es importante destacar que, a pesar de superar los 500 m³ mensuales, el usuario solo pago la tarifa plena vigente. Este caso, uno de muchos identificados gracias a la micromedición evidencia la falta de conciencia en el uso responsable del agua por parte de algunos usuarios (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

Tabla 23

Consumo mensual de una vivienda durante enero y junio del 2023

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Lectura registrada (m³)	1054	1467	2102	3205	4654	6428
Promedio de consumo mensual (m³)	510	413	635	1103	1449	1774

Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

Con un consumo promedio de 3.8 m³ de agua por persona al mes, una familia de cuatro integrantes debería consumir alrededor de 15.4 m³ mensuales. No obstante, el consumo en algunas viviendas excede hasta cuatro veces este valor. Esta situación, asociada a la falta de cobro por micromedición, ocasiona pérdidas económicas para la empresa, derivadas del uso de insumos para el tratamiento de un agua que se desperdicia y no se factura (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

El consumo de agua también aumenta considerablemente durante la celebración del Día del Agua (28 de diciembre) debido a la arraigada tradición de mojar a las personas. A pesar de los esfuerzos por modificar esta costumbre, la participación juvenil en las "guerras de agua" persiste.

7.4.6 Costo

Aguas Mocoa S.A. E.S.P. (2024) indica que, durante los últimos 7 meses del presente año, el consumo promedio por vivienda alcanzó los 45.9 m³. Sin embargo, la facturación mensual se basa en una tarifa fija de consumo: 20 m³ para el estrato 1, 23 m³ para el estrato 2 y 25 m³ para el estrato 3.

Adicionalmente, según Aguas Mocoa (2023), la determinación del consumo de sus usuarios se basa en el artículo 146 de la Ley 142 de 1994, el cual establece que, “Cuando no es posible medir el consumo con instrumentos, se puede estimar su valor con base en promedios de consumo del mismo usuario en otros periodos, promedios de usuarios en circunstancias similares, o aforos individuales”. Asimismo, se aplica la Resolución 052 del 26 de abril de 2023 "Por la cual se ajusta el rango de consumo complementario aplicado a los servicios públicos de acueducto y alcantarillado", ajustando los rangos de consumo básico y complementario para los usuarios sin micromedición, a quienes se aplica la tarifa plena en su factura mensual (Ver Tabla 24 y 25).

Tabla 24

Consumo total facturado

Estrato	Consumo básico (m³)	Consumo complementario (m³)	Consumo total facturado (m³)
1	16	4	20
2	16	7	23
3	16	9	25

Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

Tabla 25

Número de medidores instalados

Sector	Estrato	No. Medidores instalados
Residencial	1	2755
	2	67
	3	59
No residencial	Comercial	33
	Oficial	0
Total		2914

Fuente. (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

El estrato 1, que representa el 71.53% de la población municipal, concentra el mayor porcentaje de instalación de micromedidores, seguido por el estrato 2 (14.51%) y el estrato 3

(4.61%). Los indicadores de cobertura de micromedición se calculan según lo establecido en el artículo 146 de la Ley 142 de 1994. Sin embargo, para Aguas Mocoa S.A. E.S.P., la cobertura nominal, real y efectiva de micromedidores en el sistema de acueducto es del 38.05% (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023), dicha cifra se encuentra por debajo del 95% sugerido en el artículo 146 de la Ley 142 de 1994 y de la Resolución CRA 151 de 2001 (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

La Tabla 26 presenta las tarifas de un servicio de agua para los años 2023 y 2024, para el estrato socioeconómico 1, 2 y 3. Se observa un incremento en el valor por m³ de agua entre ambos años, pasando de \$676.24 en 2023 a \$1281.00 en 2024. Además, muestra los costos totales por consumo de 25 m³ en 2023 y 23 m³ en 2024, evidenciando un aumento en el monto a pagar por los usuarios en todos los estratos. Para el año 2024, el estrato 1 pagó \$18396, el estrato 2 pagó \$27810 y el estrato 3 pagó \$34534 (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Tabla 26
Tarifas 2023 y 2024

Valor por cada m³				
Tarifa 2023 (1 m ³)	\$ 676.24			
Tarifa 2024 (1 m ³)	\$ 1281.00			
Valor total m³	Estrato			
	1	2	3	
Tarifa 2023 (25 m ³)	\$ 13889	\$ 21103	\$ 25215	
Tarifa 2024 (23 m ³)	\$ 18396	\$ 27810	\$ 34534	

Nota. Adoptado de (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2024).

Aguas Mocoa S.A. E.S.P. (2024) manifiesta que la PTAP La Mulata genera un volumen mensual de 418000 m³ de agua potable. Al comparar esta cifra con el volumen facturado, se observa una diferencia significativa. De los 418000 m³ producidos, 62000 m³ (13%) se facturan mediante micromedición, mientras que se estima que 58500 m³ (13%) son consumidos por usuarios sin medidor, considerando un consumo promedio de 25 m³ por usuario. En consecuencia, se registran pérdidas mensuales de 297500 m³, lo que representa el 74% del agua producida.

Por otro lado, según Aguas Mocoa S.A. E.S.P. (2023), el Acuerdo de subsidios y contribuciones vigente (No. 017 del 7 de julio de 2017) establece los siguientes parámetros: los subsidios para los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo no superaron el 70% del costo de suministro para el estrato 1, el 40% para el estrato 2 y el 15% para el estrato 3, en concordancia

con el numeral 6 del artículo 99 de la Ley 142 de 1994 (ver Tabla 27). En cuanto a las contribuciones, los aportes solidarios, según el artículo 2° de la Ley 632 de 2000, fueron del 50% para suscriptores residenciales de estrato 5, 60% para estrato 6, 50% para suscriptores comerciales y 30% para suscriptores industriales (ver Tabla 28).

Tabla 27

Subsidios

Estrato	Acueducto	Alcantarillado	Aseo
1	55%	55%	17%
2	21%	21%	10%
3	5%	5%	5%

Nota. Adoptado de (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

Tabla 28

Contribuciones

Estrato	Acueducto	Alcantarillado	Aseo
5	50%	50%	50%
6	60%	60%	60%
Comercial	50%	50%	80%
Industrial	70%	70%	80%
oficial	0%	0%	0%

Nota. Adoptado de (Aguas Mocoa S.A. E.S.P., 2023).

Una comparación entre el consumo en un hogar de Mocoa con dos personas (23 m³, Figura 10) supera considerablemente al de un hogar de Medellín con cuatro (9 m³, Figura 11), aunque el precio por metro cúbico de agua es más alto en Medellín. Esta diferencia en el consumo se debe a que en Mocoa se cobra una tarifa fija.

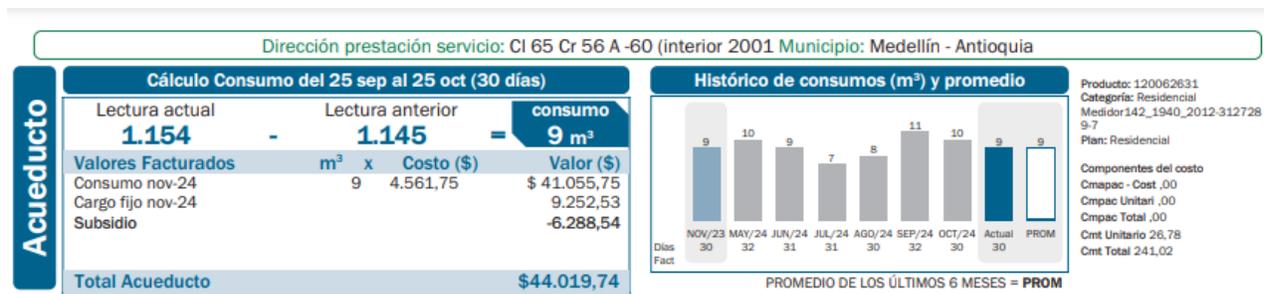
Figura 10
Factura de acueducto de Mocoa

MES FACTURADO		No. FACTURA DE VENTA		NUID	
SEPTIEMBRE 2.024		1514269		14473	
RUTA	USO	ESTRATO	PERIODO FACTURADO	FECHA DE EXPEDICIÓN	
69.300	RESIDENCIAL	2 - BAJO	01-sep-2024	30-sep-2024	

 FACTURA MENSUAL ACUEDUCTO Y/O ALCANTARILLADO					
NIT 900581943-7 Código Postal - 860001 PQR: 316 8234795. Secretaria: 317 6591730 Barrio Turístico la Loma - Mocoa - Putumayo aguasmocoa@aguasmocoa.gov.co					
<i>Juan Camilo Fajardo A.</i> JUAN CAMILO FAJARDO ARTEAGA GERENTE					
INFORMACIÓN DE MEDICIÓN					
MEDIDOR No.	DIÁMETRO MEDIDOR	CONSUMO PROMEDIO	LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
0	1 1/2 Pulgada	35	81	104	23
CONSUMO ÚLTIMOS 6 MESES			CAUSAL DE NO LECTURA		
(23)	23	(23)	23	(23)	23
NORMAL					
FINANCIACIÓN					
CONCEPTO	VALOR FINANCIADO	VALOR CUOTA	VALOR BALDO	CUOTAS PACTADAS	CUOTAS CANCELADAS
	M3	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	SUBSIDIO(-) APORTE(+)	VALOR A PAGAR
CARGO FIJO	16	1.281,00	6.368	(-)1.910	4.458
CONSUMO BASICO	7	1.281,00	20.496	(-)6.149	14.347
CONSUMO SUPERIOR A BASICO	16	2,08	33	(-)10	23
TASA USO BASICO	7	2,08	15		15
TASA USO COMPLEMENTARIA					
SUBTOTAL ACUEDUCTO					27.810

Nota. Fuente Propia

Figura 11
Factura de acueducto de Medellín



Nota. Fuente Propia

Al establecer tarifas fijas se desconoce el consumo real de cada usuario. Aunque 39% de los usuarios cuenta con micromedición, como el caso mostrado en la Figura 10, se continúa facturando según la tarifa plena vigente.

7.5 Cálculo del IRABAm

El IRABAm se calcula mediante la Ecuación 7 y 8.

Ecuación 7

IRABAm

$$IRABAm = \left(\frac{IRABApp}{tpp}\right)^{0.6} + (IRDm)^{0.4}$$

Fuente. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007).

Donde: índice de riesgo por abastecimiento de agua de la persona prestadora *IRABApp*, Total de personas prestadoras en el municipio *tpp* e índice de riesgo por distribución en el municipio *IRDm*.

Ecuación 8

IRABApp

$$IRABApp = 100 - (IT + IC)$$

Fuente. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007).

Donde: índice de tratamiento *IT* e índice por continuidad *IC*.

El IT de la PTAP La Mulata, que evalúa la calidad de sus procesos, ensayos de laboratorio y calificación del personal, alcanzó un valor de 50 sobre 80. Este resultado indica que, aunque se cumplen algunos requisitos básicos, existen áreas de mejora, especialmente en la certificación del personal operativo. Donde 25 puntos se obtuvieron por realizar los procesos requeridos según las características del agua cruda y su tratamiento es intermitente, mientras que los 15 puntos por tener una dotación básica de laboratorio certificados (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018) y 10 puntos por el porcentaje de operadores certificados se encuentra entre el 50 y el 90% (Rodríguez, 2024).

Según el Instituto Nacional de Salud (2024), la PTAP La Mulata alcanzó un Índice de Continuidad de 15 puntos, garantizando un suministro de agua potable entre 18.1 y 23 horas diarias.

Finalmente, la evaluación del IRABApp de la PTAP La Mulata arrojó un resultado de 35 puntos.

Además, el tpp de la PTAP La Mulata fue de una persona prestadora, en este caso, Aguas Mocoa.

Por otro lado, la PTAP La Mulata cubre el 75.8% de las viviendas y cuenta con 0.76 conexiones domiciliarias por vivienda (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). No se reportó suministro de agua en piletas o carrotanques (Instituto Nacional de Salud, 2024), y el factor de ajuste F se mantuvo constante en (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007) .Con estos datos, se obtuvo un IRDm de 24.20.

El IRABAm resultante para la PTAP La Mulata fue de 30.68%, correspondiente a un riesgo medio. De acuerdo con la 2115 de 2017, el alcalde debe proponer y ejecutar acciones correctivas a mediano y largo plazo para disminuir el índice de riesgo por distribución, mientras que Aguas Mocoa debe gestionar directamente la eliminación de deficiencias en el tratamiento y la continuidad del servicio (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2007).

8. Discusión

La evaluación del estado de operación y funcionamiento de la PTAP La Mulata revela desafíos que impactan la calidad y la continuidad del suministro de agua potable. Durante periodos de lluvia, se observa un incremento significativo en la turbidez del agua cruda, que excede considerablemente los parámetros de diseño de la planta. Con una capacidad de tratamiento entre 3000 y 4000 UNT, la planta presenta dificultades operativas cuando los niveles de turbidez alcanzan valores entre 10000 y 30000 UNT, lo que resulta en interrupciones frecuentes del servicio. Esta problemática se asocia a factores hidrometeorológicos, como el aumento del caudal y la velocidad de la corriente, que intensifican los procesos de erosión y el transporte de sedimentos.

Adicionalmente, se han identificado pérdidas significativas, estimadas en un 74%, lo que indica una inadecuada operación y distribución del recurso hídrico. Esta situación se agrava por el uso inadecuado del agua por parte de la población, que, a pesar del racionamiento, continúa realizando actividades de alto consumo, como el lavado de vehículos y patios. La falta de una cultura hídrica responsable representa un obstáculo adicional para la gestión sostenible del agua en la región.

Para abordar estas problemáticas, se proponen medidas correctivas y optimizaciones en los procesos de tratamiento. Entre ellas, se sugiere la construcción de una laguna de presedimentación y una bocatoma lateral para mejorar la captación y el tratamiento del agua. También se recomienda la reubicación del punto de dosificación del coagulante y la remoción de la tabla ubicada en el vertedero, revisar la capacitación del personal y la frecuencia en las pruebas de tratabilidad del agua. Asimismo, se debe verificar la dosis óptima de coagulante e implementar un coadyuvante para optimizar la floculación. Finalmente, se propone incrementar la capacidad del tanque de contacto para asegurar un tiempo de contacto adecuado para la cloración y una desinfección eficiente. La implementación de estas medidas podría contribuir a reducir la turbidez del agua cruda y a mejorar la eficiencia en el manejo del recurso hídrico, lo que garantizaría un suministro más continuo y de mejor calidad.

9. Conclusiones

La evaluación de la operación de la PTAP La Mulata revela limitaciones significativas, especialmente durante periodos de lluvia. La turbiedad del agua cruda excede la capacidad de tratamiento de la planta, lo que genera interrupciones en el suministro. Esto evidencia la necesidad de optimizar los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y desinfección para asegurar un tratamiento efectivo y un suministro continuo.

Se propuso medidas correctivas y alternativas de optimización, que incluyen la construcción de una laguna de presedimentación y la implementación de un sistema de cloración, junto con la reubicación del punto de dosificación del coagulante y la incorporación de un coadyuvante. Además, se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo más frecuente para evitar obstrucciones y garantizar el óptimo funcionamiento de la planta.

Se realizó un análisis de la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento, el río Mulato y la quebrada Chontayaco, mediante el IRCA y los mapas de riesgo donde se evidencia la afectación antrópica y natural en dichas fuentes.

La evaluación de la PTAP La Mulata, a través del análisis de las 6C (calidad, cantidad, continuidad, cobertura, costo y cultura hídrica), revela limitaciones en su operación. La alta turbiedad y contaminación de las fuentes afectan la calidad, cantidad y continuidad del suministro, generando una cobertura por sectorización. Los costos del servicio se determinan por una tarifa fija para un consumo promedio de 23 m³. La cultura hídrica de la comunidad se caracteriza por un uso inadecuado del recurso. Se recomienda implementar programas educativos para fomentar el consumo responsable y la conservación del agua, junto con intervenciones técnicas para optimizar el tratamiento y la distribución.

El IRABAm resultante fue de 30.68%, clasificándolo como riesgo medio, la Resolución 2115 de 2007 establece la responsabilidad del alcalde de proponer y ejecutar acciones correctivas a mediano y largo plazo para disminuir el índice de riesgo por distribución, mientras que Aguas Mocoa debe gestionar la eliminación de las deficiencias en el tratamiento y la continuidad del servicio.

Referencias

- Aguas Mocoa S.A E.S.P. (2021). *Programa de uso eficiente y ahorro del agua PUEAA*. Mocoa: Aguas Mocoa S.A E.S.P.
- Aguas Mocoa S.A E.S.P. (2022). *Mapa de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano*. <https://www.aguasmocoa.gov.co/>
- Aguas Mocoa S.A. E.S.P. (2020). *Histórico de reportes*. <https://www.aguasmocoa.gov.co/historico-de-reportes/>
- Aguas Mocoa S.A. E.S.P. (2023). *Informe de Gestión Vigencia 2023 Empresa de Servicios públicos Aguas Mocoa S.A. E.S.P.* Mocoa: Aguas Mocoa S.A. E.S.P.
- Aguas Mocoa S.A. E.S.P. (2024). *Planta de tratamiento de agua potable La Mulata municipio de Mocoa*. Mocoa: Aguas Mocoa S.A. E.S.P.
- Alcaldía de Mocoa. (2023). *Plan básico de ordenamiento territorial Evaluación de amenazas y riesgos*. Mocoa: Alcaldía de Mocoa.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá: Nomos S.A.
- Autoridad Nacional del Agua . (Diciembre de 2010). *Manual: Criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico*. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/manual-disenos-1_0_2.pdf
- Cárdenas, J., & Ruiz , S. (2020). *Diagnóstico hidráulico operativo de la planta de tratamiento de agua potable de municipio de Santuario Risaralda*. [Trabajo de grado]. Universidad Antonio Nariño: <https://repositorio.uan.edu.co/items/3cbbaf0a-4527-4802-9b69-d2972a085f4d/full>
- Castellanos, H., Collazos, C., Farfan, J., & Meléndez-Pertuz, F. (2017). Diseño y Construcción de un Canal Hidráulico de Pendiente Variable. *SciELO*, 28(6). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000600012>
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/OPS. (2005). *Guía de procedimientos para la operación y mantenimiento de desareadores y sedimentadores*. Lima: Organización Paramenica de la Salud.
- Chulluncuy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Portal de revistas Ulima*, 29(29), 153-170. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2011.n029.232>

-
- Conagua. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada*. <https://files.conagua.gob.mx>
- Corporación Autónoma Regional de Cudinarmarca CAR. (2021). *Boletín del índice de Calidad del Agua ICA - 2020*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/6091d145d1011.pdf>
- DANE. (2018). *Cobertura de agua potable*.
<https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/sociedad/cnpv-2018/>
- Díaz, A., García, D., Guerrero, D., Forero, A., Pinzón, J., Landázury, V., . . . García, M. (2014). *Estado del arte de las fuentes hídricas del Departamento del Putumayo en los planes del Desarrollo Nacional, Departamental y Municipales*. [Trabajo de grado]. Instituto Tecnológico del Putumayo: <https://itp.edu.co/ITP2022/wp-content/uploads/2018/08/Estado-del-arte-de-las-fuentes-hidricas-del-departamento-del-Putumayo-en-los-planes-de-desarrollo-Nacional-departamental-y-locales.pdf>
- Domínguez, M. (2010). *Optimización de la Coagulación-Floculación en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la Sede Recreacional Campoalegre-Cajasan*. [Trabajo de grado]. Universidad Pontificia Bolivariana:
https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/848/digital_19174.pdf?seque
- Estudios técnicos y construcciones LTDA. (2017). *Estudios para ajustes y actualización del plan maestro de acueducto del municipio de Mocoa, en el departamento del Putumayo*. Mocoa: Estudios técnicos y construcciones LTDA.
- Facultad de ingeniería - Universidad del Quindío. (2009). *Universidad del Quindío*.
<https://es.scribd.com/document/388002371/2-Sistemas-Aquietamiento-Medicion>
- Garavito, L. (1973). *Diseño de Plantas de Purificación de Aguas*. Bogotá.
- Instituto Nacional de Salud. (2024). *SIVICAP*.
<https://sivicap.ins.gov.co/SIVICAP/Account/Login?ReturnUrl=%2FSIVICAP%2F>
- Kawamura, S. (2000). *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities, 2nd Edition*. New York: John Wiley & Sons.
- Lozano-Rivas, W., & Lozano, G. (2015). *Potabilización del agua*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
- Meyers, R. (2001). *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. California: Elsevier Science Ltd. <https://doi.org/978-0-12-227410-7>

-
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS2000 Título B*. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-reglamento-tecnico-sector-reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (1998). *Decreto 475 de 1998*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1327>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (22 de Junio de 2007). *Resolución 2115 del 2007*. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2008). *Resolución 0811 de 2008*. <https://www.minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0811-2008>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2010). *Manuales de Buenas Prácticas de Ingeniería Título C*. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-reglamento-tecnico-sector-manuales>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (08 de Junio de 2017). *Resolución 0330 del 2017*. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (09 de Diciembre de 2021). *Resolución 0799 del 2021*. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0799-2021>
- Montgomery Watson Harza - MWH. (2005). *Water treatment: Principles and design. 2nd ed.* New Jersey: John Wiley & Sons.
- Montoya, C., Loaiza, D., Torres, P., Cruz, C., & Escobar, J. (2011). Efecto del incremento en la turbiedad del agua cuda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA*, 8(16), 137–148.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372011000200011#:~:text=La%20turbiedad%20de%20la%20fuente,desempe%C3%B1o%20de%20las%20unidades%20de
- Mora-Alvarado, D., Barboza-Topping, R., & Orozco-Gutiérrez, J. (2019). Índice de calidad y continuidad de los servicios de agua para consumo humano en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 32(10), 72-81. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i10.4882>
- Mott , R. (2006). *Applied Fluid Mechanics*. México: Prentice Hall.

Orellana, J. (2022). *Tratamiento de aguas*.

https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (2024). *Estructuras de Conducción del Agua*.

https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6708s/x6708s08.htm

Quenoran, J. (2017). *Diagnóstico ambiental de vertimientos en la zona de influencia de la captación del subsistema de abastecimiento el Líbano del río Mulato en el municipio de Mocoa*. [Trabajo de grado]. Instituto Tecnológico del Putumayo:

<https://repositorio.itp.edu.co/items/23676bca-cd47-49dd-ba46-a1c42b2f98dc>

Rodríguez, J. (01 de Junio de 2024). ¿Qué pasa con el Agua? Empresa Aguas Mocoa responde a los ciudadanos ante dificultades de la presentación del servicio en la ciudad. (D. García, Entrevistador)

Rodríguez, J. (5 de 12 de 2024). Ingeniera Química. (E. Moreno, Entrevistador)

Romero, J. (2000). *Purificación del agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2018). *Evaluación Integral de prestadores Aguas Mocoa S.A. E.S.P.* Bogotá: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

Trujillo, D., Duque, F., Arcila, S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista ION*, 27(1).

Vargas, L. (2004). Capítulo 6 Floculación. En *Manual I: Teoría Tomo 1* (págs. 264–306). Lima: Centro de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/OPS. https://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_cap6.pdf

Vargas, L. (2004). Procesos Unitarios y Plantas de tratamiento. In *Manual I: Teoría Tomo 1* (pp. 104-150). Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/OPS.

Zapata-Rivera, A. M., & Gonzalías-Manjarrés, A. (2020). Caracterización cinética e hidrodinámica del fluido en un floculador hidráulico tipo Alabama localizado en la Ptap “El Arroyo” en Santander de Quilichao, Cauca. *Latin American Developments in Energy Engineering*, 1(1), 43–54. <https://doi.org/10.17981/ladee.01.01.2020.4>

Anexos

Anexos 1 – Formato del video: Cuidemos El Agua Un Reto de Todos

Segmento 1: La Importancia del Agua Potable y Procesos de Tratamiento

Gota de agua: Samuelito, Samuelito.

Samuelito: ¿Quién es? ¿Quién me habla?

Gota de agua: Hola Samuelito, soy tu amiga la Gota de agua. ¿Te encuentras bien?

Samuelito: No, desde hace dos días estoy con el estómago flojo, y todo lo que como me hace mal.

Gota de agua: ¿El agua que tomas es potable?

Samuelito: ¿Cómo potable?

Gota de agua: Es agua limpia, no tiene color, olor ni sabor. Lo más importante es que no contiene gérmenes ni sustancias dañinas que nos enferman. Tomar agua limpia nos protege de enfermedades como la diarrea, la amebiasis, el cólera, la disentería, entre otras.

Sin embargo, no todos los rincones del mundo disponen de este recurso básico. Hay millones de personas que tienen problemas para tener acceso directo al agua.

Samuelito: Gracias, he aprendido algo nuevo.

Gota de agua: ¿Te has dado cuenta de que, en muchos pueblos alejados, como el tuyo, los niños se enferman seguido? Pues una de las razones más importantes es que no tienen agua potable para beber.

Samuelito: ¿Qué se puede hacer para solucionar este problema? ¡Yo quiero estar bien para jugar y estudiar!

Gota de agua: ¡Prepárate para una gran aventura! Exploraremos el mundo del agua potable con la ayuda del ingeniero sanitario Andrés.

Ingeniero: Hola Samuelito, te explicaré cuáles son los pasos para que el agua potable llegue a tu casa.

Samuelito: Genial

Ingeniero: Todo comienza conociendo de dónde viene el agua. El agua puede obtenerse de lugares que vemos, como los lagos, ríos, lagunas y embalses. A estos lugares les llamamos fuentes superficiales. Pero también hay agua que no vemos, ¡está bajo tierra! Es el agua subterránea. Para obtenerla, construimos pozos que la traen a la superficie.

Samuelito: ¿Y está limpia para beber?

Ingeniero: No Samuelito, aunque el agua tenga una apariencia limpia, podría contener desechos de origen animal y humano, representando un riesgo para la salud de todos nosotros.

Samuelito: ¿Cómo se obtiene agua potable?

Ingeniero: El agua se toma de la fuente a través de una bocatoma, que es un sistema donde se recolecta el agua, y esta viaja por tuberías que los ingenieros le han puesto el nombre de aducción para luego llegar hasta al desarenador. En este lugar, se separan las partículas sólidas como la arena, que se quedan en el fondo debido a la gravedad.

Samuelito: ¿Eso es todo?

Ingeniero: El viaje del agua no termina aquí. El agua sigue su viaje a la planta de tratamiento, donde existe algo que se llama cámara de quietamiento para tranquilizarse. Después, pasa por un proceso que se llama coagulación y floculación, donde las partículas pequeñas o disueltas se unen para formar otras más grandes que van al fondo. Luego, en la sedimentación y filtración, el agua se pone más clara y elimina cualquier sólido que haya quedado. Por último, se añade cloro para desinfectarla y asegurarnos de que no quedan gérmenes. ¡Y así obtenemos agua potable!

Samuelito: Ahora quiero ver cómo llega el agua potable a mi casa.

Ingeniero: El agua potable se almacena en grandes tanques y luego viaja por tuberías hasta tu casa y tus vecinos, lista para ser usada en la preparación de alimentos, tu higiene personal, la limpieza de tu hogar, el lavado de tu ropa y un rico y refrescante vaso de agua fría para calmar tu sed.

Segmento 2: Héroe del Agua: Consumo Responsable

Ingeniero: A continuación, les recomiendo 6 acciones sencillas para cuidar el agua en sus casas:

-
- Recolecta agua con un vaso y evita abrir todo el grifo.
 - Limita el tiempo al bañarte, así usarás menos agua.
 - Antes de bañarte, usa una cubeta o un valde para recolectar el agua mientras se calienta.
 - Recolecta el agua lluvia para regar plantas o limpiar pisos.
 - Reparar fugas en grifos y tuberías para evitar desperdicio.
 - Reutilizar el agua de la lavadora para descargar inodoros.

Ingeniero: Cada gota cuenta, cada acción suma. No subestimes el poder que tienes para marcar la diferencia. Al adoptar hábitos responsables con el agua, te conviertes en un guardián de este preciado recurso, inspirando a otros a seguir tu ejemplo. Juntos, podemos transformar el mundo.

Samuelito: ¡Convértete en un Héroe del Agua!

Segmento 3 – Link del video

En el siguiente enlace se puede acceder a la ayuda audiovisual:
<https://www.youtube.com/watch?v=xlQXomYNJLI>

Anexos 2 – Póster