

Evaluación De La Eficacia De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales Del
Corregimiento De La Mata, Cesar

DAINER AFANADOR MEJÍA

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR - SECCIONAL AGUACHICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
AGUACHICA, CESAR
2026

Evaluación De La Eficacia De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales Del
Corregimiento De La Mata, Cesar

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL
Y SANITARIO

DAINER AFANADOR MEJÍA

DIRECTOR

PhD. LUIS HERNANDO MONTOYA ARMENTA

CO DIRECTORA

MSc. YENY PAOLA CASALLAS ZAPATA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
SANEAMIENTO BÁSICO

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR - SECCIONAL AGUACHICA
FACULTAD INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
AGUACHICA, CESAR

2026

NOTA DE APROBACIÓN

El trabajo de grado de Dainer Afanador Mejía, titulado “Evaluación de la eficacia de la planta de tratamiento de aguas residuales del corregimiento de La Mata, Cesar”, ha sido aprobado por los jurados, quien no se hace responsable de su contenido, pero lo ha encontrado correcto en su calidad y en su forma de presentación por lo que en fe de lo cual firman.

JOSE JAVIER CABRERA CABRERA
EVALUADOR 1

KAREN CRISTINA CORONEL ROBLES
EVALUADOR 2

LUIS HERNANDO MONTOYA ARMENTA
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

YENY PAOLA CASALLAS ZAPATA
CODIRECTORA DEL TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de prácticas académicas primeramente a Dios quien me ha dado la oportunidad y los conocimientos para realizarlo, quien me ha permitido alcanzar esas metas que me he propuesto.

A mis padres que me han acompañado en este proceso, brindándome su apoyo incondicional en cada momento.

A todos aquellos familiares y allegados que me acompañaron y brindaron apoyo para poder finalizar este proyecto de vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por darme la oportunidad de avanzar y de esta manera lograr este objetivo que es muy importante para mi vida profesional.

A mis familiares y allegados por su apoyo incondicional, a mi director de proyecto Luis Hernando Montoya Armenta y a mi codirectora Yeny Paola Casallas Zapata, quienes me acompañaron y estuvieron instruyéndome en todo momento.

A la Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica por darme la oportunidad de adquirir el conocimiento sobre la carrera de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, a todos mis docentes quienes siempre brindaron su máxima disposición para enseñar.

A la empresa Ausualmata y a todo su personal, la cual me abrió las puertas para poder ejecutar mi proyecto de grado.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE ANEXOS.....	X
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. OBJETIVOS	18
4.1. OBJETIVO GENERAL	18
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
5. MARCO TEÓRICO	19
5.1. AGUAS RESIDUALES.....	19
5.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.....	19
5.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	21
6. MARCO LEGAL.....	23
7. ESTADO DEL ARTE	24
8. METODOLOGÍA.....	26
8.1. ÁREA DE ESTUDIO	26
8.2. DISEÑO DEL EXPERIMENTO	27
8.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS	31
9. RESULTADOS	33
9.1. IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE CADA UNIDAD DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.....	33
9.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS	35
9.3. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DE LAS UNIDADES DE TRATAMIENTO.....	48

10.	DISCUSIONES	52
11.	CONCLUSIONES	58
12.	RECOMENDACIONES.....	61
13.	BIBLIOGRAFÍA	62
14.	ANEXOS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la PTAR de La Mata, Cesar.	26
Figura 2. Manhole que vierte el agua residual de la PTAR al caño Las Pitas.....	33
Figura 3. PTAR La Mata.	34
Figura 4. Temperatura del agua.	36
Figura 5. pH del agua.....	36
Figura 6. Conductividad del agua.	37
Figura 7. Sólidos disueltos totales del agua.....	38
Figura 8. Oxígeno disuelto del agua.	38
Figura 9. Color del agua.	39
Figura 10. Turbiedad del agua.	40
Figura 11. Sólidos suspendidos totales del agua.	41
Figura 12. Alcalinidad del agua.....	41
Figura 13. Dureza del agua.	42
Figura 14. Demanda química de oxígeno del agua.....	43
Figura 15. Coliformes totales del agua.	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad colombiana referente a aguas residuales domésticas.....	23
Tabla 2. Métodos analíticos para los parámetros físicos y químicos.....	30
Tabla 3. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos obtenidos en la PTAR y en el caño Las Pitás.	35
Tabla 4. Índice de Calidad del Agua (ICA).	45
Tabla 5. Índice de contaminación por mineralización (ICOMI).....	46
Tabla 6. Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO).	47
Tabla 7. Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) e índice de contaminación por pH (ICOPH).	48
Tabla 8. Parámetros de diseño del filtro percolador de la PTAR La Mata.	49
Tabla 9. Parámetros físicos y químicos y sus valores límites máximos permisibles.....	52
Tabla 10. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos y sus valores límites máximo.	54
Tabla 11. Rangos de eficacia en los procesos de tratamiento.	56

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Registro fotográfico	70
--	----

GLOSARIO

Agua residual doméstica: El agua residual doméstica es aquella generada en las zonas residenciales, comerciales e institucionales.

Alcalinidad: La alcalinidad es la capacidad del agua de neutralizar ácidos, es un indicador de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (IDEAM, 2020).

Caño: Un caño es una microcuenca hidrográfica que desemboca en otro río principal.

Coliformes totales: Los coliformes totales son un grupo de bacterias que se encuentran presentes en el suelo, en el agua que ha sido contaminada y en desechos humanos (IDEAM, 2020).

Color: El color en cuerpos de agua es el reflejo de la presencia de sustancias suspendidas y disueltas.

Conductividad eléctrica (CE): La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene el agua para conducir corriente eléctrica influenciada por la presencia de iones disueltos.

Demanda química de oxígeno (DQO): La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica soluble y particulada del agua.

Dureza: La dureza es la concentración de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, expresada en carbonato de calcio en miligramos por litro (IDEAM, 2020).

Índice de calidad del agua (ICA): El índice de calidad del agua es un valor numérico con escala de 0-1 que clasifica el agua en un rango de muy mala a buena (Ramírez, et ál., 1997).

Índice de contaminación (ICO): Los índices de contaminación son valores numéricos que determinan la contaminación del agua mediante un parámetro: índice de contaminación por mineralización (ICOMI), índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS), índice de contaminación trófico (ICOTRO) e índice de contaminación por pH (ICOpH) (Ramírez, et ál., 1999).

Oxígeno disuelto (OD): El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno presente en el agua en forma gaseosa (DANE, s.f.).

Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR): Las plantas de tratamiento de aguas residuales son instalaciones muy importantes para la salud pública de la humanidad, porque permiten la eliminación y neutralización de contaminantes generados por el hombre.

Potencial de hidrogeno (pH): El potencial de hidrogeno es el indicador de acidez o alcalinidad del agua (DANE, s.f.).

Sólidos disueltos totales (SDT): Los sólidos disueltos totales son indicadores de calidad de agua comprendidos por sales, metales y sustancias orgánicas solubles.

Sólidos suspendidos totales (SST): Los sólidos suspendidos totales son partículas sólidas no sedimentables presentes en el agua que pueden causar turbidez según su cantidad y tamaño.

Temperatura: La temperatura es el grado de calor presente en el agua.

Turbiedad: La turbiedad es la medida de claridad del agua relacionada con la materia en suspensión que absorbe o dispersa la luz descendente.

RESUMEN

La presente investigación evaluó la eficacia de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del corregimiento de La Mata Cesar), y su incidencia sobre la calidad del agua del caño Las Pitas. Para ello, se determinaron los parámetros físicos, químicos y microbiológicos en el afluente, efluente y en dos puntos del caño: antes y después del vertimiento. Se aplicó el índice de calidad del agua (ICA) y cuatro índices de contaminación (ICOs). Los resultados mostraron que, aunque la PTAR no se encuentra en funcionamiento, logró reducir en un 99,29% los SST y en un 14,29% la DQO; también alcanzó mantener el pH y la conductividad dentro de lo permitido por la normativa. Presentó baja eficacia en la remoción de carga orgánica y microbiológica, evidenciada en los valores elevados de DQO y coliformes totales, así como en la deficiencia de oxígeno disuelto. Mediante el ICA se describió que el caño Las Pitas se encuentra en condiciones regulares alejadas de su estado natural, mientras que los ICOs reflejaron baja contaminación por sólidos y materia orgánica, pero un estado muy malo en términos de mineralización. Estos hallazgos evidencian que la PTAR necesita reanudar operaciones para garantizar un tratamiento suficiente que permita proteger la microcuenca del caño Las Pitas, lo que resalta la necesidad de fortalecer las estrategias de monitoreo y gestión ambiental en la zona.

Palabras clave: aguas residuales, calidad del agua, eficacia, efluente, remoción.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales domésticas son aquellas aguas provenientes de las actividades humanas dentro de las viviendas (Widyarani, et ál., 2022), por lo que suelen estar contaminadas por materia orgánica, grasas, aceites, residuos sólidos y, en algunos casos, productos químicos. Su manejo y tratamiento adecuado son esenciales para prevenir impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente; se realiza en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), donde se emplean procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar o reducir la contaminación antes que el agua sea devuelta al medio ambiente o sea reutilizada.

La PTAR del corregimiento La Mata, municipio de La Gloria, departamento del Cesar, Colombia, consta de un sistema de tratamiento convencional. Las PTAR con este tipo de tratamiento suelen presentar errores de diseño y fallas operativas (Londoño-Vélez, 2023), lo que las convierte en ineficientes y hacen que el efluente pueda contaminar el cuerpo receptor, en este caso el caño Las Pitás.

La gestión eficiente de las aguas residuales domésticas es clave para garantizar el acceso al agua limpia, promover la salud pública y contribuir al desarrollo sostenible, minimizando los riesgos de enfermedades y protegiendo los recursos hídricos. Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue evaluar la eficacia de la PTAR del corregimiento de La Mata, Cesar, y su incidencia sobre el caño Las Pitás.

Se evaluó la eficacia de la PTAR de La Mata iniciando con identificar el estado actual de cada unidad de tratamiento y analizar parámetros físicos, químicos y microbiológicos, para obtener un panorama diagnóstico del sistema de tratamiento. Luego, en aras de verificar el cumplimiento legal, se determinó el grado de remoción de DQO y SST, y se aplicó el índice de calidad del agua (ICA) y cuatro índices de contaminación (ICOs), con base en los cuales se propuso la optimización de las unidades de tratamiento.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el mundo se generan aproximadamente 380 mil millones de m³ de aguas residuales municipales, donde el 48% de éstas se liberan al medio ambiente sin un tratamiento previo (Tariq & Mushtaq, 2023). En este escenario, Colombia se ubica dentro de los 20 países principales que aportan alrededor del 83% del total de aguas residuales tratadas en el mundo (Macedo, et ál., 2022).

De acuerdo con la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios, 2023a), para la vigencia del año 2022 se trató el 44% de las aguas residuales y para el año 2021 se trató un 53,12% (Superservicios, 2022), lo que denota una diferencia negativa que se interpreta como disminución en la eficacia del tratamiento.

El 75,15% de los municipios de Colombia presentan la cobertura rural del servicio de alcantarillado menor o igual al 30%. Para el caso del municipio de La Gloria, Cesar, con jurisdicción en el centro poblado La Mata, se sitúa en un rango del 0% - 15% de cobertura de alcantarillado a nivel rural (Superservicios, 2023b).

El corregimiento de La Mata cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) operada por la Asociación de Usuarios del Servicio de Acueducto y Alcantarillado del Corregimiento de La Mata (AUSUALMATA), constituida el 14 de junio de 2012. Ausualmata dispone su efluente sobre el caño Las Pitas, fuente abastecedora de agua para comunidades humanas circundantes a la microcuenca para el desarrollo de sus actividades agropecuarias.

Se desconoce la eficacia de tratamiento de la PTAR del centro poblado, ya sea por la ausencia de cargue de información o por posibles anomalías en el funcionamiento de las unidades que conforman el sistema de tratamiento. La descarga del efluente sobre el caño Las Pitas, puede perjudicar su calidad por el incremento de concentración de contaminantes como desechos fecales, fertilizantes, plásticos y bacterias, lo que limita su

uso para actividades esenciales del corregimiento La Mata como la agricultura, y convierte al caño en una fuente insalubre de agua para las familias que se proveen de la microcuenca.

Por lo anterior, una reducción de la eficacia de la PTAR que redunde en el vertimiento del agua residual indebidamente tratada y problemas en su operación infiere posibles daños en la infraestructura del sistema y podría ocasionar efectos negativos sobre el componente biótico del centro poblado, relacionado con la fragmentación de los servicios ecosistémicos del caño Las Pitas, así como contribuir al bajo bienestar y salubridad de los habitantes de La Mata.

Pregunta de Investigación

¿Cuál es la eficacia de la planta de tratamiento de aguas residuales de La Mata, Cesar, mediante cada parámetro físico y químico determinado respecto a los límites máximos permisibles de aguas residuales?

Hipótesis

Hipótesis positiva

La eficacia de remoción de la planta de tratamiento de aguas residuales de La Mata, Cesar, es mayor al 50% en cada parámetro.

Hipótesis negativa

La eficacia de remoción de la planta de tratamiento de aguas residuales de La Mata, Cesar, es menor al 50% en cada parámetro.

3. JUSTIFICACIÓN

La PTAR de La Mata consiste en un sistema tradicional de tratamiento físico, químico y biológico con continuas fallas operativas. Se conoce que las PTAR con tratamientos convencionales sólo remueven sólidos gruesos y parte de materia orgánica suspendida decantable pero no hay eliminación de contaminantes específicos, por lo que el uso del agua residual después del tratamiento es limitado y representa efectos adversos sobre la fuente receptora y la zona circundante.

La investigación se realizará porque no hay información sobre la eficacia de la PTAR de La Mata y sus implicaciones sobre el caño Las Pitas. Esto servirá de línea base para establecer medidas de manejo ambiental y colocar en marcha acciones de mejora para la operación de la PTAR. Además, en el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (DNP, 2023), se sumarán aportes científicos que validen y contribuyan a la solución de posibles problemas referentes a la gobernanza del agua como derecho fundamental.

Según la Resolución 0330 de 2017, la eficacia de remoción de parámetros físicos y químicos está condicionada por las unidades de tratamiento empleadas (MinVivienda, 2017). Al conocer el estado en que se encuentra hoy día la PTAR en término de eficacia y operación, se podrá identificar si sus parámetros iniciales de diseño son idóneos para el manejo del caudal actual. En este orden de ideas, se podrá contrarrestar el desconocimiento técnico y la pérdida de información de los operadores durante los cambios de administración.

Asimismo, se podrán realizar evaluaciones adecuadas durante situaciones de contingencia como posibles inundaciones por desbordamiento del caño Las Pitas y se contribuirá a mitigar la contaminación del agua del cuerpo receptor asegurando que el vertimiento generado por la PTAR posea las condiciones físicas, químicas y biológicas necesarias para ser depurado naturalmente por el caño para que las comunidades humanas adyacentes a la microcuenca puedan abastecerse de agua más segura.

4. OBJETIVOS

9.2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficacia de la planta de tratamiento de aguas residuales del corregimiento de La Mata, Cesar y su incidencia sobre el caño Las Pitás.

9.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el estado de cada unidad de la planta de tratamiento, su capacidad para el manejo del caudal, la carga contaminante y posibles limitaciones operativas.
- Determinar los parámetros físicos (temperatura, conductividad, turbiedad, color, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales), químicos (pH, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, alcalinidad, dureza) y microbiológicos (coliformes totales) del afluente y efluente de la PTAR del corregimiento de La Mata, Cesar.
- Proponer la optimización de las unidades de tratamiento, enfocándose en el mejoramiento de la eficacia operacional de la planta.

5. MARCO TEÓRICO

9.4. AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales en primera instancia fueron aguas de abastecimiento utilizadas en diferentes actividades humanas. Después de su uso pasan a ser aguas residuales y con impurezas que exceden los límites permitidos por las autoridades ambientales para su disposición final. Según la procedencia del agua residual, estas pueden ser domésticas o industriales.

5.1.1. Agua residual doméstica

El agua residual doméstica es aquella generada en las zonas residenciales, comerciales e institucionales y se recoge a través del sistema de alcantarillado. En general, las aguas residuales domésticas contienen sólidos orgánicos e inorgánicos y microorganismos, principalmente bacterias.

5.1.2. Agua residual industrial

Normalmente, las aguas residuales industriales son generadas por las industrias. Estas varían en calidad y cantidad de una industria a otra y de un proceso a otro, por lo que las aguas residuales industriales requieren un tratamiento especial dependiendo su origen y grado de contaminación.

9.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Las características de las aguas residuales están condicionadas por el estilo de vida, los comportamientos sociales y culturales, el suministro de agua y el consumo de las personas. Las aguas residuales domésticas comprenden componentes físicos, químicos y biológicos. Para esta investigación se tendrá en cuenta características físicas, químicas y

microbiológicas, como sólidos suspendidos totales, color, demanda química de oxígeno y coliformes totales, por mencionar algunas.

Las aguas residuales domésticas en su mayoría están compuestas en un 99,9% agua y contienen solo 0,1% sólidos. Dado que las aguas residuales domésticas provienen del uso de inodoros, duchas, fregaderos, lavadoras y otros dispositivos domésticos, estas aguas contienen una variedad de componentes agrupados en materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes, microorganismos patógenos, entre otros (Cao, et ál., 2022).

5.2.1. Características físicas

Las características físicas más representativas que se poseen las aguas residuales son el color, turbidez, temperatura, olor, contenido de sólidos y pH. El color es particular de aguas residuales domésticas e industriales y proviene de la degradación natural de la materia orgánica o de algún metal en concreto, dando paso al olor generado por los gases durante el proceso de descomposición. La temperatura del agua es un factor importante, porque incide sobre el desarrollo de la vida acuática. Los sólidos son esas partículas visibles y coloidales que se encuentra en las masas de aguas residuales conformada por la materia orgánica y se clasifican en: totales, filtrables y no filtrables, disueltos, en suspensión, fijos y volátiles (Santiago-Pérez, 2020).

5.2.2. Características químicas

Las características químicas del agua residual permiten comprender su composición y los efectos que pueden tener sobre la salud pública y el medio ambiente. Las aguas residuales contienen sustancias orgánicas representadas por la demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO) y carbono orgánico total (COT). Además, están comprendidas por materia orgánica como son las proteínas, hidrocarburos, grasas, tensoactivos, fenoles y pesticidas y por materia inorgánica referente al pH, cloruros, alcalinidad, nitrógeno, fósforo, azufre, compuestos tóxicos y metales pesados.

9.6. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales es un proceso que busca remover los contaminantes de las aguas residuales mediante una serie de etapas físicas, químicas y biológicas que se llevan a cabo en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

5.3.1. Tratamiento preliminar

En esta etapa se utilizan cribas gruesas para retener los residuos más grandes suspendidos en las aguas residuales. Si este proceso no se realiza antes de cualquier otro tratamiento, es difícil deshacerse de estos residuos gruesos en etapas posteriores. (Koul, et ál., 2022a).

5.3.2. Tratamiento primario

Este tratamiento tiene como objetivo eliminar sólidos grandes y sedimentables, así como grasas y aceites presentes en el agua residual. Este tratamiento no elimina contaminantes disueltos o biológicos, pero reduce significativamente la carga de contaminantes para las etapas posteriores del tratamiento (Koul, et ál., 2022b).

5.3.3. Tratamiento secundario

Durante este proceso, algunos de los residuos coloidales y biodegradables se eliminan en un tanque de aireación. Los microorganismos los degradan en un producto final inorgánico. Mecánicamente, es posible tratar el agua contaminada mediante filtros percoladores, lodos activados y un contactor biológico rotatorio (Koul, et ál., 2022c).

5.3.4. Tratamiento terciario

Esta etapa implica un proceso de purificación más amplia, por lo que reduce la materia orgánica, los nutrientes, la turbidez, las bacterias, entre otras sustancias contaminantes. El

objetivo de este tipo de tratamiento es la reutilización de las aguas tratadas (Koul, et ál., 2022d). La cloración, la irradiación UV, la ozonización y el método foto-fenton, son de las tecnologías más utilizadas, siendo el foto-fenton el más eficiente técnicamente (Zagklis & Bampos, 2022).

6. MARCO LEGAL

A continuación, se establece la normatividad colombiana referente a las aguas residuales domésticas y las empresas que desarrollan actividades de servicios.

Tabla 1. Normatividad colombiana referente a aguas residuales domésticas.

Norma	Descripción
Constitución Política de Colombia de 1991	Establece la obligatoriedad del Estado de garantizar a la población un ambiente sano, así como velar por la protección de los recursos naturales del país y velar por la conservación de los mismos.
Leyes	
Ley 9 de 1979	Código Sanitario Nacional de Colombia, establece medidas sanitarias para la protección del medio ambiente y la salud humana.
Ley 79 de 1986	Por la cual se provee la conservación del agua.
Ley 1333 de 2009	Establece el procedimiento sancionatorio ambiental por infracciones ambientales; esta ley impone multas, suspensión de actividades y el decomiso de equipos.
Decretos	
Decreto 4728 de 2010	Modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010 el cual trata de usos del agua y residuos líquidos, entre ellos el doméstico.
Decreto 1077 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio.
Decreto 1076 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.
Resoluciones	
Resolución 0631 de 2015	Determina los parámetros y valores máximos permisibles de aguas residuales domésticas a cuerpos de aguas superficiales.
Resolución 0330 de 2017	Establecer los requisitos técnicos que deben cumplirse en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con el servicio público domiciliario de alcantarillado.
Resolución 1256 de 2021	Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones. Establece criterios de calidad referente a parámetros físicos, químicos y microbiológicos para la reutilización y reúso de aguas residuales según el fin que se le vaya a brindar.

Fuente: Autor, 2025.

7. ESTADO DEL ARTE

Pacori-Pacori (2024), evaluó la eficiencia de la PTAR en Lampa, Perú, mediante el porcentaje de remoción de cada parámetro: sólidos suspendidos totales, pH, temperatura, DQO, DBO₅ y aceites y grasas. También realizó una evaluación de eficiencia en cada unidad de tratamiento y calculó un balance de masas, donde determinó un 75,18% de eficiencia de la PTAR a través del afluente y del efluente.

Marimon-Angulo y Rodríguez-Díaz (2024), determinaron la influencia de las PTAR de Valledupar y La Paz en la incorporación de contaminantes emergentes en el río Cesar. Tomaron muestras antes, durante y después de los vertimientos de aguas residuales de las PTAR. Hallaron la presencia de Gemfibrozilo y Progesterona, siendo el Gemfibrozilo el de mayor concentración con 2,87 ng L⁻¹ en la PTAR de La Paz. Atribuyen la presencia de estos contaminantes emergentes a la incapacidad operacional de eliminar este tipo de sustancias.

Puerto-Bohórquez (2023), implementó las prácticas de seguimiento de control del recurso hídrico mediante las herramientas SIG. Tomó dos muestras puntuales, una, 100 metros aguas arriba y otra, 100 metros aguas abajo del vertimiento de la PTAR de Yopal, Casanare. Utilizando las prácticas SIG realizó monitoreo de la DQO, oxígeno disuelto, pH, temperatura y sólidos suspendidos totales, de los cuales la DQO y los SST registraron valores por encima de los máximos permisibles en la Resolución 0631 de 2015, los demás parámetros se encontraron en el rango debido a la dilución de los cuerpos receptores.

Daza-Castro, Nier-Contreras y Pérez-Royero (2022), diseñaron un sistema de depuración con algas verdes como alternativa de tratamiento de aguas residuales en el río Chiriamo de Valledupar, Colombia. Para determinar su eficacia y capacidad de remoción, midieron la DQO, DBO₅, SST, coliformes, pH nitratos y fosfatos en el afluente y el efluente del sistema de depuración. Los parámetros del afluente registraron valores por encima de lo permitido en la Resolución 0631 de 2015, pero después del tratamiento con algas a una

altura laminar de 0,12 m, se obtuvieron valores promedio de remoción de DQO de 82,46%, DBO del 86,18%, coliformes de 99,87%, nitratos 55,36%, fosfatos 89,13% y SST de 98,77%.

La investigación de Aucatinco-Hirpahuanca (2021), consistió en determinar la eficiencia de la PTAR de Cusipatá, Cusco, cuyo porcentaje de eficiencia no superó el 35,9% y los parámetros analizados aceites y grasas, sólidos suspendidos totales, DQO y DBO₅ superaron los valores máximos permitidos en la legislación ambiental peruana.

Mamani-Supo y Ccorimanya-Mayta (2021), evaluó la eficiencia de la PTAR Huaytire II mediante System O en un centro poblado. Tomó una muestra antes y después del vertimiento de la PTAR para hacer la caracterización del agua. Los parámetros físicos y químicos del efluente y afluentes cumplen con los valores máximos permisibles del Decreto Supremo N° 003 de 2010 del Ministerio del Ambiente.

Bermúdez-Grisales y Carrillo-Loaiza (2019), realizaron una evaluación y diagnóstico de la PTAR del municipio de Guasca, Cundinamarca, mediante un enfoque mixto, puesto que hicieron visitas en campo y calcularon los índices requeridos para determinar el estado situacional de la PTAR. Concluyeron que la PTAR se encuentra totalmente construida y en funcionamiento, no presentó ningún tipo de inconvenientes durante su proceso.

En el estudio de Campo-Jiménez y Cabas-Basa (2017), se evaluó la remoción de olores generados en la PTAR El Salguero de la ciudad de Valledupar por medio de filtro de carbón activado. Se realizó un muestreo compuesto en el efluente de las aguas tratadas en las lagunas y se midió la temperatura, el pH, el olor y la concentración de H₂S. Inicialmente el H₂S registró una concentración de 2.010,8 mg L⁻¹ y los olores eran fuertes. Al aplicar 140 g de carbón activado en muestra, lograron un 37,6% de remoción de H₂S y los olores no se percibían.

8. METODOLOGÍA

9.7. ÁREA DE ESTUDIO

La PTAR objeto de estudio se encuentra en el corregimiento La Mata, ubicado en el municipio de La Gloria, departamento del Cesar; localizado a $8^{\circ}36'43''$ N y $73^{\circ}38'08''$ W. Este corregimiento tiene una población aproximada de 1800 habitantes que viven en unas 420 casas con un promedio de 7 personas por vivienda (IDB, 2022).

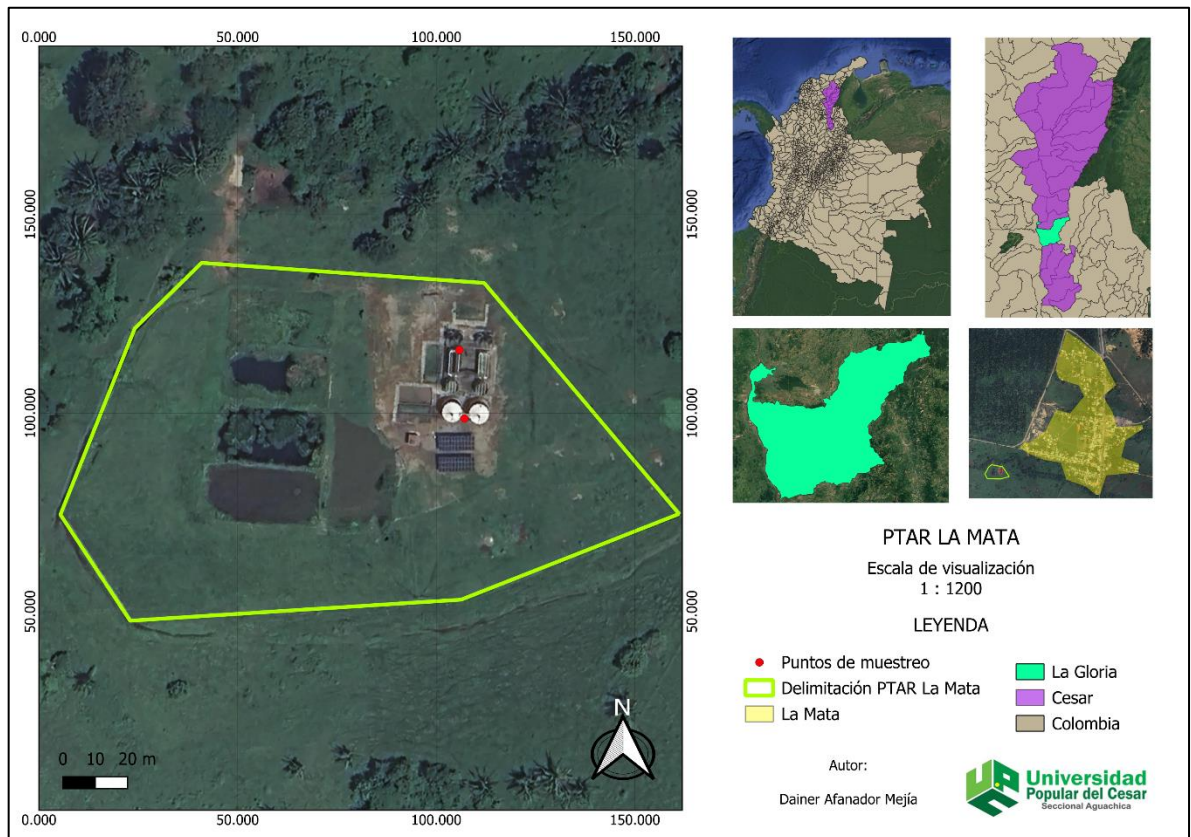


Figura 1. Ubicación de la PTAR de La Mata, Cesar.

Fuente: Autor, 2025.

La planta de tratamiento de aguas residuales objeto de estudio, localizada en el corregimiento de La Mata, cuenta con unidades de tratamiento físico, químico y biológico.

La fuente receptora de la PTAR es la microcuenca denominada caño Las Pitas, tributario de la subcuenca quebrada Simaña, el cual cumple funciones ecológicas importantes como drenaje natural, regulación hídrica, soporte de actividades agropecuarias y abastecimiento local de agua. El entorno rural dominado por estas actividades genera compactación del suelo, disposición inadecuada de recursos sólidos, degradación de la ronda hídrica, etc.

De acuerdo con la Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar, 2019), la subcuenca quebrada Simaña es área susceptible de inundaciones, aunque la precipitación total anual en La Mata se incrementa hasta valores cercanos a 2.000 mm y su temperatura supera los 28°C, datos considerados normales por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2024).

9.8. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

8.2.1. Tipo de estudio

La investigación es de enfoque cuantitativo, debido a que el proceso es secuencial y probatorio, la recolección de datos se hará conforme a los procedimientos estandarizados y aceptados por una comunidad científica y se empleará el uso de números para medir y estimar variables del problema a abordar. Además, se corresponde con un tipo exploratorio-descriptivo, dado que está orientado a comprender y caracterizar el problema en profundidad y se describirán los resultados obtenidos de manera estructurada.

8.2.2. Población

La población objetivo es el agua residual doméstica generada en el corregimiento de La Mata y recolectada por su red sanitaria.

8.2.3 Muestra

La muestra compuesta para cada recolección contará con un volumen de 10 litros. Se excederá el volumen de muestra requerida en un 20% con el fin de suplir posibles pérdidas o derrames de manipulación (IDEAM, 2002a).

8.2.4 Metodología para la recolección de muestras e información

8.2.4.1 Identificación del estado de cada unidad de la planta de tratamiento

Se identificó su capacidad para el manejo del caudal, la carga contaminante y posibles limitaciones operativas mediante las siguientes subfases (SF) y actividades (AC):

(SF1) Visita técnica a la planta

- (AC₁) Realización de recorrido por cada unidad de tratamiento.
- (AC₂) Análisis de los diseños originales de la PTAR para comparar con las condiciones actuales.
- (AC₃) Medición del caudal y carga contaminante.
- (AC₄) Entrevistas con operadores para identificar limitaciones y problemas en la operación.

(SF2) Elaboración de diagnóstico técnico

(AC₁) Documentación del estado de las unidades de tratamiento y sus capacidades operativas mediante fotografías y datos cuantitativos.

8.2.4.2 Determinación del grado de remoción de contaminantes en la planta de tratamiento

Se analizaron parámetros como color, demanda química de oxígeno (DQO), turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), oxígeno disuelto (OD), sólidos disueltos totales (SDT), dureza, coliformes totales, pH y conductividad eléctrica, tanto en el afluente como en el efluente mediante las siguientes subfases (SF) y actividades (AC):

(SF₃) Muestreo en puntos estratégicos

- (AC₁) Toma de muestras representativas en el afluente y en el efluente de la PTAR.
- (AC₂) Análisis de pruebas de laboratorio para medir DQO, turbidez, coliformes totales, SDT, pH, SST, color, conductividad eléctrica, temperatura, OD, turbiedad, alcalinidad y dureza.

(SF₄) Comparación con normativas

- (AC₁) Contrastar los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015.
- (AC₂) Cálculo de eficacia de remoción para SST y DQO, evaluando la efectividad de las unidades de tratamiento.

8.2.4.3 Análisis de las muestras

La Resolución 0631 de 2015 y el Decreto 1076 de 2015 se tuvieron en cuenta en el desarrollo de esta investigación referente a los valores máximos permisibles de los parámetros en las aguas residuales domésticas para ser vertidas a una fuente receptora. Los parámetros físicos y químicos de interés en esta investigación se determinaron de acuerdo con la “Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas” del IDEAM (2002b). El pH, la temperatura, el OD y la conductividad

eléctrica se midieron *in situ*, es decir, al momento que se tomó la muestra mediante el instrumento y/o equipo respectivo previamente calibrado. Mientras que la DQO, los SST, los SDT, los coliformes totales, la dureza, la alcalinidad, la turbidez y el color, fueron analizados posteriormente en laboratorio. Los métodos de análisis para cada parámetro se aprecian en la tabla 2.

Tabla 2. Métodos analíticos para los parámetros físicos y químicos.

Parámetro	Método de análisis
pH	Potenciométrico
Temperatura	Electrométrico
Color	Espectrofotométrico
Dureza	Titulación volumétrica
Demanda química de oxígeno (DQO)	Reflujo cerrado y colorimétrico
Turbidez	Nefelométrico
Sólidos suspendidos totales (SST)	Gravimétrico
Sólidos disueltos totales (SDT)	Electrométrico
Conductividad eléctrica (CE)	Electrométrico
Oxígeno disuelto (OD)	Electrométrico
Coliformes totales	Siembra directa
Alcalinidad	Titulación volumétrica

Fuente. Adaptada de Diagnóstico de aguas, por Hincapié-Pérez & Chaverra-Cardona, 2015.

A continuación, las consideraciones que se tuvieron en cuenta para la toma de muestras compuestas de acuerdo con el *Instructivo Recolección Muestras de Agua* de la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare, 2014).

- Las muestras compuestas en el tiempo se emplearon para observar concentraciones promedio con el fin de calcular las respectivas cargas o la eficacia de una planta de tratamiento.
- Para recolectar las alícuotas de una muestra compuesta el intervalo máximo fue de media hora, en un tiempo de composición mínimo de 4 horas.
- No se recolectaron muestras compuestas para la determinación de parámetros sujetos a cambios significativos e inevitables durante el almacenamiento; dichas determinaciones se deben realizar en muestras puntuales lo más pronto posible

después de la recolección y preferiblemente en el sitio de recolección, por ejemplo: gases disueltos, cloro residual, sulfuros, temperatura, pH, plaguicidas, grasas y aceites, microbiológico.

- Las muestras individuales (alícuotas) se recolectaron en volúmenes proporcionales al caudal, calculando obtener un volumen final de 3,5 L (3500 mL).

9.9. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Para el cumplimiento del tercer objetivo específico se realizó gráficos de columnas agrupadas; para la visualización de resultados teniendo en cuenta el grado de remoción de DQO y SST, el cual se determinó implementando la ecuación 1:

$$\%Remoción = \frac{Concentración Af - Concentración Ef}{Concentración Af} * 100 \quad (1)$$

Donde:

Af: Afluente; *Ef*: Efluente

Se verificó el cumplimiento o incumplimiento de los límites máximos permisibles para los parámetros físicos y químicos establecidos en la Resolución 0631 de 2015 y en el Decreto 1076 de 2015. Adicionalmente, se realizó las siguientes subfases y actividades:

(SF5) Identificación de puntos críticos

- (AC₁) Análisis de los resultados obtenidos en los objetivos anteriores para detectar unidades con menor eficacia.
- (AC₂) Revisión de tecnologías alternativas que puedan ser implementadas en las unidades de tratamiento actuales.
- (AC₃) Diseño de estrategias operativas en el manejo de flujo, limpieza de equipos y rutinas de mantenimiento preventivo.

Una vez se realizó el análisis anteriormente descrito, se propuso la optimización de las unidades de tratamiento, enfocándose en el mejoramiento de la eficacia operacional de la planta.

9. RESULTADOS

9.10. IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE CADA UNIDAD DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Se identificó el estado actual de cada unidad de tratamiento mediante una visita técnica en la cual se entrevistó al operador de la planta, Manuel Osiris Ríos, quien lleva tres años en el cargo. El operador ingresó a laborar en enero de 2023 y la PTAR comenzó a funcionar de manera intermitente con un caudal medio de $6,25 \text{ L s}^{-1}$, pero dejó de funcionar este año antes de la visita.

Según la entrevista, las bombas se dañaron por sobrecarga y falta de mantenimiento; debido a que el pozo de bombeo se llena de lodo. La planta se encuentra en mal estado primero que todo porque no cuenta con las bombas hacia los tanques reactores para realizar el proceso (Anexo 1), lo que ha llevado a verter las aguas directamente al caño Las Pitas (Figura 2), ya que la planta no está en operación por falta de mantenimiento.



Figura 2. Manhole que vierte el agua residual de la PTAR al caño Las Pitas.

Fuente: Autor, 2025.

De acuerdo con el manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del corregimiento La Mata (Alcaldía Municipal de La Gloria, 2020), la PTAR fue diseñada para operar a un caudal de $10,64 \text{ L s}^{-1}$ e inicialmente operó con un caudal medio de $6,25 \text{ L s}^{-1}$, dentro de los límites esperados.

La PTAR cuenta con dos estructuras para el tratamiento del agua: reactores UASB y filtros percoladores. Inicialmente, debería realizarse un pretratamiento de sedimentación de sólidos gruesos, luego el agua residual pasaría a un tanque de igualación desde donde se realiza el bombeo hasta el nivel hidráulico de funcionamiento del reactor UASB. Posteriormente, el agua residual pasaría a los filtros percoladores, para después pasar a un sedimentador por gravedad diseñado con opción de floculación y, por último, descargar el efluente en el caño Las Pitas (Figura 3).



Figura 3. PTAR La Mata.

Fuente: Autor, 2025.

Las limitaciones en la gestión de mantenimiento han ocasionado averías en las bombas, por lo cual no se puede conducir el agua a todo el sistema (Anexo 1). En consecuencia, no hay descomposición biológica por parte de los reactores, hay obstrucción en los filtros percoladores cuya superficie se encuentra cubierta por una capa de algas y también hay corrosión y desgaste en los desarenadores (Anexo 1).

9.11. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

Se presentan resumidos en la tabla 3 los valores registrados a partir de la medición de variables físicas, químicas y microbiológicas, en el afluente (P₁), efluente (P₂), aguas arriba del caño Las Pitas (Q₁) y aguas abajo o después del vertimiento de la PTAR (Q₂).

Tabla 3. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos obtenidos en la PTAR y en el caño Las Pitas.

	Estación	Temperatura del agua (°C)	pH	Conductividad Eléctrica (μS cm ⁻¹)	SDT (mg L ⁻¹)	Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	Color (mg L ⁻¹)
PTAR	P ₁	30,90	6,50	1028,00	722,66	0,58	268,00
La Mata	P ₂	29,50	6,07	935,66	642,66	0,68	245,00
Arroyo Las Pitas	Q ₁	27,00	7,30	1506,00	106,00	2,48	97,00
	Q ₂	30,80	6,25	1248,20	903,00	0,42	129,00

	Estación	Turbiedad (UNT)	SST (mg L ⁻¹)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Dureza (mg CaCO ₃ /L)	DQO (mg L ⁻¹)	Coliformes Totales (UFC/100 mL)
PTAR	P ₁	7950,00	10020,00	399,00	105,00	560,00	308000
La Mata	P ₂	110,3	71,40	306,00	96,00	480,00	237000
Arroyo Las Pitas	Q ₁	3,3	6,30	72,00	54,00	118,00	158000
	Q ₂	77,9	30,00	216,00	90,00	225,00	213000

Fuente: Autor, 2025.

9.11.1. Temperatura del agua

La temperatura del afluente fue de 30,90 °C y del efluente 29,50 °C, debido a que el agua al ser vertida se expone a temperatura ambiente y disminuye la temperatura. Por otro lado, el caño Las Pitas registró temperatura de 27 °C aguas arriba e incrementó a 30,80 °C después del vertimiento del agua residual.

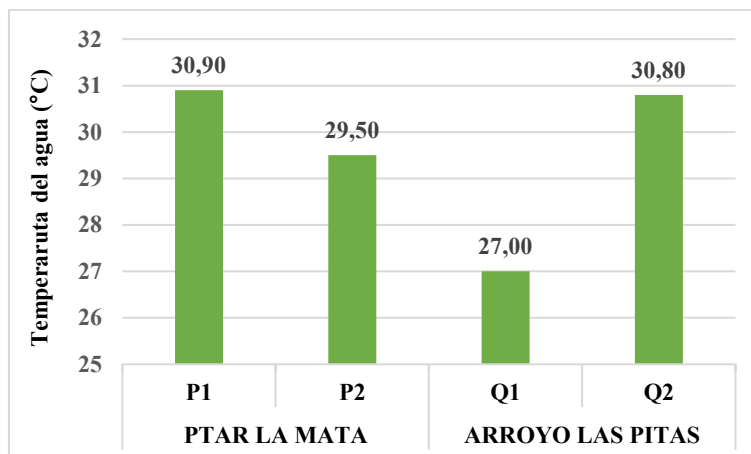


Figura 4. Temperatura del agua.

Fuente: Autor, 2025.

9.11.2. Potencial de hidrogeno (pH)

El pH del afluente fue de 6,50 y del efluente de 6,07. El pH del agua del caño fue mayor aguas arriba, 7,30 y disminuyó a 6,25 después del vertimiento.

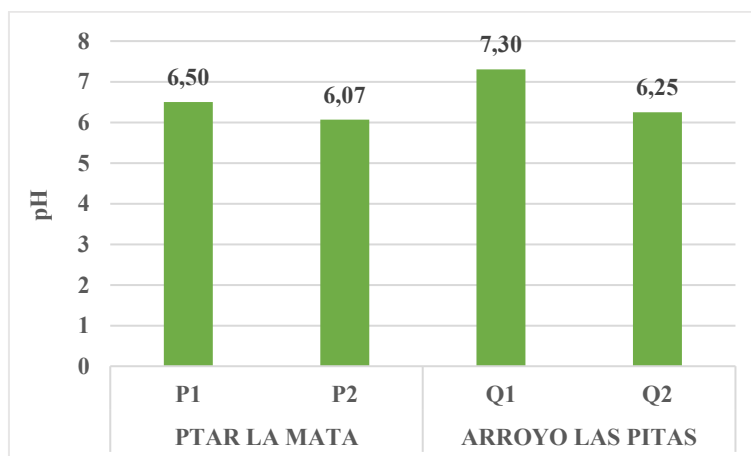


Figura 5. pH del agua.

Fuente: Autor, 2025.

El pH es un factor importante tanto para aguas naturales como para aguas residuales, porque condiciona la vida acuática. Se conoce que valores de pH inferiores a 5 y mayores a 10, son incompatibles con los procesos biológicos (Owhonka, et ál., 2021), por lo que

se podría garantizar condiciones adecuadas para el mantenimiento de flora y fauna acuática.

9.11.3. Conductividad eléctrica (CE)

Los mayores valores de conductividad se obtuvieron aguas arriba y aguas abajo del arroyo, $1506,00 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $1248,20 \mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente. El afluente de la PTAR registró conductividad de $1028,00 \mu\text{S cm}^{-1}$ y su efluente $935,66 \mu\text{S cm}^{-1}$.

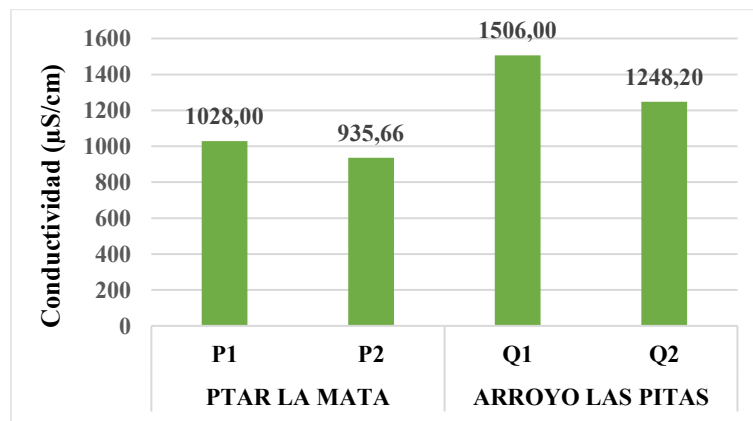


Figura 6. Conductividad del agua.

Fuente: Autor, 2025.

La conductividad del efluente involucra partículas en suspensión que pueden ser sales disueltas, posibles causales de la alta conductividad del caño en el punto de muestreo después del vertimiento. Antes del vertimiento, la conductividad del agua del caño fue de $1.506,00 \mu\text{S cm}^{-1}$, lo que significa aportes externos de iones de cloruro, fosfato y nitrato.

9.11.4. Sólidos disueltos totales (SDT)

Los SDT registrados en el afluente fueron de $722,66 \text{ mg L}^{-1}$ y de $642,66 \text{ mg L}^{-1}$ en el efluente de la PTAR. En la parte alta del caño los SDT fueron de $106,00 \text{ mg L}^{-1}$, pero de $903,00 \text{ mg L}^{-1}$ aguas abajo después del vertimiento.

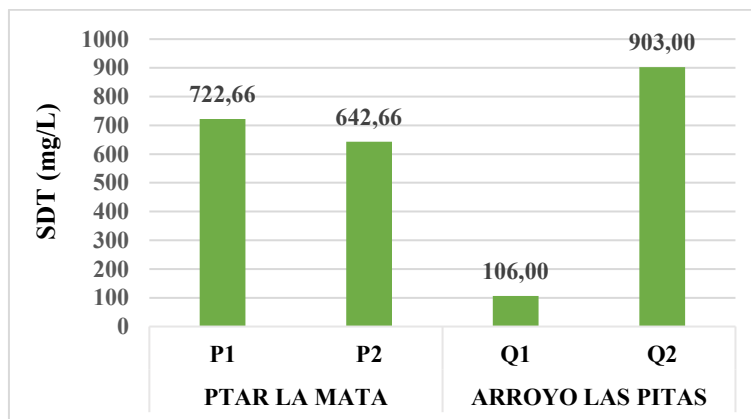


Figura 7. Sólidos disueltos totales del agua.

Fuente: Autor, 2025.

Los SDT analizados en el afluente y en el efluente representa un aspecto positivo en términos de salinidad y posibles impactos sobre suelos agrícolas en escenarios de reúso.

9.11.5. Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto registrado en el afluente fue de 0,58 mg L⁻¹ y en el efluente fue de 0,68 mg L⁻¹; cifras que discrepan mucho del valor obtenido aguas arriba del caño, pues fue de 2,48 mg L⁻¹, pero se redujo a 0,42 mg L⁻¹ aguas abajo.

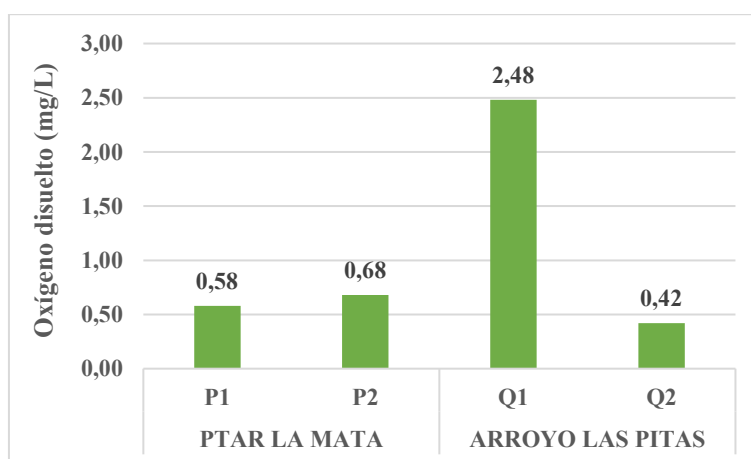


Figura 8. Oxígeno disuelto del agua.

Fuente: Autor, 2025.

La baja concentración de OD en las muestras analizadas, comprueba la inhabilidad de la PTAR de tratar el agua. Asimismo, la concentración de 2,48 mg L⁻¹ de OD registrada en la parte alta del caño y de 0,42 mg L⁻¹ en la parte baja, refleja la incapacidad del ecosistema acuático para sostener vida y es congruente considerar un caso de hipoxia.

9.11.6. Color

Como se esperaba, los valores más altos de color se registraron a la entrada y salida de la PTAR con 268,00 mg L⁻¹ y 245,00 mg L⁻¹, respectivamente. Mientras que el arroyo en su parte alta registró 97,00 mg L⁻¹ e incrementó su color a 129,00 mg L⁻¹ después del vertimiento.

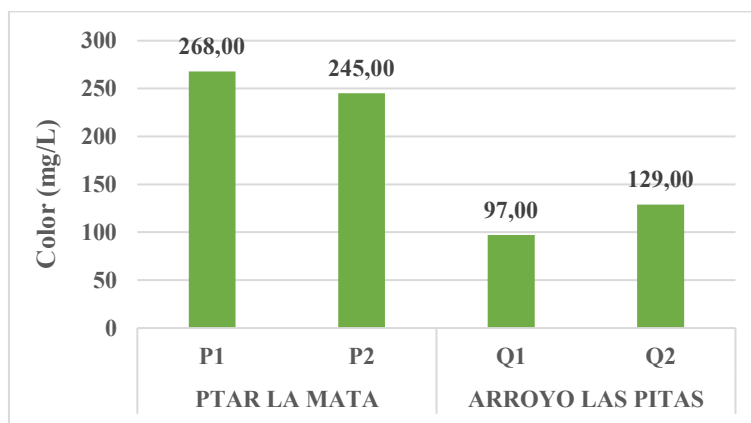


Figura 9. Color del agua.

Fuente: Autor, 2025.

Los valores registrados en la entrada y la salida de PTAR indica una alta carga de compuestos orgánicos que afectan el aspecto visual del agua residual, lo cual es común en aguas residuales domésticas. Esta propiedad organoléptica está relacionada con la capacidad limitada de la PTAR para remover esta variable.

9.11.7. Turbiedad

Se evidenció que el agua residual al entrar a la PTAR presentó 7.950,00 unidades nefelométricas de turbidez, pero descendió su valor a 110,3 UNT en el efluente. El agua del caño, por su parte, registró 3,3 UNT aguas arriba y 77,9 UNT aguas abajo.

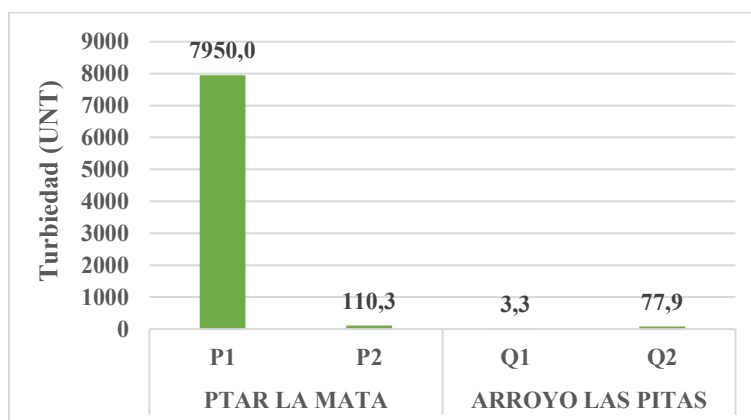


Figura 10. Turbiedad del agua.

Fuente: Autor, 2025.

La turbidez registrada en el afluente reflejó una alta carga de sólidos suspendidos y materia orgánica, lo cual es congruente con los valores obtenidos de sólidos y con la pérdida de transparencia del agua. La diferencia notable en el efluente se debió a la remoción de sólidos gruesos que se realiza inicialmente cuando el agua residual entra al sistema.

9.11.8. Sólidos suspendidos totales (SST)

Con un comportamiento similar a la turbiedad, los SST analizados en el afluente fueron mayores que en las demás muestras, ya que se registró 10020,00 mg L⁻¹ de estos; mientras que en el efluente 71,40 mg L⁻¹. En el caso del caño, aguas arriba los SST fueron de 6,30 mg L⁻¹ y después del vertimiento 30,00 mg L⁻¹.

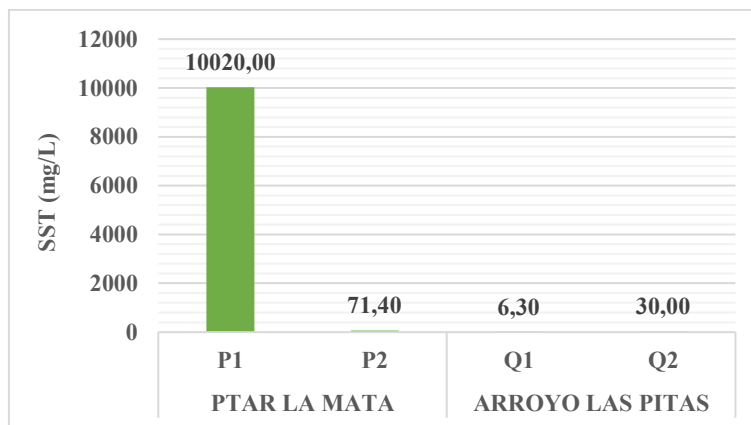


Figura 11. Sólidos suspendidos totales del agua.

Fuente: Autor, 2025.

Los SST se relacionan con el color y estrechamente con la turbiedad, dado que son indicativos de la presencia de partículas en suspensión. Estas tres variables presentaron un patrón de comportamiento definido, pues cuando la concentración de SST aumentaba.

9.11.9. Alcalinidad

La alcalinidad en el afluente de la PTAR fue de 399,00 y de 306,00 en el efluente. En la parte alta del arroyo Las Pitas fue de 72,00 y en la parte baja de 216,00. En contraste con el pH, los valores de alcalinidad indican la capacidad del agua de neutralizar ácidos.

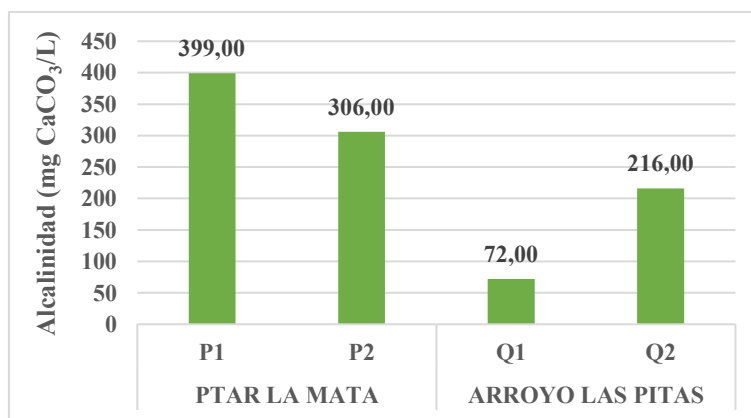


Figura 12. Alcalinidad del agua.

Fuente: Autor, 2025.

La alcalinidad tiene relación inversamente proporcional con el pH. Cuando la alcalinidad aumentó, el pH disminuyó. Ambos parámetros, permitieron que el agua residual y el agua del caño, se comportara de manera estable en términos de acidez o basicidad.

9.11.10. Dureza

Se denota un agua residual ligeramente dura, dado que su dureza osciló entre 96,00 mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ y 105,00 mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ en la salida y entrada a la PTAR. Caso contrario se evidenció aguas arriba del caño, donde la dureza fue de 54,00 mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ y aguas abajo donde fue de 90,00 mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$.

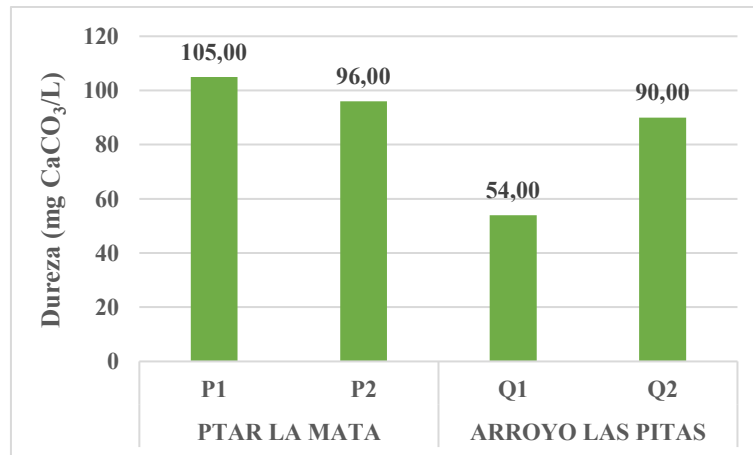


Figura 13. Dureza del agua.

Fuente: Autor, 2025.

La dureza del agua afecta negativamente la vegetación y la fauna acuática en los cuerpos hídricos. El caño Las Pitás presentó menor concentración de dureza antes de la confluencia con el vertimiento del agua residual, al igual que el río Gomti en India en la investigación de Kumar, et ál., (2022).

9.11.11. Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO obtenida en el afluente fue de 560,00 mg L⁻¹ y en el efluente de 480,00 mg L⁻¹. Aguas arriba del caño la DQO fue de 118,00 mg L⁻¹ y de 225,00 mg L⁻¹ aguas abajo.

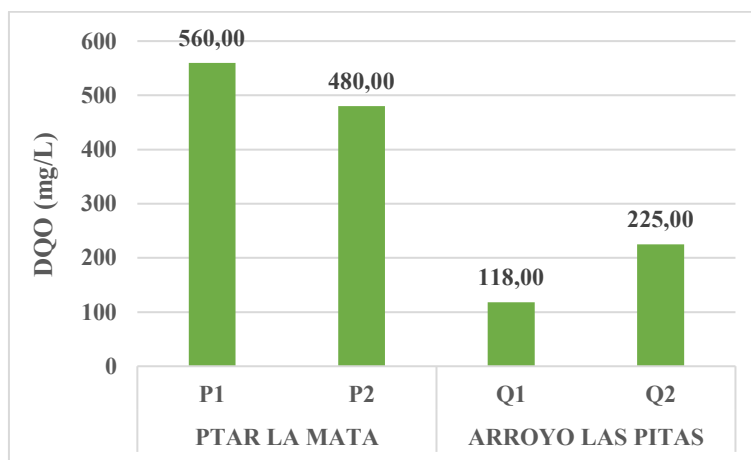


Figura 14. Demanda química de oxígeno del agua.

Fuente: Autor, 2025.

El valor de 118,00 mg L⁻¹ aguas arriba, indica la presencia de posibles vertimientos puntuales, dado que este resultado es relativamente alto para ser de una microcuenca.

9.11.12. Coliformes totales

Los coliformes totales reportados en el afluente fueron de 308.000 UFC/100 mL y de 237.000 UFC/100 mL en el efluente de la PTAR. Para el caso del caño, aguas arriba se registraron 158.000 UFC/100 mL y 213.000 UFC/100 mL después del vertimiento.

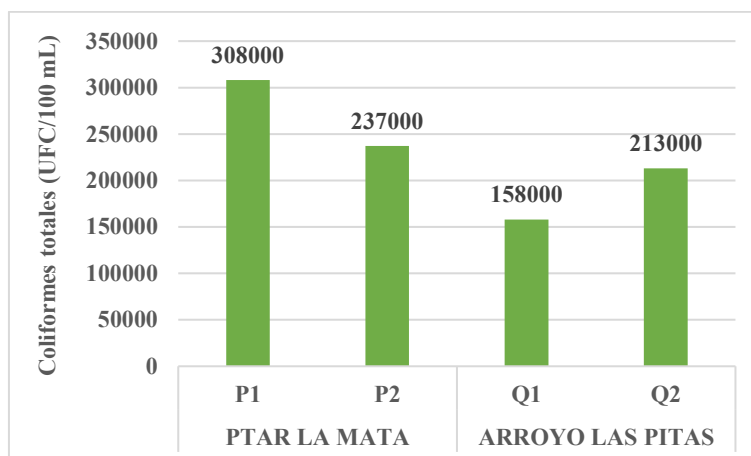


Figura 15. Coliformes totales del agua.

Fuente: Autor, 2025.

El análisis microbiológico mostró un fuerte deterioro en la calidad del agua: el exceso de coliformes totales evidencia contaminación fecal y limitado aprovechamiento del recurso para riego sin tratamiento previo.

9.11.13. Eficacia de remoción de SST y DQO

En el marco de la Resolución 0330 de 2017, los SST alcanzaron una remoción del 99,29% debido al proceso de pretratamiento en las cribas que retienen los sólidos gruesos presentes en el agua residual. Sin embargo, este pretratamiento no fue y no será suficiente para lograr el 60% - 80% de remoción de DQO que exige la norma.

Se constató que los reactores UASB y los filtros percoladores se encuentra completos y conforme al diseño original, pero el abandono de mantenimiento ha provocado fallas operativas, incluyendo la ausencia de bombas necesarias para la circulación de líquidos, equipos detenidos y acumulación de sólidos en los tanques.

Se realizaron inspecciones físicas de los equipos y se entrevistó al personal técnico para identificar los problemas más críticos que impiden la operación eficiente de la planta, el cual fue deficiencias de mantenimiento y ausencia de equipos clave.

9.11.14. Diagnóstico de situación actual en función del ICA e ICOs

El índice de calidad del agua (ICA) y los índices de contaminación del agua (ICOs), son herramientas fundamentales para el mejoramiento de la eficacia operacional de la planta, ya que proporcionan información necesaria sobre la calidad del agua entrante y saliente, así como sobre la eficacia de los procesos de tratamiento referente a parámetros específicos.

El agua residual a la entrada (P₁) de la PTAR fue muy mala (ver table 4) y después de su paso por el desarenador fue mala (P₂), aunque haya hecho sedimentación de residuos sólidos gruesos. Antes del vertimiento, el ICA del agua del caño Las Pitas fue malo, reporte que puede atribuirse a la posibilidad de descargas puntuales individuales de asentamientos adyacentes al caño, lo que imposibilita su uso directo y, por ende, requiere medidas urgentes de recuperación.

Tabla 4. Índice de Calidad del Agua (ICA).

ESTACIÓN	ODs	%SAT O ₂	I, OD	I, SS	I, DQO	I, CE	I, CE	I, pH	ICA	SEÑAL DE ALERTA	
PTAR LA MATA	P ₁	7,44	7,79	0,01	0,00	0,13	-4,9713259	0	0,77	0,18	Muy mala
	P ₂	7,62	8,92	0,01	0,81	0,13	-4,2637858	0	0,62	0,31	Mala
CAÑO LAS PITAS	Q ₁	7,97	31,12	0,03	1,00	0,13	-8,9605991	0	1,00	0,43	Mala
	Q ₂	7,46	5,63	0,01	0,93	0,13	-6,7449889	0	0,68	0,35	Mala

Fuente: Autor, 2026

El ICA con señal de mala calidad en la muestra aguas arriba (Q₁) del caño Las Pitas, indica que el agua casi siempre está amenazada o intervenida negativamente y no es permisible cualquier forma de contacto humano sin un previo tratamiento, como también, señala menos diversidad de organismos acuáticos. La calidad regular en la estación Q₂ del caño, sugiere limitación en los usos del agua, lo que significa que las características del caño se alejan de las condiciones naturales o ideales de una corriente hídrica en buen estado.

El caño no está en condiciones óptimas, pero tampoco es crítica; es decir, puede tener algunos usos limitados con tratamiento. Además, advierte sobre la necesidad de implementar medidas de control y monitoreo para evitar que la calidad se deteriore hasta niveles malos o muy malos.

Los ICOs fueron diseñados para corregir posibles limitaciones del ICA enfocándose en una única variable. Por consiguiente, se utilizó el índice de contaminación por mineralización (ICOMI), el índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), el índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) y el índice de contaminación por pH (ICOPH), para conocer el grado de contaminación del agua del caño.

Por medio de los valores registrados que excedieron los límites máximos permisibles en las normas anteriormente citadas para los parámetros indicadores de mineralización como la conductividad, la dureza y la alcalinidad, se ofrece un panorama de la afectación que atraviesa el caño y se soporta, además, con el cálculo del ICOMI compilado en la tabla 5.

Tabla 5. Índice de contaminación por mineralización (ICOMI).

ESTACIÓN		I, CE	I, D	I, A	ICOMI	SEÑAL DE ALERTA
PTAR LA	P ₁	1,00	1	1,00	1,00	Muy mala
MATA	P ₂	1,00	0,43	1,00	0,81	Muy mala
CAÑO LAS	Q ₁	1,00	0,03	0,11	0,38	Baja
PITAS	Q ₂	1,00	0,32	0,83	0,72	Alta

Fuente: Autor, 2025.

El ICOMI indica que el caño presenta un nivel de contaminación *baja* en la parte alta, lo que implica una baja concentración de sólidos disueltos, dureza y alcalinidad. La cantidad considerable de minerales disueltos en el agua puede causar corrosión en tuberías y disminuir la eficacia del sistema, además de reducir el oxígeno disuelto causando la asfixia de la vida acuática.

Este resultado es el reflejo del vertimiento constante de las aguas residuales domésticas sin tratamiento procedentes de la PTAR La Mata y exige acciones inmediatas de control, saneamiento y restauración. La alta contaminación microbiológica señala la presencia de bacterias, virus y patógenos que no pueden eliminarse ni siquiera con tratamientos simples, de ahí que no es recomendable para riego de hortalizas o cultivos de consumo directo.

Los factores indicadores de contaminación orgánica medidos por el ICOMO, generalmente implican aumento de coliformes y disminución de oxígeno. Aunque estas variables analizadas de forma individual registraron valores alarmantes, el ICOMO indica que la contaminación del afluente, efluente y del agua del caño en la parte alta y baja es muy alta (ver tabla 6).

Tabla 6. Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO).

ESTACIÓN		I, DBO	I, CT	I, Ox	ICOMO	SEÑAL DE ALERTA
PTAR LA	P ₁	1,00	1,63	0,92	0,97	Muy alta
MATA	P ₂	1,00	1,57	0,91	0,97	Muy alta
CAÑO LAS	Q ₁	1,00	1,47	0,69	0,90	Muy alta
PITAS	Q ₂	1,00	1,54	0,94	0,98	Muy alta

Fuente: Autor, 2025.

La clasificación de muy alta del ICOMO para el caño Las Pitas, indican la baja concentración de OD y la presencia de coliformes totales que superan ampliamente los límites establecidos.

En relación a la contaminación por compuestos inorgánicos, la concentración de sólidos suspendidos determinó a través del ICOSUS que la contaminación del afluente es muy alta y en las demás muestras fue muy baja (ver tabla 7).

Tabla 7. Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) e índice de contaminación por pH (ICOPH).

ESTACIÓN		ICOSUS	Señal de alerta	ICOpH	Señal de alerta
PTAR LA MATA	P ₁	1,00	Muy alta	0,005	Muy baja
	P ₂	0,19	Muy baja	0,024	Muy baja
CAÑO LAS PITAS	Q ₁	0,00	Muy baja	0,003	Muy baja
	Q ₂	0,07	Muy baja	0,013	Muy baja

Fuente: Autor, 2025.

Visto de forma individual, los SST no son un parámetro que contribuyan fuertemente a la contaminación del agua del caño. Sin embargo, este índice solo significa que la fracción de SST es baja, pero no necesariamente que el agua sea apta para su reutilización. Este reporte obedece a que cada índice evalúa únicamente los parámetros de interés para cada uno, sin considerar otras variables importantes.

Con enfoque en la variable pH, la contaminación del agua residual a la entrada y la salida de la PTAR es *muy baja* y no existe influencia notable en la calidad del agua del caño por parte del pH, pues el nivel de contaminación aguas arriba y aguas debajo de Las Pitass fue *muy baja*. Según el ICOpH, el agua está en un rango casi neutro y no presenta problema en esta variable, garantizando equilibrio en la vida acuática.

9.12. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DE LAS UNIDADES DE TRATAMIENTO

Las oportunidades de mejora se centran en: a) mantenimiento y recuperación de equipos, b) implementación de sistema de recirculación c) reducción de costos. Aunque el diseño de las unidades de tratamiento es correcto para las condiciones iniciales de tratamiento, cabe destacar que esta propuesta es en aras de optimizar el funcionamiento de la PTAR, teniendo en cuenta que hoy día se encuentra inactiva.

- **Mantenimiento y recuperación de equipos**

Se debe reponer las bombas y válvulas faltantes para realizar la distribución del agua residual a todo el sistema. Es necesaria la limpieza y rehabilitación de tanques y rejillas, como también la revisión del cableado eléctrico para garantizar el correcto funcionamiento de las bombas.

Más del 60% de la demanda energética de una PTAR está asociada al sistema de bombeo. Las bombas que antes estaban en el sistema y hoy día hacen falta, eran de tipo centrifugas. Estas son consideradas altamente eficientes. Sin embargo, antes de ser instaladas sería adecuado colocar bombas de mayor potencia y que quede una sola para posible recirculación.

- **Implementación de sistema de recirculación**

Las dimensiones actuales de cada filtro percolador están consignadas en la tabla 8, serán ajustadas las que sean necesarias para alcanzar entre un 60% a 80% de remoción de DQO como lo establece la Resolución 0330 de 2017.

Tabla 8. Parámetros de diseño del filtro percolador de la PTAR La Mata.

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro (D)	m	2,80
Volumen (V)	m ³	65,53
Tipo de medio	Plástico de alta tasa	
Caudal promedio (Q _{prom})	m ³ d ⁻¹	540
Caudal máximo (Q _{máx})	m ³ d ⁻¹	919,30

Fuente: Autor, 2025

Teniendo en cuenta que la concentración de DQO del afluente es de 560 mg L⁻¹, igual a 0,56 kg m⁻³, la carga orgánica (W_{DQO}) recibida por cada filtro biológico es la siguiente:

$$W_{DQO} = Q_{Prom} * C_{DQO} \rightarrow W_{DQO} = 540 \frac{m^3}{día} * 0,56 \frac{kg}{m^3} \rightarrow W_{DQO} = 302,4 \frac{kg \text{ DQO}}{día}$$

Ahora bien, la carga orgánica volumétrica (COV) se calcula a continuación:

$$COV = \frac{W_{DQO}}{V} \rightarrow COV = \frac{302,4 \frac{kg \text{ DQO}}{día}}{65,53 m^3} \rightarrow COV = 4,61 \frac{kg \text{ DQO}}{m^3 * día}$$

La COV está por encima de lo establecido en el *Manual de Operación y Mantenimiento de la PTAR La Mata* (1,2 kg DQO/m³ * día) y fuera del rango típico de filtros percoladores con medio plástico (1,2 – 4 kg DQO/m³ * día). Esto significa que el filtro está sobrecargado orgánicamente y la eficacia de remoción de DQO no es la esperada.

Por consiguiente, se realizó el ajuste requerido al funcionamiento del filtro percolador aplicando recirculación (R), con lo cual se pretende alcanzar una concentración de DQO ≤ a 180 mg L⁻¹, es decir, una eficacia de remoción de ~68%. Para lograr este porcentaje es necesario una R ≈ 1,5 a 2. En ese sentido, el caudal efectivo que pasaría por el filtro biológico es:

$$Q_{ef} = Q_{Prom} + Q_r \rightarrow Q_{ef} = Q_{Prom}(1 + R) \rightarrow Q_{ef} = 540 \frac{m^3}{día} * (1 + 1,5)$$

$$Q_{ef} = 540 \frac{m^3}{día} * 2,5 \rightarrow Q_{ef} = 1.350,00 \frac{m^3}{día}$$

El caudal de recirculación sería de:

$$Q_r = Q_{ef} - Q_{Prom} \rightarrow Q_r = 1.350,00 \frac{m^3}{día} - 540 \frac{m^3}{día} \rightarrow Q_r = 810 \frac{m^3}{día}$$

De esta manera la carga volumétrica efectiva es la siguiente:

$$CV_{ef} = \frac{W_{DQO}}{V} * \frac{Q_{Prom}}{Q_{ef}} \rightarrow CV_{ef} = \frac{302,4 \text{ kg DQO/día}}{65,53 \text{ m}^3} * \frac{540 \text{ m}^3/\text{día}}{1.350,00 \text{ m}^3/\text{día}}$$
$$CV_{ef} = 1,85 \text{ kg DQO/m}^3 * \text{ día}$$

Y el tiempo de retención hidráulica producto de la fracción volumen del filtro sobre el caudal efectivo (Q_{ef}), sería de:

$$t_h = \frac{V}{Q_{ef}} \rightarrow t_h = \frac{65,53 \text{ m}^3}{1.350,00 \text{ m}^3/\text{día}} \rightarrow t_h = 0,049 \text{ día} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \rightarrow t_h = 1,18 \text{ horas}$$

La recirculación permitiría una carga volumétrica efectiva de 1,85 kg DQO/m³ * día en un tiempo de retención de 1,18 horas.

- **Reducción de costos**

La reducción del consumo energético se logra empleando equipos de alta eficiencia, como bombas y sopladores optimizados, así como variadores de velocidad que ajustan la operación a las necesidades reales del caudal. Estas mejoras permiten disminuir significativamente el gasto eléctrico sin comprometer la calidad del tratamiento.

La capacitación del operador es fundamental para reanudar el procedimiento operativo de forma segura y eficiente, estableciendo rutinas de mantenimiento preventivo y correctivo e implementando reportes de funcionamiento y novedades.

Optimizar la gestión del lodo disminuye costos al reducir el volumen a manejar y mejorar su deshidratación. El uso adecuado de polímeros y el control de los procesos de espesamiento permiten minimizar el gasto en disposición final, convirtiéndolo en uno de los elementos de ahorro más importantes en la operación de la PTAR.

10. DISCUSIONES

Hoy día, la PTAR no cuenta con las capacidades operativas requeridas para tratar el agua residual doméstica de La Mata, la principal limitación operativa identificada fue el mantenimiento diferido de las bombas encargadas de distribuir el agua desde la piscina hasta los tanques reactores (UASB y filtros percoladores). La acumulación de lodo en la piscina, junto con la falta de mantenimiento preventivo, generó fallas mecánicas en las bombas y el retiro de las mismas del sistema, impidiendo completamente la conducción del agua a las unidades de tratamiento e interrumpiendo la cadena de procesos biológicos que dependen del flujo continuo.

Se realizó la comparación de los valores obtenidos con los límites máximos permitidos en la normatividad colombiana referente a aguas residuales domésticas. Para el contraste de algunos parámetros no contemplados en las leyes nacionales, se trajo a colación legislación internacional relacionada con el tópico abordado en esta investigación.

- **Parámetros analizados en el afluente y en el efluente de la PTAR**

De acuerdo con lo establecido en la Resolución 0631 de 2015 (MADS, 2015), los parámetros físicos y químicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales, se aprecian en la tabla 9:

Tabla 9. Parámetros físicos y químicos y sus valores límites máximos permisibles.

Parámetro	Unidades	Valor límite permisible
Potenciales de hidrogeno (pH)	Unidades de pH	6,00 – 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O ₂ L ⁻¹	180
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg L ⁻¹	90

Fuente: Adaptada de Resolución 0631 de 2015, por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015.

En ese sentido, el pH en el afluente (6,50) y en el efluente (6,07), cumple con lo exigido en la resolución porque se encuentra dentro del rango de 6,00 a 9,00.

Los SST en el efluente no superan el límite máximo de 90 mg L^{-1} , pero en el afluente sí, cuyo valor registrado fue de $10.020,00 \text{ mg L}^{-1}$, muy por encima de lo permitido, lo que reflejó una alta carga contaminante inicial. A pesar de que en el efluente se evidencia una disminución significativa de los SST debido a la sedimentación de residuos sólidos a la entrada de la PTAR, el cumplimiento en este último no compensa la magnitud del aporte contaminante inicial.

Asimismo, la DQO registrada en el afluente y en el efluente, no cumplió con lo máximo permitido en la resolución, ya que superó los 90 mg L^{-1} . Estos resultados sugieren que no existe depuración suficiente de la materia orgánica, lo cual podría generar impactos negativos en el cuerpo receptor al favorecer condiciones anaerobias y proliferación de microorganismos patógenos.

Parámetros como la alcalinidad y la dureza total, no precisan límites máximos en la resolución, aun así, sus resultados ante la autoridad competente constituyen una línea base para futuras evaluaciones de la calidad del efluente. Los demás parámetros analizados en esta investigación no se encuentran contemplados en la norma. Por consiguiente, fue importante traer a colación otras normativas relacionadas con el tópico abordado.

La Resolución 1256 de 2021 fija un valor de $1.500,0 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ como límite máximo permisible de conductividad en aguas residuales destinadas para uso agrícola, la cual cumple en el afluente y en el efluente de la PTAR (MADS, 2021).

La Resolución 0330 de 2017 (MinVivienda, 2017), define que, en función de la calidad de agua de una fuente receptora, los procesos mínimos de tratamiento de una PTAR deben garantizar que el oxígeno disuelto sea $\geq 4 \text{ mg L}^{-1}$, criterio que no se cumple en ambas muestras. Este hallazgo es crítico, dado que el OD es un indicador clave de la capacidad del efluente para sostener vida acuática y evitar condiciones anóxicas en el medio receptor.

En el marco internacional, el Decreto Supremo 003-2010-MINAM de Perú (MINAM, 2010), define que la temperatura para efluentes vertidos a un cuerpo natural de agua debe ser $< 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, característica que se cumple en ambas muestras tomadas en la PTAR, lo que sugiere que no se generan descargas térmicas dañinas.

La Norma Técnica Ecuatoriana (NTE)-INEN-1108: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes para el Recurso Agua (ARCA, 2015), estipula un valor máximo de 3.000 mg L^{-1} para los SDT, por lo que los SDT analizados en el afluente y en el efluente cumplen, lo que representa un aspecto positivo en términos de salinidad y posibles impactos sobre suelos agrícolas en escenarios de reúso.

La Ley 21623 de Chile precisa un límite máximo de 30 UNT de turbidez como criterio de calidad para efluentes domésticos con fines de reúso en el sector silvoagropecuario (MMA, 2023), el cual es superado en las muestras tomadas en el afluente y el efluente de la PTAR. Este resultado constituye una limitación para aplicaciones de reúso agrícola y silvoagropecuario, dado que la alta turbidez está asociada a la presencia de sólidos coloidales y microorganismos.

- **Parámetros analizados aguas arriba y aguas abajo del caño Las Pitas**

El Decreto 1076 de 2015 (MADS, 2015), establece criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso hídrico. En este caso, la tabla 10 presenta los valores máximos permitidos para preservación de flora y fauna y para uso en el sector agrícola.

Tabla 10. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos y sus valores límites máximo.

Parámetro	Unidades	Valor límite permisible
Potenciales de hidrogeno (pH)	Unidades de pH	4,5 – 9,0
Coliformes totales	NMP/100 mL	5.000 microorganismos/100 mL
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	≤ 40
Oxígeno disuelto	mg L^{-1}	4,0
Color	-	*No debe presentarse sustancias que impartan color que interfieran con la actividad fotosintética

Fuente: Adaptada de Decreto 1076 de 2015, por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015.

Considerando esto, el pH mínimo para la preservación de flora y fauna en aguas cálidas superficiales es de 4,5 y no debe excederse de 9,0. El agua del caño Las Pitas cumple con este criterio, dado que su potencial de hidrogeno se encuentra entre 6,25 aguas abajo y 7,30 aguas arriba. Asimismo, la temperatura registrada se encuentra dentro del criterio de calidad ($\leq 40^{\circ}\text{C}$), porque osciló entre $27,00^{\circ}\text{C}$ y $30,80^{\circ}\text{C}$, lo que sugiere ausencia de descargas térmicas elevadas.

Los coliformes totales para aguas superficiales destinadas para uso agrícola en cultivos de consumo directo, no deben exceder los 5.000 UFC/100 mL por lo que este parámetro no cumple en ninguna de las dos muestras tomadas del caño. Como criterio adicional de calidad, el Decreto establece que no debe presentarse color que interfiera con la actividad fotosintética del ecosistema acuático, pero este parámetro físico tampoco cumple la normativa.

Por otra parte, el OD estuvo por debajo del valor determinado para conservación de flora y fauna ($4,0 \text{ mg L}^{-1}$), pues aguas arriba fue de $2,48 \text{ mg L}^{-1}$ y aguas abajo de $0,42 \text{ mg L}^{-1}$. La concentración normal de OD que debería tener las aguas superficiales se ubica en el rango de 7 mg L^{-1} a 8 mg L^{-1} (Cortolima, 2009).

Con valores de $2,48 \text{ mg L}^{-1}$ aguas arriba y $0,42 \text{ mg L}^{-1}$ aguas abajo, el sistema acuático presenta condiciones de hipoxia y anoxia, respectivamente, lo que pone en riesgo la vida acuática. Estos valores son incluso inferiores al rango normal de $7-8 \text{ mg L}^{-1}$ esperado en aguas superficiales naturales, lo que confirma una elevada presión contaminante.

En relación con las leyes internacionales, la conductividad analizada no cumplió con lo estipulado en el Reglamento de Gestión de la Calidad del Agua Superficial de Turquía, pues la conductividad de los recursos hídricos superficiales debe ser menor a $400 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Ministerio de Asuntos Forestales y Hídricos, 2012). El exceso de este límite indica una elevada concentración de sales disueltas y posibles riesgos de salinización para suelos agrícolas irrigados con este recurso.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece una concentración de 1.000 mg L⁻¹ para los SDT en aguas superficiales continentales, criterio que se cumple en ambas muestras tomadas del agua del caño (Biswas, et ál., 2024), lo cual es un aspecto favorable porque no afecta negativamente el crecimiento de macroinvertebrados fluviales.

Por otro lado, los SST registrados aguas arriba (6,30 mg L⁻¹) se encuentran en cumplimiento de la normativa chilena referente a aguas continentales superficiales, mientras que la muestra aguas abajo (30 mg L⁻¹) no, ya que supera los 24 mg L⁻¹ (CONAMA, s.f.). Esta discrepancia refleja un incremento de la carga contaminante en el trayecto del caño.

Según los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua del Perú (MINAM, 2008), las concentraciones de DQO en aguas superficiales deben ser máximo 30 mg L⁻¹; de ahí que el agua del caño no cumple con este valor, registró valores de 118 mg L⁻¹ y 225 mg L⁻¹. Este resultado confirma la presencia de altas concentraciones de materia orgánica y otros compuestos oxidables, lo que también concuerda con la baja disponibilidad de oxígeno disuelto registrada en ambas estaciones de muestreo.

- **Eficacia de remoción de SST y DQO**

La Resolución 0330 de 2017 (MinVivienda, 2017), define rangos esperados de eficacia con base en los procesos de tratamiento realizados (ver tabla 11). La PTAR La Mata está diseñada para realizar tratamiento secundario mediante el reactor UASB hasta llegar al filtro percolador de alta tasa plástico.

Tabla 11. Rangos de eficacia en los procesos de tratamiento.

Tipo de tratamiento	Unidad de tratamiento	Eficacia mínima de remoción de parámetros, porcentajes (%)	
		DQO	SST
Tratamiento secundario	Reactor UASB	60 - 80	60 - 70
	Filtros percoladores de alta tasa, plástico	60 - 80	65 - 85

Fuente: Adaptada de Resolución 0330 de 2017, por Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017.

La DQO alcanzó una remoción del 14,29%, debido a que la PTAR se encuentra fuera de operación y los SST fueron removidos en un 99,29%. Aunque la PTAR no se encuentre en funcionamiento, estos porcentajes se lograron gracias a la sedimentación de sólidos gruesos, porque al retirarlos físicamente del agua residual se reduce la concentración de ambos parámetros. Además, la materia orgánica pudo adherirse a paredes de la tubería, reduciendo la concentración medida en el agua.

11. CONCLUSIONES

La inoperatividad de la PTAR La Mata no obedece a deficiencias de diseño ni a insuficiencia hidráulica, sino a una deficiente gestión administrativa y de mantenimiento preventivo que ocasionó la acumulación de lodos en el pozo de bombeo, provocando daños mecánicos en las bombas de impulsión e interrumpiendo por completo la conducción del agua hacia el reactor UASB y los filtros percoladores, unidades responsables de la remoción de carga orgánica.

A pesar de que las estructuras civiles de la PTAR presentan condiciones físicas aceptables, las limitaciones operativas identificadas (bombas fuera de servicio, filtros percoladores obstruidos, desarenadores con corrosión y acumulación de sólidos) configuran un escenario de abandono técnico que impide cualquier forma de tratamiento secundario. La PTAR opera de facto como un sistema de paso directo al caño Las Pitás, sin garantizar ninguna condición mínima de calidad en el vertimiento conforme a la normatividad colombiana vigente.

Los parámetros determinados en el afluente (P1) y el efluente (P2) de la PTAR evidencian que el único proceso activo es la retención mecánica de sólidos gruesos en el pretratamiento, logrando una remoción del 99,29% de SST. Sin embargo, los parámetros que reflejan carga orgánica disuelta y contaminación microbiológica (DQO de 560 mg/L en P1 y 480 mg/L en P2), coliformes totales (308.000 y 237.000 UFC/100 mL) y oxígeno disuelto (0,58 y 0,68 mg/L) permanecen prácticamente sin cambio entre la entrada y la salida, confirmando que las unidades biológicas de la planta (reactor UASB y filtros percoladores) están completamente inactivas. Todos estos parámetros incumplen los límites máximos establecidos en la Resolución 0631 de 2015 y la Resolución 0330 de 2017.

El análisis de los puntos Q1 y Q2 en el arroyo Las Pitas reveló que este cuerpo hídrico ya presenta una condición física, química y microbiológica comprometida antes de recibir el vertimiento de la PTAR, con valores de coliformes totales (158.000 UFC/100 mL), DQO (118 mg/L) y oxígeno disuelto (2,48 mg/L) que incumplen las normas colombianas e internacionales para preservación de flora y fauna, y uso agrícola. Aguas abajo del vertimiento (Q2), el deterioro se acentúa: el OD disminuye a 0,42 mg/L indicando condiciones de anoxia, los coliformes ascienden a 213.000 UFC/100 mL y la DQO a 225 mg/L. Esta situación implica que el caño Las Pitas recibe acción contaminante de múltiples fuentes además de la PTAR, y que el vertimiento sin tratamiento la agrava significativamente.

La aplicación integrada del ICA y los cuatro índices de contaminación (ICOMI, ICOMO, ICOSUS e ICOpH), permitió un diagnóstico complementario del sistema. El ICA clasificó todos los puntos en categoría mala, siendo el oxígeno disuelto el factor de mayor incidencia negativa, evidenciando condiciones generalizadas de hipoxia. El ICOMO e ICOMI confirmaron que la contaminación orgánica, microbiológica y mineral constituyen las principales amenazas, agravadas aguas abajo por la descarga sin tratamiento adecuado de la PTAR. En contraste, el ICOSUS y el ICOpH resultaron bajos en la mayoría de los puntos, indicando que los sólidos suspendidos y el pH no son factores críticos de deterioro, salvo en el afluente de la planta.

El diagnóstico técnico y los resultados de laboratorio evidencian que la optimización de la PTAR La Mata no requiere un rediseño estructural integral, sino la reactivación operativa a través de intervenciones priorizadas: la reposición y mantenimiento de las bombas de impulsión es la acción más urgente, ya que sin ella ninguna otra unidad puede operar.

La propuesta de optimización de la PTAR La Mata no requiere un rediseño estructural integral, dado que las unidades existentes se encuentran físicamente en condiciones aceptables. Las intervenciones prioritarias identificadas se centran en la reposición y mantenimiento de las bombas de impulsión, la limpieza y rehabilitación de tanques y rejillas, y la implementación de un sistema de recirculación en los filtros percoladores. Adicionalmente, la capacitación del operador y el establecimiento de rutinas de mantenimiento preventivo son determinantes para garantizar la continuidad operativa de la planta.

12. RECOMENDACIONES

Gestionar el funcionamiento de la PTAR para realizar las mismas actividades y determinar su eficacia de tratamiento y cumplimiento con los estándares nacionales referentes al vertimiento de agua residual doméstica a una fuente receptora.

Para mejor detalle de la incidencia del vertimiento de la PTAR La Mata sobre el caño Las Pitas, se sugiere incorporar un análisis ecológico que contemple bioindicadores como peces o algas, lo cual permitiría evaluar los impactos sobre la biodiversidad del caño porque permanecen en contacto constante con el medio acuático.

Recurrir a índices complementarios de calidad del agua, ya que una de las limitaciones inherentes a los ICOs es su carácter parcial y específico, que puede dar lugar a interpretaciones incompletas si se analizan de forma aislada.

Ampliar la cobertura temporal y espacial del muestreo, incluyendo épocas del año y más estaciones de muestreo para obtener una visión dinámica de la calidad del agua.

Evaluar tecnologías de tratamiento apropiadas al contexto local considerando los costos de operación y mantenimiento.

13. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Municipal de La Gloria. (2020). *Manual de Operación y Mantenimiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del corregimiento La Mata, municipio de La Gloria, Cesar*.
- ARCA. (21 de Agosto de 2015). *Norma Técnica Ecuatoriana INEN-1108: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes para el Recurso Agua*. Agencia de Regulación y Control del Agua: <https://www.cip.org.ec/attachments/article/1579/PROPUESTA%20ANEXO%201.pdf>
- Auccatinco-Hirpahuanca, R. (2021). *Evaluación de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales en el distrito de Cusipata, provincia Quispicanchi – Cusco*. Universidad Continental: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11355/1/IV_FIN_107_TE_Auccatinco_Hirpahuanca_2021.pdf
- Bermudez-Grisales, J. A., & Carrillo-Loaiza, J. E. (2019). *Evaluación y diagnóstico a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas del casco urbano del municipio de Guasca, Cundinamarca*. Universidad Católica de Colombia: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/40189aeb-122f-45d5-bf70-a6c394b56ae0/content>
- Biswas, A., Awal, M. A., Nabi, M. M., Ray, S., & Chakroborty, A. (2024). Evaluating Domestic Wastewater Quality in Khulna City Using Correlation Analysis between Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 8(3), 207-216. <https://doi.org/10.22034/jcema.2025.488900.1147>
- Campo-Jiménez, J. C., & Cabas-Basa, A. (2017). *Eliminación de olor en lagunas de oxidación de la PTAR de Salguero del municipio de Valledupar, Cesar por medio de filtro de carbón activado*. Universidad Popular del Cesar.

- Cao, M., Hu, A., Gad, M., Adyari, B., Qin, D., Zhang, L., Sun, Q., & Yu, C.-P. (2022). Domestic wastewater causes nitrate pollution in an agricultural watershed, China. *Science of The Total Environment*, 823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153680>
- CONAMA. (s.f.). *Guía para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas*. Comisión Nacional del Medio Ambiente- Gobierno de Chile: https://www.ucursos.cl/forestal/2009/0/PR010-1/1/material_docente/bajar?id=480218&bajar=1
- Cornare. (14 de Febrero de 2014). *Instructivo Recolección Muestras de Agua*. Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare: https://www.cornare.gov.co/laboratorio/I-MA-01_Recoleccion_Muestras_de_Agua_V.05.pdf
- Corpocesar. (Febrero de 2019). *Plan de Gestión Ambiental Regional de Cesar 2019-2040*. Corporación Autónoma Regional de Cesar: <https://www.corpocesar.gov.co/files/MAPA%2014.%20IMAGEN%20OBJETIVO%20PGAR.pdf>
- Cortolima. (2009). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Mayor del Río Lagunilla, Tolima*. Corporación Autónoma Regional del Tolima: https://cortolima.gov.co/images/POMCA/POMCA_rio_lagunilla/FASE2/SUBSISTEMA_FISICBIOTICO/1.7_CALIDAD_DE_AGUAS.pdf
- DANE. (s.f). *Ficha técnica*. <https://doi.org/https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Odisuelto.pdf>
- DANE. (s.f). *Ficha Técnica*. Departamento Nacional de Estadística: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/pH.pdf>
- Daza-Castro, E. A., Nier-Contreras, L. M., & Pérez-Royero, J. M. (13 de Septiembre de 2022). *Diseño de un sistema de depuración con algas verdes como alternativa de tratamiento de aguas residuales en el Río Chiriamo*. Universidad Popular del Cesar: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/2324/1877>

- DNP. (Mayo de 2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. Departamento Nacional de Planeación: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plan-nacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf>
- Herawati, T., Rahman, R. F., Ihsan, Y. N., & Wirawan Arief, M. C. (2022). Water Quality Suitability of Padjadjaran Retention Basin (Indonesia) for Aquaculture in Sustainable Floating Pond. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 19(4), 41-56. <https://doi.org/10.9734/AJFAR/2022/v19i430484>
- Hincapié-Pérez, M. M., & Chaverra-Cardona, G. M. (2015). *Diagnóstico de aguas*. Sello Editorial Universidad de Medellín.
- Hunter, L. (2022). Identification and an Tion and Analysis of the Contribution of Various Sources of Total Dissolved Solids (TDS) in Lake Elsinore Potable Water and Wastewater. *California State University, San Bernardino*. <https://doi.org/https://scholarworks.lib.csusb.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2563&context=etd>
- IDB. (Junio de 2022). *Resumen de la Revisión Ambiental y Social (RRAS o ESRS)*. Banco Interamericano de Desarrollo: <https://idbinvest.org/sites/default/files/2022-08/La%20Mata%20-%20Resumen%20de%20la%20Revisi%C3%B3n%20Ambiental%20y%20Social%20%28RRAS%29.pdf>
- IDEAM. (Febrero de 10 de 2002) (a)(b). *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: https://corponor.gov.co/corponor/sigescor2010/TRAMITESYSERVICIOS/Guia_monitoreo_IDEAM.pdf
- IDEAM. (21 de Octubre de 2020). *Instructivo de Determinación de Dureza EDTA Método Titrimétrico SM 2340C*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/mapa-de-procesos/m-s-lc-i031_instructivo_determinacion_de_dureza_v4.pdf

- IDEAM. (21 de Octubre de 2020). *Instructivo de ensayo. Determinación de alcalinidad en agua método 2320-B*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: https://ideam.gov.co/sites/default/files/mapa-de-procesos/m-s-lc-i029_instructivo_de_ensayo_determinacion_de_alcalinidad_en_agua_metodo_2320-b_v4.pdf
- IDEAM. (21 de Octubre de 2020). *Instructivo de ensayo: Determinación de coliformes totales en agua por el método de filtración por membrana en agar endo 9222B*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/mapa-de-procesos/m-s-lc-i060_instructivo_de_ensayo_determinacion_de_coliformes_totales_en_agua_por_el_metodo_de_filtracion_por_membrana_en_agar_endo_9222b_v3.pdf#:~:text=Coliformes%20Totales:%20Son%20un%20grupo
- IDEAM. (Mayo de 2024). *Boletín Climatológico*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <https://www.ideam.gov.co/tiempo-y-clima>
- Koul, B., Yadav, D., Singh, S., Kumar, M., & Song, M. (2022) (a)(b)(c)(d). Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review. *Water*, 14, 1-29. <https://doi.org/10.3390/w14213542>
- Kumar, A., Bojjagani, S., Maurya, A., & Chandra-Kisku, G. (2022). Spatial distribution of physicochemical-bacteriological parametric quality and water quality index of Gomti River, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(159). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09814-y>
- Londoño-Vélez, S. (7 de Diciembre de 2023). *Guía de diseño conceptual y operación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas en pequeñas comunidades para profesionales*. Universidad de Antioquia: https://www.cornare.gov.co/documentos/Guia_PTAR.pdf
- Macedo, H. E., Lehner, B., Nicell, J., Grill, G., Li, J., Limtong, A., & Shakya, R. (2022). Distribution and characteristics of wastewater treatment plants within the global river network. *Earth System Science Data*, 14(2), 559–577. <https://doi.org/10.5194/essd-14-559-2022>

- MADS. (26 de Mayo de 2015). *Decreto 1076 de 2015*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>
- MADS. (7 de Marzo de 2015). *Resolución 063 de 2015*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>
- MADS. (23 de Noviembre de 2021). *Resolución 1256 de 2021*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>
- Mamani-Supo, M. M., & Ccorimanya-Mayta, S. L. (2021). *Eficiencia de la PTAR Huaytire II mediante el SYSTEM O)) en la comunidad de Huaytire, provincia de Candarave, Tacna - 2021*. Universidad Continental: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12573/2/IV_FIN_1_07_TE_Mamani_Ccorimanya_2021.pdf
- Marimon-Angulo, M., & Rodríguez-Díaz, Y. J. (2024). Influencia de las PTAR de la ciudad de Valledupar y el municipio de La Paz en la incorporación de los contaminantes emergentes Gemfibrozilo y Progesterona en el río Cesar. *Estudios y Perspectivas Revista Científica Multidisciplinar*, 4(3), 151-169. <https://doi.org/10.61384/r.c.a.v4i3>
- MINAM. (31 de Julio de 2008). *Decreto Supremo N° 002-2008*. Ministerio del Ambiente - República del Perú: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/398455/Decreto_Supremo_N_002-2008-MINAM20191021-22801-1fg5uj1.pdf
- MINAM. (17 de Marzo de 2010). *Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM*. Ministerio del Ambiente: https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_003-2010-minam.pdf
- Ministerio de Asuntos Forestales y Hídricos. (30 de Noviembre de 2012). *Regulation on the management of surface water quality*. <https://www.ecolex.org/es/details/legislation/regulation-on-the-management-of-surface-water-quality-lex-faoc121347/?>

- MinVivienda. (8 de Junio de 2017). *Resolución 0330 de 2017*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio: <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>
- Mishra, A. P., Khali, H., Singh, S., Pande, C. B., Singh, R., & Chaurasia, S. K. (2021). International Journal of Environmental Analytical Chemistry. *An Assessment of In-situ Water Quality Parameters and its variation with Landsat 8 Level 1 Surface Reflectance datasets*, 1-24. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1954175>
- Mishra, A., Kumar-Dube, M., Singh-Lodhi, H., & Sardar-Khan, A. (2025). Studies on behavior and morphological changes in freshwater fish, *Channa punctatus*, under the exposure of untreated sewage water. *The Scientific Temper*, 16(14), 4102-4109. <https://doi.org/10.58414/SCIENTIFICTEMPER.2025.16.4.13>
- MMA. (27 de Noviembre de 2023). *Ley 21623*. Ministerio del Medio Ambiente: <https://bcn.cl/3qhb6>
- Owhonka, A., Fubara, E. F., & Justice, O. B. (2021). Wastewater Quality- It's Impact on the Environment and Human Physiology: A Review. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 9(4), 43-58. <https://doi.org/10.51976/ijari.942107>
- Pacori-Pacori, J. (7 de Marzo de 2024). *Evaluación de la Eficiencia y Alternativa de Solución de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en Lampa*. Universidad Nacional del Altiplano: https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/21932/Pacori_Pacori_Jose.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Puerto-Bohorquez, L. P. (15 de Diciembre de 2023). *Assessing Wastewater Treatment in Yopal Colombia Using GIS*. <https://doi.org/https://repository.usfca.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3019&context=capstone>
- Pushpalatha, N., Sreeja, V., Karthik, V., & Saravanan, G. (2022). Total Dissolved Solids and Their Removal Techniques. *International Journal of Environmental Sustainability and Protection*, 2(1), 13-30. <https://doi.org/10.35745/ijesp2022v02.02.0002>

- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro Índices de Contaminación para Caracterización de Aguas Continentales. Formulaciones y Aplicación. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135-153. <https://doi.org/http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n3/v1n3a09.pdf>
- Ramírez, Restrepo, R., & Cardeñosa, M. (1999). Índices de Contaminación para Caracterización de Aguas Continentales y Vertimientos. Formulaciones. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(5), 89-99. <https://doi.org/http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n5/v1n5a08.pdf>
- Santiago-Pérez, C. (23 de Junio de 2020). *Eliminación de sólidos en suspensión en corrientes de aguas residuales industriales*. Universidad Politécnica de Cartagena: <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/7a37d107-e5c1-41d7-a8b0-7f8ef27d91e3/content>
- Superservicios. (2022). *Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado Vigencia 2021*. Superintendencia de Servicios Públicos Domicilios: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-sectorial-SSPD-2021.pdf>
- Superservicios. (31 de Diciembre de 2023) (a)(b). *Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado Vigencia 2022*. Superintendencia de Servicios Públicos Domicilios: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-sectorial-de-acueducto-y-alcantarillado-2022.pdf>
- Tariq, A., & Mushtaq, A. (2023). Untreated Wastewater Reasons and Causes: A Review of Most Affected. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 23(1), 121-143. <https://doi.org/https://www.iscientific.org/wp-content/uploads/2023/05/15-IJCBS-23-23-22.pdf>
- Whitney, M. M., & Vlahos, P. (2021). Reducing Hypoxia in an Urban Estuary Despite Climate Warming. *Environmental Science & Technology*, 55(2), 941–951. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03964>

- Widyarani, Rahayuning-Wulan, D., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Tina-Rosmalina, R., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(22), 32397–32414. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19057-6>
- Zagklis, D. P., & Bampos, G. (2022). Tertiary Wastewater Treatment Technologies: A Review of Technical, Economic, and Life Cycle Aspects. *Processes*, *10*(11). <https://doi.org/10.3390/pr10112304>

14. ANEXOS

ANEXO 1. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Anexo 1.1. Visita técnica y entrevista con el operador.



Anexo 1.2. Unidades de tratamiento de la PTAR La Mata.





Anexo 1.3. Recolección de muestras.



Anexo 1.4. Determinación de parámetros in situ.



Anexo 1.5. Determinación de parámetros en laboratorio institucional.

