

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El acceso a agua potable de calidad constituye un pilar indispensable para la salud pública y el desarrollo sostenible de cualquier comunidad. La Planta Potabilizadora Alto SENAC, ubicada en Tarija, fue diseñada para garantizar el suministro de agua potable al barrio Alto SENAC a partir de la captación del Rincón de la Victoria, está diseñada para operar con un caudal de 25 L/s y una turbiedad de 20 NTU. Durante su fase de puesta en marcha, este proyecto de grado evaluó de manera integral su funcionamiento real, con el propósito de verificar que el agua tratada cumple los parámetros establecidos en la Norma Boliviana NB 512. Para ello, se inspeccionó la infraestructura, los equipos y se describieron las cuatro unidades de proceso: pretratamiento (rejillas y colador), coagulación química (sulfato de aluminio e hidróxido de calcio), filtración rápida (batería de nueve filtros rápidos) y desinfección con gas cloro, antes de almacenar el agua en un tanque de 400 m³.

La caracterización de la calidad del agua combinó mediciones “in situ” y análisis de laboratorio de los parámetros de control mínimo como el pH, conductividad, turbiedad, cloro libre residual y coliformes termotolerantes para verificar que todos los valores se mantuvieran dentro de los límites normativos. Al mismo tiempo, se determinaron los parámetros operacionales clave mediante metodologías de campo: eficiencia de remoción de turbiedad en cada etapa, tiempo de retención hidráulico a través de pruebas de trazadores químicos y tasa de filtración en escenarios de caudales variables. Para el retrolavado de los filtros, se determinó el caudal requerido mediante aforos volumétricos, y se calibró el vertedero triangular de 90° para validar la medición automática del caudal que envía el sensor de nivel al tablero HMI.

En Bolivia carecemos de una norma específica para evaluar el funcionamiento de plantas potabilizadoras, este trabajo adaptó criterios internacionales, así mismo una metodología replicable que integra inspección, muestreo, pruebas de campo y calibraciones. Los resultados obtenidos confirman que la Planta Alto SENAC produce agua apta para consumo humano según la NB 512 y, al identificar áreas de mejora operativa, permiten actualizar el Manual de Operaciones y Mantenimiento con recomendaciones técnicas basadas en datos reales, constituyéndose en un modelo de referencia para futuras evaluaciones y optimizaciones de sistemas de tratamiento de agua potable en el país.

1.2. PROBLEMA

1.2.1. Planteamiento del problema

El acceso a agua potable segura es un derecho fundamental y un componente esencial para la salud pública, el bienestar y el desarrollo sostenible. Sin embargo, en muchas regiones de Bolivia persisten comunidades que no cuentan con sistemas adecuados de tratamiento de agua, limitando significativamente su acceso a este recurso vital. En el barrio Alto SENAC de la ciudad de Tarija, esta situación fue una realidad durante muchos años, la zona no contaba con una planta de tratamiento de agua potable el único proceso aplicado al agua era la desinfección. Esto implicaba que el agua distribuida no era sometida a un tratamiento completo, por lo que no siempre cumplía con los requisitos de calidad establecidos de la Norma Boliviana NB 512 principalmente en épocas de lluvia. Además, la posibilidad de abastecer a este barrio desde la Planta Potabilizadora de La Tabladita era inviable por razones topográficas, técnicas, logísticas y por limitaciones en la cobertura de distribución. Ante esta situación, surgió la necesidad de construir una planta potabilizadora propia en Alto SENAC.

La etapa de puesta en marcha de esta planta representa un momento crítico, ya que en ella se definen las condiciones reales de operación, la eficiencia de los procesos unitarios y la calidad del agua tratada. La evaluación técnica integral permite verificar si los procesos de pretratamiento, coagulación, filtración rápida y desinfección funcionan de acuerdo con lo previsto en el diseño, y si el agua obtenida cumple con los parámetros de control mínimo establecidos en la Norma Boliviana NB 512. La falta de esta evaluación representa un vacío técnico que impide determinar si la planta puede garantizar de forma sostenida el suministro de agua potable segura a la población beneficiaria.

Por tanto, surge la necesidad de realizar una evaluación técnica y operativa del funcionamiento de la planta Alto SENAC durante su etapa de puesta en marcha, que permita verificar su desempeño, medir la calidad del agua tratada, identificar posibles deficiencias y proponer ajustes que aseguren su adecuada operación conforme a la normativa vigente.

1.2.2. Formulación del problema

En Tarija, el acelerado crecimiento urbano y la insuficiencia de infraestructuras para la potabilización han impactado negativamente la calidad del agua disponible, incrementando el riesgo de enfermedades vinculadas al consumo de agua no segura. La planta potabilizadora de Alto SENAC representa una oportunidad esencial para satisfacer la demanda de agua potable en la región y para garantizar que el agua tratada sea segura para el consumo humano. La puesta en marcha de esta planta, alineada con dichos estándares, es crucial para asegurar un abastecimiento adecuado de agua de calidad en el barrio.

¿Cómo evaluar el funcionamiento de la planta potabilizadora de agua de Alto SENAC de la ciudad de Tarija durante su etapa de puesta en marcha, para verificar el cumplimiento de los parámetros de calidad establecidos en la normativa NB 512 y determinar su capacidad para garantizar el suministro de agua potable?

1.2.3. Sistematización del problema

¿Cuál es la calidad del agua tratada por la Planta Potabilizadora Alto SENAC durante su fase de puesta en marcha, en comparación con los límites establecidos por la Norma Boliviana NB 512?

¿Cuál es la eficiencia de remoción de turbiedad y coliformes termotolerantes de la Planta Potabilizadora Alto SENAC?

¿Cómo se comportan los parámetros hidráulicos y operacionales (Tiempo de Retención Hidráulica, tasas de filtración, dosificación de químicos y calibración del vertedero de entrada) en la Planta Potabilizadora Alto SENAC durante su fase de puesta en marcha?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el funcionamiento de la planta potabilizadora de agua de Alto SENAC de la ciudad de Tarija durante la etapa de puesta en marcha, para verificar el cumplimiento de la calidad de acuerdo con la normativa vigente.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar la situación actual de la planta potabilizadora de agua de Alto SENAC.
- Describir los procesos unitarios de la planta potabilizadora de alto SENAC de la ciudad de Tarija.
- Caracterizar la calidad del agua y verificar si cumple los parámetros requeridos en la norma NB 512.
- Definir parámetros de operación que describan el funcionamiento de la planta como ser: Eficiencia, tiempo de retención hidráulica y tasa de filtración.
- Actualizar el Manual de operaciones y mantenimiento existente

1.4. JUSTIFICACIÓN

El acceso al agua potable de calidad constituye un derecho humano esencial y una condición indispensable para la salud pública y el desarrollo. A pesar de los esfuerzos en la cobertura y calidad del suministro, persisten desafíos en zonas urbanas en expansión como la ciudad de Tarija. La implementación de la Planta Potabilizadora de Alto SENAC representó una solución técnica ante la precaria disponibilidad de servicio y las limitaciones topográficas para la conexión a infraestructuras existentes. No obstante, la puesta en operación de esta planta requiere un proceso técnico de evaluación que asegure su eficacia y confiabilidad. La presente tesis se justifica, por tanto, desde las siguientes perspectivas:

1.4.1. Justificación teórica

El presente estudio contribuye al cuerpo de conocimiento existente en ingeniería sanitaria al aplicar y verificar los principios teóricos de evaluación del desempeño de plantas de tratamiento de agua potable en un contexto real de puesta en marcha. La evaluación de una planta de filtración rápida en sus etapas iniciales de operación permite contrastar la teoría con la práctica, identificando desviaciones, particularidades y desafíos operativos que enriquecen la comprensión de los fenómenos hidráulicos, físicos y químicos en condiciones de campo. Esta aproximación es fundamental para identificar las desviaciones entre el desempeño teórico esperado y la realidad operativa inicial, lo cual enriquece la comprensión de los fenómenos hidráulicos, físicos y químicos bajo condiciones de

operación. Desde el punto de vista académico, esta tesis fortalece el conocimiento técnico sobre la evaluación de sistemas de tratamiento de agua potable, contribuyendo a la disciplina.

1.4.2. Justificación metodológica

Desde una perspectiva metodológica, la aplicación sistemática de un conjunto de herramientas de evaluación de campo y laboratorio. Metodológicamente, esta investigación aporta al aplicar un proceso técnico de verificación integral del funcionamiento de la Planta Potabilizadora Alto SENAC durante su etapa de puesta en marcha. Para ello, se combinaron estrategias como la caracterización in situ y en laboratorio de los parámetros de control mínimo, la ejecución de pruebas de jarras para determinar dosis óptimas de coagulantes y alcalinizantes, la calibración del vertedero para validar caudales reales y la elaboración de manuales y registros operativos. Esta integración metodológica no solo permite ajustar parámetros de diseño a la realidad local, sino que también genera herramientas prácticas para la operación, control y mantenimiento. Este enfoque metodológico puede servir como un modelo estandarizado para futuras evaluaciones en condiciones similares.

1.4.3. Justificación práctica

En términos prácticos, la tesis responde a la necesidad inmediata de garantizar agua potable de calidad a los usuarios del barrio Alto SENAC, quienes durante años enfrentaron limitaciones debido a la falta de conexión a la Planta de Tabladita y a la inexistencia de otros procesos de tratamiento más allá de la desinfección. Los resultados obtenidos proporcionan a la Entidad Prestadora de Servicios de Agua Potable (COSAALT R.L.) una línea base de información crucial sobre el funcionamiento hidráulico y sanitario de la planta en su etapa inicial. Esta información es invaluable para la identificación precisa de áreas de mejora. La información generada es una herramienta práctica para la toma de decisiones operativas y estratégicas, contribuyendo a la eficiencia, sostenibilidad y fiabilidad del servicio de abastecimiento de agua potable para la comunidad de Alto SENAC. En un sentido más amplio, el presente trabajo no solo responde a una necesidad local inmediata, sino que también aporta resultados replicables en otros contextos,

promoviendo el desarrollo de soluciones sostenibles y técnicamente fundamentadas frente al desafío de garantizar el acceso universal al agua segura.

1.5. ALCANCE DEL ESTUDIO

- La investigación se centrará en medir y analizar los parámetros de control mínimo establecidos por la Norma Boliviana NB 512, debido al diseño propio de la planta y por la fuente de agua de buena calidad (Rincón de la Victoria), para determinar si el agua producida por la planta es apta para el consumo humano.
- Informes de visitas técnicas para la evaluación de los procesos unitarios de la planta potabilizadora de Alto SENAC.
- Calibración de la estructura hidráulica de control del caudal de ingreso a la Planta
- Determinación de la eficiencia de los componentes valorando los parámetros de turbidez y coliformes termotolerantes.
- Estimación del tiempo de retención hidráulica en las unidades de tratamiento de la planta potabilizadora Alto SENAC de la ciudad de Tarija.

CAPÍTULO 2

MARCO DE REFERENCIA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Principios de la Evaluación del Desempeño de Plantas de Tratamiento de Agua Potable

La evaluación del desempeño de una planta de tratamiento de agua es un proceso integral que requiere el análisis cuantitativo de cada proceso unitario, la calidad del agua en todas las etapas de tratamiento y la eficiencia general del sistema. Este enfoque sistemático va más allá de simples observaciones, proporcionando una base técnica para optimizar operaciones y garantizar el cumplimiento de los estándares (Montgomery, 2012 pág. 1360).

Los objetivos fundamentales que justifican la realización de una evaluación de desempeño, de acuerdo con los criterios establecidos en la ingeniería sanitaria, comprenden:

- **Verificación del cumplimiento normativo:** Asegurar que el agua tratada cumple consistentemente con los límites microbiológicos, físicos y químicos establecidos por las normativas de agua potable vigentes (AWWA, 2019 pág. 87).
- **Optimización de la operación:** Proponer ajustes en parámetros clave (dosificación de químicos, gestión de filtros, tasas de flujo, ciclos de retrolavado) para mejorar la eficiencia en remoción de contaminantes, reducir costos operativos y optimizar recursos (Kawamura, 2000 pág. 90).
- **Diagnóstico de problemas y resolución de fallas:** Analizar causas de problemas recurrentes en calidad del agua u operatividad, y analizar soluciones técnicas efectivas. (Qasim, et al. 2000 pág. 635)
- **Planificación estratégica y toma de decisiones:** Proporcionar información para expansiones, rehabilitaciones, modernizaciones tecnológicas o capacitación de personal (Montgomery, 2012 pág. 1390).

2.1.2. Indicadores de Eficiencia de Procesos Unitarios

La evaluación del desempeño de una planta de tratamiento se cuantifica mediante indicadores de eficiencia que miden la capacidad de cada proceso o del sistema global para remover contaminantes (Montgomery, 2012 pág. 1375).

- **Eficiencia de Remoción**

La eficiencia de remoción constituye una medida cuantitativa fundamental del rendimiento de un proceso de tratamiento de agua. Representa la proporción del contaminante que es eliminado, transformado o inactivado durante su paso a través de una unidad de tratamiento o del sistema completo de potabilización. (Qasim et al. 2000, pág. 128).

La ecuación general para su determinación es la Ec. 1.

$$\text{Eficiencia}(\%) = \left(\frac{C_{\text{entrada}} - C_{\text{salida}}}{C_{\text{entrada}}} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

E es la eficiencia de remoción (%).

C_{entrada} = Concentración del contaminante en el afluente.

C_{salida} = Concentración del contaminante en el efluente.

2.1.3. Evaluación de Parámetros Hidráulicos y Operacionales en Plantas de Agua Potable

El análisis de parámetros hidráulicos y operacionales es fundamental para evaluar el comportamiento del flujo en unidades de tratamiento de agua potable y su impacto en la eficiencia de procesos (Montgomery, 2012 pág. 842).

2.1.3.1. Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), también conocido como tiempo de residencia hidráulico, es un parámetro fundamental en el diseño y la evaluación de reactores y unidades de tratamiento de agua. Teóricamente, el TRH se define como el tiempo promedio que una masa de fluido (en este caso, agua) permanece dentro de un volumen de reactor o unidad de tratamiento bajo condiciones de flujo continuo y estado estacionario. (Qasim et al. 2000, pág. 215)

2.1.3.2. Tasa de Filtración

Según Montgomery (2012) en su obra *Water Treatment Principles and Design*, la tasa de filtración es un parámetro operacional fundamental para evaluar el desempeño de los filtros granulares en plantas de tratamiento de agua potable. Se define como el caudal de agua que pasa a través de una unidad de filtro por unidad de área superficial del medio filtrante (pá. 925).

La expresión matemática para determinar la tasa de filtración es la Ec. 2.

$$\text{Tasa de filtración} = \frac{Q_{\text{filtro}}}{A_{\text{filtro}}} \quad (2)$$

Donde:

Tasa de filtración: se expresa en $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Q_{filtro} : representa el caudal de agua que atraviesa un filtro individual (m^3/h)

A_{filtro} : es el área superficial del medio filtrante (m^2)

2.1.3.3. Calibración de Dispositivos de Medición de Caudal

La medición precisa del caudal de agua es fundamental para el control operacional, la dosificación de químicos y la elaboración de balances hídricos en una planta de tratamiento. Los vertederos son estructuras hidráulicas utilizadas para medir el caudal en canales abiertos, basándose en la relación entre la altura de la lámina de agua sobre el umbral del vertedero (carga, H) y el caudal (Q) que pasa sobre él. (Montgomery, 2012 pág. 1124)

Ecuación Teórica para Vertederos Triangulares

Para un vertedero triangular, la relación entre el caudal (Q) y la carga (H) se expresa con la Ec 3.

$$Q = C_d \times \frac{8}{15} \times \sqrt{2g} \times \left(\frac{\theta}{2}\right) \times h^{5/2} \quad (3)$$

En la práctica, la ecuación se simplifica a una forma potencial expresada en la Ec. 4.

$$Q = C \times h^{5/2} \quad (4)$$

Donde

Q: Caudal (m^3/s).

h: Carga sobre la cresta del vertedero (m).

C: Coeficiente de gasto.

2.1.3.4. Monitoreo Continuo y Control Operacional

El monitoreo continuo de los parámetros de calidad del agua y operacionales es fundamental para la evaluación efectiva del desempeño de la planta y el control de procesos. Las plantas modernas de tratamiento de agua dependen de sistemas de adquisición de datos en tiempo real, esta recolección sistemática de datos permite a los operadores identificar tendencias de desempeño, detectar desviaciones de los valores base establecidos e implementar acciones correctivas oportunas para mantener tanto los estándares de calidad del agua como la eficiencia del proceso. (Montgomery, 2012, p. 1452).

2.2. MARCO CONCEPTUAL

- **Análisis:** Distinción y separación de las partes de algo en específico para conocer su composición, estudio detallado de algo, especialmente de una obra o de un escrito. (NB 495 2005, pág.7)
- **Agua para consumo humano:** Compuesta molecularmente por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). Agua que cumple con los requisitos de la norma NB 512. También se denomina agua potable. (NB 495 2005, pág.7)
- **Bitácora de campo:** Conjunto de registros detallados de solicitudes, permisos, órdenes y toda especificación que tiene carácter oficial y legal en el proceso de muestreo que estará en poder del operador del servicio y accesible a la autoridad competente. (NB 495 2005, pág.8)
- **Características organolépticas:** Aquellas que se detectan sensorialmente (sabor, color y olor) y que influyen en la aceptabilidad del agua. (NB 495 2005, pág.8)
- **Coagulante:** Sustancia insolubles en el agua, que neutraliza las cargas eléctricas de los coloides y permite la formación de partículas mayores, que pueden ser eliminadas por sedimentación. (NB 495 2005, pág.9)
- **Colimetría** Método que permite investigar la presencia y densidad del grupo coliforme, incluyendo Escherichia coli. (NB 495 2005, pág.9)

- **Laboratorio acreditado:** Centro o lugar donde se realizan los análisis fisicoquímicos y microbiológicos, con procedimientos normalizados aceptados y que se encuentra reconocido mediante certificación de “Buenas Prácticas de Laboratorio”. (NB 495 2005, pág.11)
- **Muestreo** Acción que consiste en tomar muestras con el objeto de analizar sus propiedades y características. (NB 495 2005, pág.11)
- **Parámetro:** Nombre del elemento o compuesto a medirse mediante un procedimiento analítico de laboratorio. (NB 495 2005, pág. 12)
- **Punto de muestreo:** Lugar físico de donde se extrae una muestra representativa para su posterior análisis físico químico, microbiológico y/o radiológico. (NB 495 2005, pág. 12)
- **Sistema de agua potable:** Conjunto de estructuras, equipos, accesorios e instalaciones que tienen por objeto transformar la calidad del agua y transportarla desde la fuente de abastecimiento hasta los puntos de consumo. (NB 495 2005, pág. 13)
- **Valor máximo aceptable (VMA):** Aquel valor establecido para los diferentes parámetros, el cual no debe ser excedido para no incidir en la salud humana. (NB 495 2005, pag.14)

2.2.1. Parámetros de control de calidad del agua para consumo humano

En atención a la Norma Boliviana NB 512, No debe exceder los parámetros de control de calidad del agua para consumo humano que deben realizar las EPSA, se agrupan de acuerdo con su factibilidad técnica y económica en los siguientes grupos: Control Mínimo, Control Básico, Control Complementario y Control Especial.

- **Parámetros físicos:** Los parámetros físicos, denominados organolépticos, evalúan características perceptibles por los sentidos humanos: color, olor y sabor. Su control es esencial para garantizar la aceptabilidad del agua por los consumidores (Moreno, 2011 pág. 28).
- **Parámetros químicos:** La mayoría de las sustancias químicas presentes en el agua son potencialmente peligrosas para la salud después de una exposición prolongada, especialmente aquellos que tienen propiedades tóxicas acumulativas. Los

parámetros químicos de mayor interés son aquellos que pueden afectar la salud del consumidor o generar consecuencias de tipo económica. (Moreno, 2011 pág. 33).

- **Parámetros microbiológicos:** Estos parámetros son los más importantes para determinar la potabilidad del agua, entre los cuales se tienen los Coliformes fecales, huevos de helmintos, *Escherichia coli*, *Vibrio*, *Cholerae*, entre otros. Las normas se basan, esencialmente, en la necesidad de asegurar la ausencia de bacterias indicadoras de contaminación de desechos humanos, es decir, ausencia de Coliformes fecales (Jiménez, 2001 pág. 117).

Los parámetros de Control Mínimo de la calidad del agua para consumo humano que deben realizar en la EPSA se presentan en la Tabla 1, debido a que la fuente de agua es de buena calidad proveniente del río La Vitoria.

Tabla 1 Parámetros de control mínimo.

Nº	Parámetro	Valor máximo aceptable	Observaciones
1	pH ⁽¹⁾	6,5 a 9,0	Un valor de 9,5 de pH es aceptado sólo para aguas que provienen de sistemas de potabilización y siempre y cuando se cumpla con el rango del Índice Langelier. El laboratorio deberá registrar y reportar el valor de la temperatura a la cual se realizó la medición de pH.
2	Conductividad	1500,0 µS/cm ⁽²⁾	El laboratorio deberá registrar y reportar el valor de la temperatura a la cual se realizó la medición de conductividad.
3	Turbiedad	5 UNT	UNT = unidades nefelométricas de turbiedad
4	Cloro libre residual ⁽³⁾⁽⁵⁾	0,2 mg/L a 1,5 mg/L	Medido en el punto de muestreo.
5	Coliformes termotolerantes ⁽⁴⁾	<1 UFC/100 mL	Valor máximo aceptable aplicando la técnica de membrana filtrante.
		<2 NMP/100 mL	Valor máximo aceptable aplicando la técnica de tubos múltiples.
6	<i>Escherichia coli</i> ⁽⁴⁾	<1 UFC/100 mL	Valor máximo aceptable aplicando la técnica de membrana filtrante.
		<2 NMP/100 mL	Valor máximo aceptable aplicando la técnica de tubos múltiples.

Fuente: Norma Boliviana NB 512, 2018.

Notas:

- (1) Aunque el pH no suele afectar directamente a los consumidores, es uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua.
- (2) Valores superiores pueden influir en la apariencia, el sabor, el olor o perjudicar otros usos del agua (véanse guías OPS/OMS).
- (3) Para situaciones de emergencias y desastres el valor mínimo se ajustará a 0,5 mg/L en el punto terminal de la red de distribución.
- (4) Para el cumplimiento del Control Mínimo, es suficiente realizar uno de estos dos ensayos, ya que ambos identifican la presencia de bacterias.
- (5) El uso de cualquier desinfectante diferente a un generador de cloro activo debe ser autorizado por el ente normador (VAPSB) en base a estudios técnicos realizados en entidades de investigación. Asimismo, deberá establecerse la concentración mínima, la concentración máxima, la tolerancia, los controles y el método de determinación de un desinfectante activo residual en la red, así como la toma de muestreo.

- **pH:** Potencial de Hidrógeno, Cologaritmo de la concentración de iones hidrogeno en solución. Indica el carácter ácido ($\text{pH} < 7$), neutro ($\text{pH} = 7$) o básico ($\text{pH} > 7$) de la solución. El pH influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. (NB 495 2005, pág. 15)
- **Conductividad:** Es una medida de la habilidad que tiene una solución para conducir la corriente eléctrica. La unidad de medición es el $\mu\text{Siemens}/\text{centímetro}$. (NB 495 2005, pág. 9)
- **Turbiedad:** La turbiedad es originada por las partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida, etcétera). Propiedad óptica de una muestra de agua, que hace que los rayos luminosos se dispersen y absorban, en lugar de transmitir en línea recta. (NB 495 2005, pág.14)
- **Cloro residual:** Cantidad de cloro libre, no combinado, presente en el agua potable; se expresa en miligramos por litro (mg/l). (NB 495 2005, pág.9)
- **Coliformes Termorresistentes:** Grupo de bacterias que fermenta la lactosa a 44°C – 45°C , comprendiendo el género *Escherichia* y en menor grado especies de *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*. Los termorresistentes distintos de *E. coli* pueden proceder de aguas orgánicamente enriquecidas (efluentes industriales, materiales vegetales y suelos en descomposición). (NB 495 2005, pág.9)
- **Muestreo de agua potable**

El muestreo de agua para consumo humano es un proceso estandarizado que implica recolectar porciones representativas siguiendo protocolos rigurosos para garantizar la

precisión analítica. Este procedimiento incluye la selección estratégica de puntos en la red de distribución, el uso de recipientes esterilizados específicos para cada tipo de análisis (microbiológico, fisicoquímico o radiológico), técnicas asépticas durante la recolección, preservación inmediata mediante refrigeración a 4°C o aditivos químicos, y registro detallado de parámetros in situ como temperatura y cloro residual. (Organización Mundial de la Salud OMS, 2017 pág. 103).

- **Muestreo puntual**

El muestreo puntual consiste en la captura única e instantánea de una muestra de agua en un momento y lugar específicos, reflejando exclusivamente las condiciones del punto de recolección en ese instante. Esta técnica se emplea prioritariamente para analizar parámetros inestables que requieren medición inmediata (como pH, cloro libre o gases disueltos), investigar eventos de contaminación aguda (derrames químicos o microbiológicos), o validar procesos críticos en plantas de tratamiento. (Organización Mundial de la Salud OMS, 2017 pág. 104).

2.2.2. Plantas de tratamiento de agua o plantas potabilizadoras

Conjunto de unidades convenientemente dispuestas y en sucesión adecuada que tienen la finalidad de transformar el agua cruda en agua de calidad garantizada y apta para el consumo humano, a través de procesos y operaciones unitarias. Comprende también el conjunto de obras de infraestructura civil, instalaciones y equipos. La Calidad garantizada y apta para el consumo humano significa que desde el punto de vista organoléptico sea agradable a los sentidos, químicamente no incluya sustancias tóxicas y bacteriológicamente no contenga microorganismos que afectan a la salud, cumpliendo los requisitos establecidos en la Norma Boliviana NB 512 Agua Potable Requisitos. (NB 689, 2004 pág. 81)

2.2.3. Tipos de plantas de tratamiento de agua

Las plantas de tratamiento de agua se pueden clasificar, de acuerdo con el tipo de procesos que las conforman, en plantas de filtración rápida y plantas de filtración lenta. También se pueden clasificar, de acuerdo con la tecnología usada en el proyecto, en plantas

convencionales antiguas, plantas convencionales de tecnología apropiada y plantas de tecnología importada o de patente. (CEPIS, 2004 pág. 125).

2.2.3.1. Plantas de filtración rápida

Los filtros rápidos de arena, operando a tasas de diseño de 120-360 m/día (5-15 m/h), pueden producir consistentemente un efluente con turbiedad menor a 0.3 NTU cuando van precedidos por una adecuada coagulación y floculación. La eficiencia de remoción de partículas excede el 98% para partículas mayores de 10 µm bajo condiciones óptimas. (Kawamura, 2000 pág. 172).

Este sistema de tratamiento usa capas de arena o carbón mineral para atrapar impurezas del agua a alta velocidad (5-24 metros cúbicos por metro cuadrado cada hora). Funciona mejor cuando los granos del material filtrante miden entre 0,4 y 1,0 milímetros, y cuando la capa filtrante tiene un grosor de 0,6 a 1,8 metros. (Crittenden et al., 2012 pág. 554).

Tabla 2 Criterios de selección de tratamiento según la calidad del agua cruda plantas convencionales.

Tipo de planta	Alternativas	Límites de calidad de agua cruda aceptables.		
		90 % DEL TIEMPO	80 % DEL TIEMPO	ESPORADICAMENTE
FILTRACIÓN RÁPIDA (PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS)	Filtración rápida completa: coagulación + decantación + filtración rápida descendente.	$T_o \leq 1\,000$ UNT $C_o \leq 150$ UC C.T. $\leq 600/100$ ml.	$T_o \leq 800$ UNT $Co \leq 70$ UC.	$T_o \text{ Max} \leq 1\,500$ UNT Si $T_o > 1\,500$ UNT añadir presedimentador C.T. $> 600/100$ ml añadir precloración.
	Filtración directa descendente: mezcla rápida + filtración rápida descendente.	$T_o \leq 30$ UNT $C_o \leq 40$ UC Algas ≤ 100 mg/m ³ C.T. $\leq 500/100$ ml.	$T_o \leq 20$ UNT	$T_o \text{ Max} \leq 50$ UNT
	Filtración directa ascendente: mezcla rápida + filtración rápida ascendente.	$T_o \leq 100$ UNT $C_o \leq 60$ UC	$T_o \leq 50$	$T_o \text{ Max} \leq 200$ UNT $C_o \text{ Max} \leq 100$ UC
	Filtración directa ascendente - descendente: mezcla rápida más filtración ascendente + filtración descendente.	$T_o \leq 250$ UNT $C_o \leq 60$ UC	$T_o \leq 150$ UNT	$T_o \text{ Max} \leq 400$ UNT $C_o \text{ Max} \leq 100$ UC

T_o : Turbiedad del agua no tratada
UC: Unidades de color aparente
C.T.: Coliformes Termorresistentes

Fuente: Norma Boliviana NB 689 “Instalaciones de agua - Diseño para sistemas de agua potable”, 2004.

De acuerdo con el CEPIS, 2004, pág. 126 “la calidad del agua por tratar, se presentan dos soluciones dentro de este tipo de plantas: plantas de filtración rápida completa y plantas de filtración directa”.

2.2.3.2. Filtración directa

Es una alternativa a la filtración rápida, constituida por los procesos de mezcla rápida y filtración, apropiada solo para aguas claras. Son ideales para este tipo de solución las aguas provenientes de embalses o represas, que operan como grandes presedimentadores y proporcionan aguas constantemente claras y poco contaminadas. (CEPIS, 2004, pág. 125)

La filtración directa es un proceso avanzado de tratamiento de agua que prescinde de las etapas convencionales de sedimentación y floculación, diseñado específicamente para fuentes con turbiedad estable. En este sistema, el agua cruda recibe una dosificación optimizada de coagulantes (5-20 mg/L de sulfato de aluminio o 2-10 mg/L de policloruro de aluminio) seguida de una mezcla rápida (30-60 segundos), tras lo cual fluye directamente hacia filtros de medio dual estratificado: una capa superior de antracita (1,0-1,5 m de profundidad, tamaño efectivo 0,8-1,2 mm, coeficiente de uniformidad $\leq 1,4$) para retención de partículas gruesas, y una capa inferior de arena (0,3-0,5 m, tamaño efectivo 0,4-0,6 mm) para captura fina. Este arreglo permite tasas de filtración de 120-240 m³/m²/día con remociones del 85-95% de turbiedad y 70-90% de materia orgánica natural, reduciendo costos de construcción en 25-40% comparado con plantas convencionales. Sin embargo, requiere monitoreo continuo de la calidad del agua cruda y retrolavados cada 8-24 horas con aire (50-90 m³/m²/h) y agua (30-40 m³/m²/h) para prevenir colmatación (Kawamura, 2000 pág. 185).

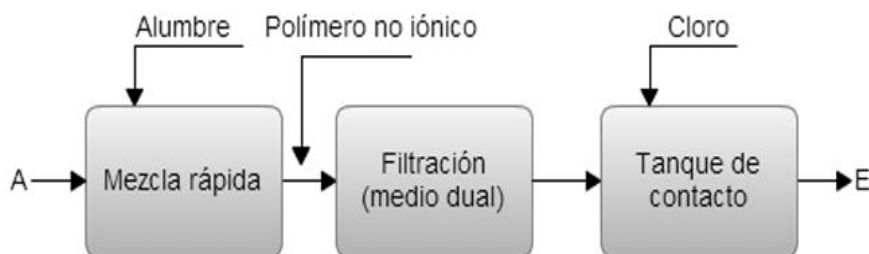


Figura 1 Diagrama de flujo de procesos en una planta de filtración directa.

Fuente: Romero, 1999.

En algunos casos también puede omitirse el proceso de floculación siempre que el contenido de turbiedad sea bajo. La Figura 2 muestra el tratamiento a través de filtración directa.

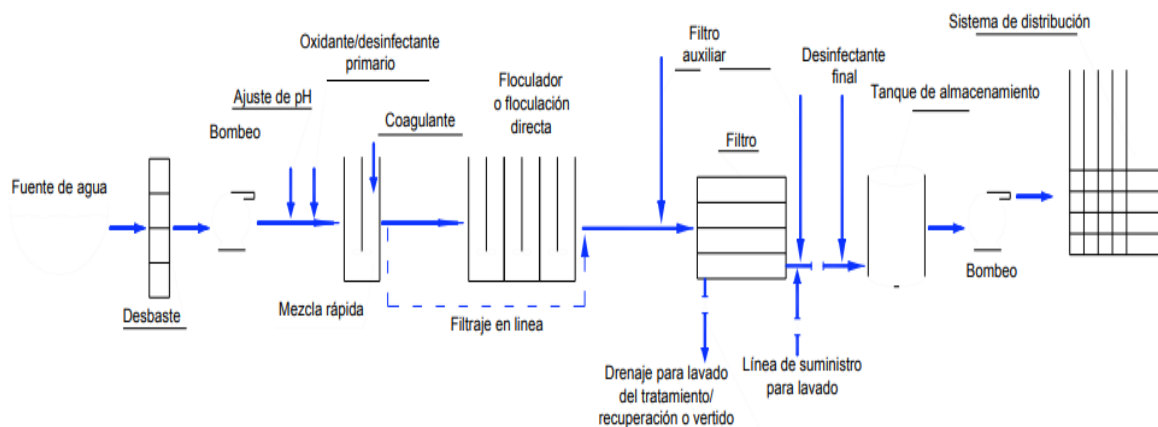


Figura 2 Filtración Directa en el tratamiento de aguas superficiales.

Fuente: Norma Boliviana NB 689 “Instalaciones de agua - Diseño para sistemas de agua potable”, 2004.

2.2.4. Procesos unitarios en plantas potabilizadoras de agua

2.2.4.1. Pretratamiento

El pretratamiento constituye la primera etapa física en plantas de potabilización, diseñada para retener sólidos gruesos (ramas, hojas, plásticos) y partículas suspendidas mediante barreras mecánicas como rejillas, tamices y desarenadores. Su objetivo es proteger equipos posteriores de daños por abrasión u obstrucciones, garantizando la eficiencia de procesos como coagulación y filtración. (Crittenden et al., 2012 pág. 187).

2.2.4.2. Coagulación

El objetivo de la Coagulación en el proceso de potabilización de agua es de anular las cargas eléctricas de las partículas en suspensión o en estado coloidal, permitiendo así que se unan entre sí formando flóculos, al dosificar coagulante, el cual es un producto químico que provoca la desestabilización y aglutinación de los sólidos en suspensión, lo que permite la remoción de la turbidez y también producen iones trivalentes de cargas eléctricas positivas, que neutralizan las cargas eléctricas de los coloides permitiendo la remoción del color, generalmente se utiliza como coagulante el Sulfato de Aluminio (Al_2O_3), por su capacidad de formar precipitados con las partículas del agua que se encuentran en suspensión, así también es de fácil adquisición y de bajo costo. Se requiere

determinar la dosis óptima de Sulfato de Aluminio ya que un exceso de este evita la remoción de la turbidez. (Barajas et al., 2015 pág. 79)

- **Mezcla rápida**

En plantas de purificación de agua el mezclador rápido tiene generalmente el propósito de dispersar rápida y uniformemente el coagulante a través de toda la masa o flujo de agua. La mezcla rápida puede efectuarse mediante turbulencia, provocada por medios hidráulicos o mecánicos, mezcladores mecánicos en línea, rejillas difusoras, chorros químicos y tanques con equipos de mezcla rápida. En los mezcladores mecánicos de la Figura 3, la mezcla es inducida a través de impulsores rotatorios del tipo de hélice o turbina. (Romero, 2000 pág.50)

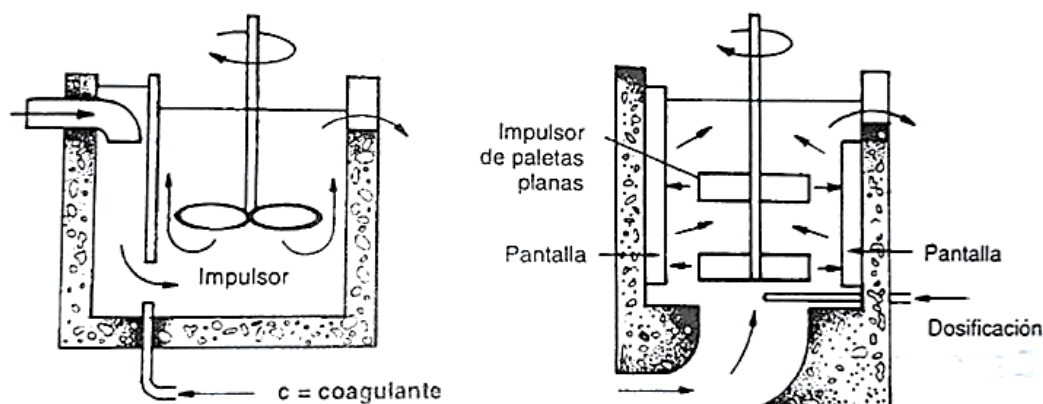


Figura 3 Mezcladores mecánicos.

Fuente: Romero Rojas, 2000.

2.2.4.3. Filtración

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad. (CEPIS, 2004 pág. 398)

La filtración es un proceso físico, químico y en algunos casos biológicos que se usa para separar del agua las impurezas suspendidas mediante el paso del líquido por un medio poroso. La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una solución acuosa que pasa a través de un medio poroso. Generalmente, la

filtración es la operación final de la etapa de clarificación del agua en una planta de potabilización. (Salazar, 2012 pág. 87-89)

- **Lavado de medios filtrantes**

Durante el proceso de filtrado, los granos del medio filtrante retienen material hasta obstruir el paso del flujo, lo que obliga a limpiarlos periódicamente. En los filtros rápidos esto se realiza invirtiendo el sentido del flujo, inyectando agua por el falso fondo, expandiendo el medio filtrante y recolectando en la parte superior el agua de lavado. (CEPIS, 2004 pág. 421)

2.2.4.4. Desinfección

La desinfección es el último proceso unitario de tratamiento del agua y tiene como objetivo garantizar la calidad desde el punto de vista microbiológico y asegurar que sea inocua para la salud del consumidor. La desinfección es un proceso selectivo: no destruye todos los organismos presentes en el agua y no siempre elimina todos los organismos patógenos, es decir no elimina los organismos patógenos sino más bien los inactiva o destruye patógenos mediante agentes químicos o físicos, garantizando agua segura para consumo. (CEPIS, 2004 pág. 469)

- **Almacenamiento de agua tratada**

El almacenamiento de agua tratada requiere depósitos diseñados para prevenir la contaminación y mantener la calidad del agua. Según Romero, la función principal de estos depósitos es garantizar la disponibilidad de agua potable en momentos de alta demanda. (Romero, 2018 pág. 245)

2.3. MARCO ESPACIAL

La planta potabilizadora de agua de Alto SENAC de la ciudad de Tarija, se encuentra ubicada en el barrio Alto SENAC, perteneciendo a la zona urbana de la provincia Cercado del departamento de Tarija.

2.3.1. Ubicación Geográfica

Tabla 3 Coordenadas geográficas

COORDENADAS DE LA PLANTA			
	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m)
Turbidímetro	21°31'46,15"S	64°46'39,88"O	2086
Coagulación	21°31'46,27"S	64°46'39,72"O	2086
Filtros	21°31'46,52"S	64°46'40,13"O	2082
Tanque	21°31'46,54"S	64°46'39,97"O	2077

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4 Ubicación de la Planta Potabilizadora Alto SENAC.

Fuente: Imagen de Google Earth, tomada en 26/01/2025.

2.4. MARCO TEMPORAL

El presente trabajo de titulación denominado "EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA ALTO SENAC DE LA CIUDAD DE TARIJA", se realizó desde enero hasta junio de 2025.

2.5. MARCO LEGAL

El presente estudio se fundamenta en el cumplimiento de la normativa nacional e internacional que regula la prestación del servicio de agua potable, la calidad del recurso hídrico y el diseño y operación de plantas de tratamiento en Bolivia. A continuación, se

describen los instrumentos jurídicos y técnicos aplicables a la evaluación del funcionamiento de la Planta Potabilizadora Alto SENAC:

- **Ley N° 2066 “Ley de Prestación y Utilización de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario” (11 de abril de 2000)**

Esta norma establece el marco legal básico para la prestación, regulación y supervisión de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario en Bolivia. Define a las Entidades Prestadoras de Servicios de Agua Potable y Saneamiento (EPSA) como responsables de garantizar el acceso y la continuidad del servicio, así como la calidad del agua distribuida. La ley otorga a la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (AAPS) la competencia de otorgar concesiones, emitir regulaciones, supervisar el cumplimiento de estándares y sancionar incumplimientos.

- **Norma Boliviana NB 512 “Agua Potable – Requisitos” (2004)**

La NB 512, publicada por el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), define los criterios mínimos de calidad que debe cumplir el agua destinada al consumo humano en Bolivia. Incluye parámetros físico-químicos, establece los valores de referencia y metodología de muestreo para garantizar que el agua cumpla con las condiciones sanitarias. Esta norma es de cumplimiento obligatorio para todas las Entidades Prestadoras de Servicios de Agua que operan plantas potabilizadoras, pues su objetivo es proteger la salud pública.

- **Norma Boliviana NB 495 “Definiciones y Terminología” (2005)**

La NB 495 proporciona un vocabulario técnico unificado para todo el sector de agua potable y saneamiento en Bolivia. Sus definiciones normalizadas incluyen términos clave como turbiedad, floculación, retrolavado, eficiencia de remoción, agua cruda y agua tratada, entre otros. Al estandarizar la terminología, esta norma garantiza que los documentos técnicos, informes y especificaciones técnicas empleen un mismo lenguaje.

- **Norma Boliviana NB 689 “Instalaciones de Agua – Diseño para Sistemas de Agua Potable” (2004)**

La NB 689 establece criterios técnicos y requisitos mínimos para el diseño hidráulico de las unidades que componen una planta de tratamiento de agua potable. Cubre aspectos de

pretratamiento (rejillas, cribas), coagulación–floculación, sedimentación opcional y, especialmente, filtración rápida con lecho simple o doble. Define los espesores de las capas filtrantes, rangos de tasas de filtración ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$) según la calidad del agua cruda, criterios de retrolavado (velocidades de lavado y tiempo recomendado) y pérdida de carga máxima admisible. Su propósito es asegurar que las instalaciones se dimensionen y operen de modo eficiente, evitando colapsos en el lecho filtrante y garantizando la durabilidad de los equipos.

- **Norma Boliviana NB 496 “Agua Potable – Toma de Muestras” (2004)**

La NB 496 describe los procedimientos normalizados para la toma, conservación, transporte y análisis de muestras de agua que se envían a laboratorio. Especifica el tipo de envase adecuado (material, capacidad, esterilidad), la preservación química (en caso necesario), los tiempos máximos entre la recolección y el análisis, y las condiciones de temperatura. El objetivo es asegurar la representatividad y confiabilidad de los resultados de laboratorio para parámetros físico-químicos y microbiológicos, de manera que las decisiones técnicas y las evaluaciones de conformidad con la NB 512 se basen en datos válidos.

- **Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Evaluación Rápida de Plantas Potabilizadoras (Comisión Nacional del Agua, México)**

Este documento, publicado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México, proporciona herramientas y métodos para realizar diagnósticos rápidos de plantas potabilizadoras. Incluye listas de verificación de infraestructura, procedimientos simplificados de muestreo, directrices para calcular eficiencias de remoción y tiempos de retención hidráulica, así como criterios para evaluar el estado de operación de cada unidad de proceso. Aunque no es una norma boliviana, se utiliza como referencia técnica para estructurar la metodología de evaluación en países donde no existe un estándar específico equivalente. Sus protocolos permiten identificar rápidamente puntos críticos y priorizar mejoras operativas.

CAPÍTULO 3

DIAGNOSTICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO ALTO SENAC

3.1. GENERALIDADES DE LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA

La Planta Potabilizadora de Agua Alto SENAC ha sido diseñada para tratar un caudal máximo diario de 25 (L/s), considera como parámetro de diseño una turbiedad de entrada máxima de 20 NTU, para una población de diseño de 10800 habitantes aproximadamente para el año 2035. La fuente de abastecimiento es el río La Vitoria.

El diseño y construcción de la planta se realizó el año 2019 a cargo de la Entidad Ejecutora de Medio Ambiente y Agua (EMAGUA), ejecutado por la Asociación Accidental “Los Álamos”, actualmente se encuentra en su puesta en marcha por la Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado Sanitario de Tarija (COSAALT R.L.).

Esta planta tiene como finalidad principal garantizar el abastecimiento de agua potable a la población del Barrio Alto SENAC y zonas aledañas, contribuyendo al mejoramiento de las condiciones de salud pública y calidad de vida de los habitantes.

La planta está conformada por procesos de tratamiento adaptados a la calidad del agua captada. Los procesos unitarios son pretratamiento mediante cribado, coagulación, filtración rápida y desinfección. Además, la planta dispone de un tanque de almacenamiento con capacidad de 400 m³, que permite la regulación del agua tratada antes de su distribución. (ver figura N° 5).

La Planta Potabilizadora Alto SENAC recibe agua cruda que, en ocasiones, presenta turbiedades elevadas que no son tratadas. Para contextualizar estas variaciones, se consultaron los registros históricos de turbiedad máxima anual de la planta Tabladita, los cuales evidencian picos significativos de turbiedad en la entrada del sistema. Se registraron valores máximos de 3600 NTU en 2020, 325 NTU en 2021, 3685 NTU en 2022, 1840 NTU en 2023 y 1120 NTU en 2024. Según los operadores, en los días de mayor turbiedad, se ha observado que el proceso de aclaración del agua puede extenderse hasta por seis horas durante la operación nocturna. En caso de turbiedades altas la planta se cierra el ingreso del agua cruda y en caso de que no se cuente con cantidad suficiente de reserva se accionara la línea de impulsión desde la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tabladita al tanque de almacenamiento de la planta Alto SENAC.

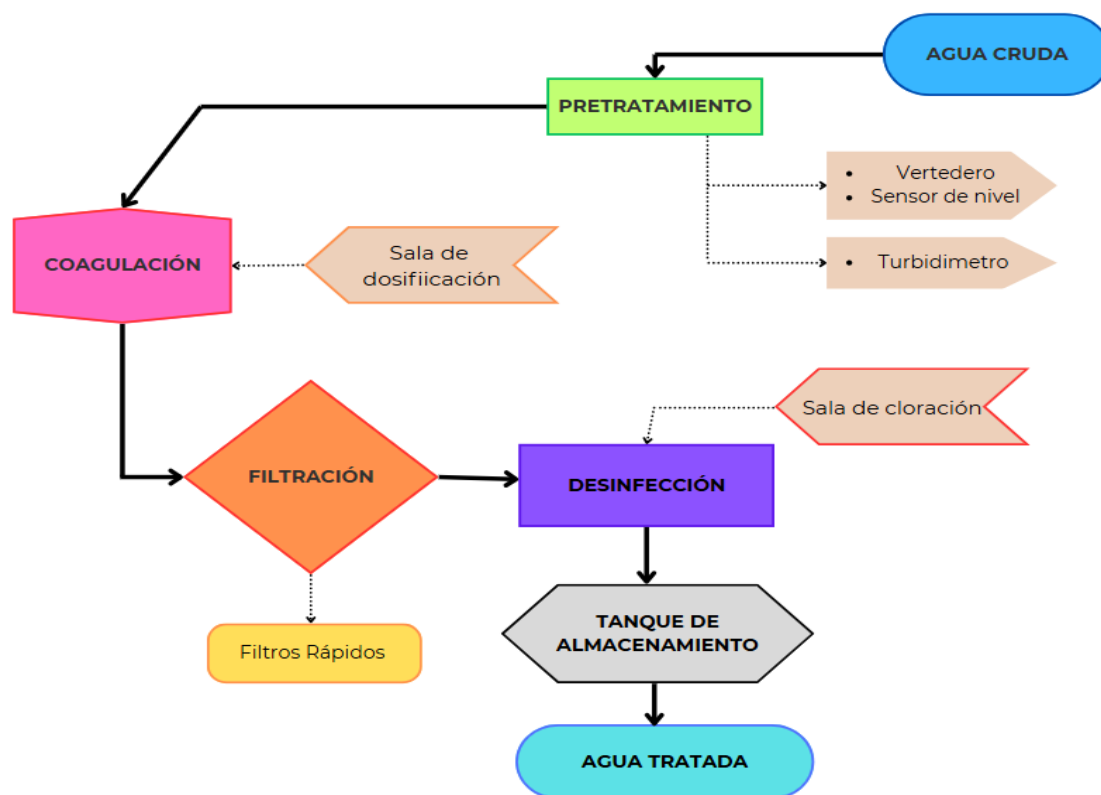


Figura 5 Diagrama de flujo de la Planta Potabilizadora Alto SENAC.

Fuente: Elaboración propia.

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, se llevó a cabo la primera recopilación de datos y pruebas de funcionamiento en conjunto con COSAALT R.L. Para ello se realizaron visitas técnicas para el levantamiento de información de la infraestructura, así como actividades de campo destinadas a la recolección de datos para la evaluación del funcionamiento hidráulico y sanitario de la planta. Estas actividades incluyen la medición de caudales, análisis de parámetros de calidad del agua, pruebas de jarras y determinación del tiempo de retención hidráulica, con el objetivo de evaluar el desempeño de los procesos en condiciones reales de operación.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA EPSA

La Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado de Tarija (COSAALT R.L.), es la EPSA responsable de la prestación de los servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario a la ciudad de Tarija. COSAALT R.L. fundada el 22 de septiembre de 1986 y obtuvo su personería jurídica el 27 de noviembre del mismo año, mediante Resolución del

Consejo Nacional de Cooperativas, pudiendo ampliar sus servicios a otros ámbitos territoriales y jurisdiccionales del Departamento.

3.2.1. Componentes Estratégicos

- **Visión de COSAALT R.L.**

“Ser una EPSA líder en el Sur de Bolivia, comprometida con la mejora continua y sustentable de su capital humano y de los recursos que administra, capaz de dotar de un servicio de agua potable y alcantarillado sanitario continuo, oportuno y de calidad a la ciudad de Tarija”.

- **Misión de COSAALT R.L.**

“Aplicar la filosofía cooperativista para servir a la colectividad en el abastecimiento de agua potable y alcantarillado sanitario, preservando la salud de la población y el medio ambiente”

- **Logo**



Figura 6 Logo COSAALT R.L.

Fuente: COSAALT R.L.

3.3. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE PROCESOS UNITARIOS

Para una mejor comprensión de la ubicación de cada proceso en esta planta se presenta la siguiente vista en planta del plano de la Planta Potabilizadora Alto SENAC:

3.3.1. Pretratamiento cribado o cernido

El proceso de pretratamiento en la Planta Potabilizadora de Agua Alto SENAC se encuentra ubicado al ingreso del canal principal de entrada. Esta unidad está conformada

por una rejilla metálica de limpieza manual y un colador perforado, los cuales se encargan de remover materiales como hojas, ramas, plásticos y otros residuos gruesos transportados por el agua cruda proveniente del río La Vitoria.



Figura 7 Ingreso de la Planta Potabilizadora Alto SENAC.

Fuente: Fotografía del autor.

La rejilla metálica se sitúa en el canal de ingreso, aguas arriba del vertedero triangular, presenta una separación entre barras de 4 mm, cumpliendo con los criterios de cribado fino establecidos en la Norma Boliviana NB 689, Volumen 2, capítulo 4, que regula las unidades de pretratamiento. Una vez pasada esta etapa, el agua fluye hacia un colador perforado con orificios de 2 cm de diámetro, ubicado en la entrada de la tubería de conducción y refuerza la protección de los componentes aguas abajo. La limpieza de los dispositivos de cribado se realiza de forma manual, a cargo del personal técnico de operación.

En el pretratamiento, se encuentran instalados un turbidímetro, un sensor de nivel, un vertedero triangular, los cuales permiten registrar en tiempo real parámetros como la

turbidez y el caudal mediante transmisión a un sistema de control interfaz humano-máquina (HMI). No obstante, de acuerdo con lo estipulado en la NB 689, estos componentes no son considerados como parte del pretratamiento, sino que forman parte del sistema de instrumentación y control operativo de la planta. Como parte del control operativo y monitoreo no se cuenta con un registro de datos diarios en bitácora por parte del personal responsable.

Durante la inspección técnica se constató que tanto la rejilla como el colador perforado se encuentran en buen estado y operativos, sin evidencias de deformaciones, corrosión significativa ni obstrucciones permanentes.

3.3.2. Coagulación

La etapa de coagulación en la Planta Potabilizadora de Agua Alto SENAC está diseñada para activarse únicamente cuando el agua cruda del río La Vitoria presenta niveles elevados de turbiedad cuando excede el valor de diseño.

El sistema de coagulación cuenta con una sala de dosificación completa, el coagulante empleado es el sulfato de aluminio, debido a su alta eficacia para remover turbiedad en aguas superficiales. La alcalinización con hidróxido de calcio permite mantener un rango de pH óptimo para el tratamiento, que garantice la formación eficiente de flóculos sin comprometer la calidad del agua o generar condiciones corrosivas.



Figura 8 Sala de dosificación de la coagulación.

Fuente: Fotografía del autor.

Según lo establecido en la Norma Boliviana NB 689 (2013), Volumen 2, Capítulo 5, la etapa de coagulación es obligatoria en sistemas que pueden estar expuestos a variaciones en la calidad del agua cruda, aun cuando no se opere de forma continua.

El punto de inyección del coagulante se encuentra ubicado en la tubería, permitiendo una incorporación directa al flujo de agua que circula hacia los filtros. La mezcla rápida ocurre en los tanques, mediante agitación mecánica, garantizando que el coagulante se encuentre en condiciones homogéneas antes de su dosificación.



Figura 9 Tanque de la mezcla rápida y agitador mecánico.

Fuente: Fotografía del autor.

La activación del sistema se realiza de forma manual por parte del personal técnico de la planta, en función de los valores registrados por el turbidímetro instalado en el canal de entrada.

Observación técnica sobre la estabilización del pH

Durante la puesta en marcha de la planta, se identificó una dificultad operativa asociada al uso del hidróxido de calcio en uno de los tanques de preparación del sistema de coagulación. Inicialmente, el diseño contemplaba el uso de dos tanques de 1000 litros, uno destinado a la preparación de la solución de sulfato de aluminio y el otro para la solución alcalina de cal hidratada. Sin embargo, se evidenció que la bomba dosificadora conectada al tanque de cal sufría obstrucciones y daños mecánicos frecuentes, provocados por la presencia de partículas no solubles como granos de arena, piedrecillas o grumos que no se disolvían completamente durante la preparación de la mezcla.



Figura 10 Disposición de tanque de hidróxido de calcio.

Fuente: Fotografía del autor.

Este problema de sedimentación generó un riesgo operativo para la bomba, reduciendo su vida útil y comprometiendo la continuidad del proceso. Como medida correctiva provisional, el personal técnico de la planta adaptó un tanque de PVC exclusivamente para la preparación de la solución alcalina. El tanque fue habilitado con un grifo de PVC en su parte inferior y conectado mediante una manguera, permitiendo la dosificación manual por gravedad, sin utilizar la bomba dosificadora original.

Cabe aclarar que esta modificación no está contemplada en el diseño original de la planta, pero fue implementada como una solución práctica ante las condiciones reales del insumo y los requerimientos de operación.

3.3.3. Filtración

La unidad de filtración rápida está compuesta por una batería de nueve filtros rápidos de lavado automático, diseñados para operar mediante flujo descendente durante el régimen de filtración y flujo ascendente por gravedad durante el régimen de lavado.



Figura 11 Batería de filtros.

Fuente: Fotografía del autor.

Cada filtro presenta una configuración bicapa, compuesta por un lecho superior de arena con un tamaño efectivo de 0,5 mm y un lecho inferior de grava con un diámetro entre 4 y 6 mm. Las dimensiones estructurales por unidad son de 1,60 metros de ancho y 4,15 metros de altura efectiva, medida desde el fondo falso hasta el nivel superior del agua. La distribución del flujo hacia los filtros se realiza a través de un canal principal, desde el cual el agua ingresa por medio de columnas de maniobra equipadas con válvulas metálicas, operadas manualmente mediante volantes.

La operación de lavado se efectúa por medio de un sistema de válvulas dispuestas en cada columna de maniobra, que permiten activar el proceso de limpieza del lecho filtrante. La frecuencia de lavado varía en función de la carga de sólidos del agua cruda, siendo normalmente diaria, durante la época de lluvias puede realizarse hasta dos veces por jornada. En periodos de menor carga, el lavado puede espaciarse día por medio. El agua del lavado es descartada y conducida hacia una quebrada adyacente sin tratamiento ni reutilización. Asimismo, se verificó que la planta no cuenta con un sistema para el

tratamiento de los lodos, durante el período de evaluación no se observó la realización de actividades de purga o extracción de los lodos acumulados en las unidades de proceso.

Como parte de la evaluación de la capacidad operativa de la planta en su fase de puesta en marcha, se realizó un monitoreo específico de la unidad de filtración durante los 10 muestreos, de los cuales siete se realizaron sin la adición de coagulantes. Este período de observación tuvo como propósito determinar el comportamiento de los filtros y la capacidad de la planta para tratar el agua cruda en ausencia de coagulación, abarcando un rango variable de turbiedades de entrada, incluyendo valores tanto inferiores como uno superior al límite de diseño de 20 NTU para operación sin coagulante. Los resultados de esta observación permitieron analizar la frecuencia de saturación de los filtros y la necesidad de retrolavados más frecuentes bajo diversas condiciones de turbiedad del afluente, información crucial para establecer los límites operacionales sin el uso de químicos.

Cabe señalar que el sistema no dispone de manometría ni piezometría para el monitoreo de la pérdida de carga, lo cual representa una limitante para una operación óptima. La ausencia de estos instrumentos obliga a ejecutar los lavados basándose únicamente en la observación visual del nivel del agua.

3.3.4. Desinfección

- **Sistema de cloración**

La planta cuenta con un sistema de desinfección mediante cloración gaseosa, el cual se encuentra completamente operativo al momento de la evaluación. El punto de inyección del cloro se ubica a la salida del canal de filtración, en una cámara de contacto de hormigón armado. Esta disposición estructural asegura que el desinfectante entre en contacto inmediato con el agua ya clarificada, optimizando su efectividad al actuar sobre una carga microbiológica reducida y sin interferencias de sólidos suspendidos o turbiedad. La dosificación se ajusta manualmente por el personal técnico en función de los niveles de cloro residual medidos en campo.

La dosificación se realiza desde una sala de desinfección con los equipos requeridos para la dosificación y el manejo seguro del gas cloro.



Figura 12 Dosificadores de cloro residual Hydro.

Fuente: Fotografía del autor.

El sistema opera mediante un clorador automático Hydro y utiliza dos cilindros de gas cloro de 68 kg, montados sobre una báscula para el control del consumo. La mezcla se realiza a través de un manifold hidráulico, y la succión del cloro es impulsada por bombas eyectores y periféricas. La seguridad de la sala cuenta con un detector de fugas, un kit de emergencia certificado, una ducha lavaojos, y un sistema de respiración autónoma, además de iluminación funcional y un ventilador extractor de aire.

- **Sistema de precloración**

La planta también cuenta con un sistema de precloración instalado en el canal de ingreso a los filtros. Durante la etapa de diagnóstico se constató que la precloración no se encuentra en operación activa. La decisión de mantener este sistema inactivo responde a criterios operativos, ya que las condiciones del agua cruda provenientes del río La Vitoria, en situación normal, no presentan concentraciones de microorganismos ni turbiedades que justifiquen la doble aplicación de cloro. Por tanto, la desinfección se limita únicamente a la etapa posterior a la filtración, lo cual es técnica y sanitariamente válido siempre que se realice un adecuado control del cloro residual.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA E INGENIERÍA DEL PROYECTO

4.1. TIPO Y ENFOQUE DEL ESTUDIO

4.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación se enmarca en los estudios aplicados, caracterizados por su orientación hacia la solución de problemas concretos en contextos reales. Como lo señala Hernández Sampieri et al. (2018), "la investigación aplicada se dirige a resolver problemas prácticos inmediatos o a tomar decisiones sobre situaciones específicas" (pág. 85). En este sentido, el estudio se centra en evaluar el funcionamiento de la Planta Potabilizadora Alto SENAC durante su etapa de puesta en marcha, con el objetivo específico de garantizar que los procesos de tratamiento cumplan con los estándares de calidad establecidos en la normativa boliviana NB 512. La naturaleza aplicada de esta investigación se manifiesta en su potencial para generar recomendaciones técnicas concretas que puedan implementarse para optimizar la operación de la planta. Desde la perspectiva de su alcance, la investigación adopta un carácter predominantemente descriptivo. Según Hernández Sampieri et al. (2018), "los estudios descriptivos buscan especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice" (pág. 102).

Esta caracterización se aplica al análisis de los procesos unitarios que componen el sistema de tratamiento de la planta, los cuales incluyen el pretratamiento, coagulación, filtración rápida y desinfección. La descripción técnica detallada de cada uno de estos procesos permite comprender la configuración actual de la planta y sus condiciones operativas básicas.

4.1.2. Enfoque metodológico

El enfoque metodológico adoptado en esta investigación es de tipo mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos para lograr una comprensión del sistema en estudio. Creswell (2014) define los métodos mixtos como "aquellos que involucran la recolección, análisis e integración de datos tanto cuantitativos como cualitativos en un mismo estudio". Esta aproximación resulta particularmente adecuada para el presente trabajo, ya que permite por un lado cuantificar con precisión los parámetros de calidad del agua y, por otro, capturar aspectos cualitativos relacionados con la operación y mantenimiento de la infraestructura. (Creswell, 2014 pág. 215)

Como señala Creswell (2014), "el enfoque cuantitativo se caracteriza por la medición precisa de variables y el análisis de los datos obtenidos" (pág. 217). En este caso, las mediciones incluyeron parámetros fisicoquímicos clave como pH, turbiedad, conductividad y cloro residual, así como parámetros microbiológicos (coliformes termotolerantes). El análisis cuantitativo se complementó con la determinación de variables operativas fundamentales para evaluar el desempeño del sistema. Entre estas destacan la eficiencia de remoción de turbiedad en cada etapa del proceso, la tasa de filtración en los filtros rápidos y el tiempo de retención hidráulica del sistema. Estos indicadores permitieron evaluar no solo el cumplimiento normativo, sino también la eficiencia operativa de los diferentes procesos unitarios. Por su parte, el componente cualitativo del estudio se desarrolló principalmente a través de visitas técnicas sistemáticas a la planta. Durante estas visitas se implementó un protocolo de observación estructurada que incluía el llenado de fichas técnicas estandarizadas, las cuales registraban detalladamente el estado de la infraestructura, las condiciones de operación y los procedimientos implementados por el personal técnico. Como señalan Creswell y Poth (2018), "las técnicas cualitativas permiten comprender los fenómenos en su contexto natural, capturando la complejidad y riqueza de los procesos observados" (p. 47).

Estas observaciones se complementaron con registros fotográficos y diálogos con los operadores, lo que permitió contextualizar adecuadamente los resultados cuantitativos y comprender las decisiones operativas tomadas ante variaciones en la calidad del agua cruda. La integración de estos componentes metodológicos proporciona una base sólida para el diagnóstico técnico del sistema. La combinación de datos cuantitativos precisos con observaciones cualitativas contextualizadas permite una evaluación comprehensiva de cada enfoque.

4.2. MUESTREO

4.2.1. Puntos de muestreo

El muestreo se realizó en los puntos estratégicos de la Planta de Potabilizadora de Agua de Alto SENAC, con el objetivo de evaluar la calidad del agua a lo largo del proceso de potabilización. Se identificaron como puntos de muestreo:

- A. La entrada del agua cruda a la planta.
- B. La entrada al sistema de filtración rápida.
- C. La salida de los filtros, en el punto donde se efectúa la desinfección.
- D. El tanque de almacenamiento de agua tratada.

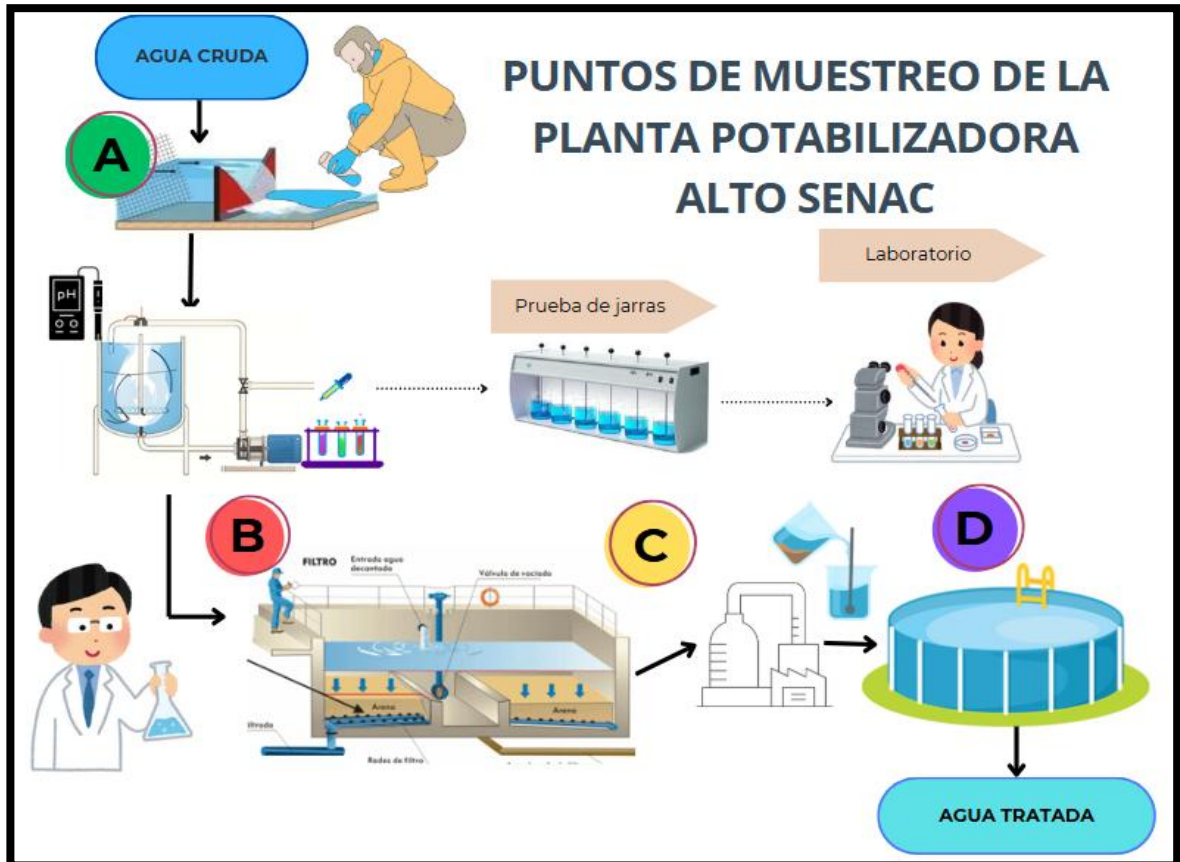


Figura 13 Puntos de muestreos.

Fuente: Elaboración propia.

Estos puntos representan la entrada de cada proceso unitario, considerando que la salida de una unidad corresponde a la entrada de la siguiente. Esta disposición permitió un análisis detallado de la evaluación de los parámetros de calidad del agua a través del sistema y sirve de base para el cálculo de la eficiencia de cada etapa de tratamiento en capítulos posteriores.

4.2.2. Frecuencia y condiciones del muestreo

El muestreo se llevó a cabo durante la época de lluvias, periodo caracterizado por la llegada de agua con alta turbiedad, realizando la recolección de muestras cuando se identificaban condiciones críticas en la calidad del agua.

Se tomaron un total de 10 muestras, de las cuales 6 muestras durante eventos con turbiedad superior a 5 NTU, así como 4 muestras en condiciones de turbiedad inferiores, aproximadamente tres por mes. En todos los casos, el muestreo fue puntual, es decir, se recogieron muestras en un momento específico del día.

4.2.3. Técnica de muestreo y conservación

La recolección de las muestras se realizó utilizando botellas plásticas PET limpias, previamente acondicionadas para evitar contaminaciones externas.

Técnica de Captación de las Muestras de Agua para Análisis Físico-Químico: En la captación de muestras para análisis físico-químico, se requiere de un volumen mínimo de dos litros para lo cual se recomienda el uso de una botella químicamente limpia. Antes de captar la muestra, se debe enjuagar el envase dos o tres veces en la misma agua que se va a analizar, a fin de "curarla", es decir, eliminar cualquier sustancia que no corresponda con la verdadera composición del agua bajo estudio; luego se llena y se tapa herméticamente.

- a) **Captación de muestras en grifos:** Se abre el grifo totalmente, en forma ininterrumpida, durante un tiempo mínimo de cinco minutos, a fin de renovar el agua de la tubería interior. Después de enjuagar la botella tres veces consecutivas se llenará totalmente.
- b) **Captación de muestras en un estanque:** Se toma la botella destapada, por la parte inferior, se llena parcialmente de agua dos o tres veces, se enjuaga y se vota fuera del estanque. Luego se sumerge la botella 30 cm. Por debajo de la superficie y se hace un rápido recorrido hacia adelante para que termine de llenarse, se tapa y se envía al laboratorio.

Técnica de Captación de las Muestras de Agua para Análisis Bacteriológico: Cuando se toman muestras para el análisis bacteriológico es necesario adoptar todas las precauciones a fin de asegurarse que la muestra sea representativa del agua que se desea analizar y para evitar contaminación accidental de la misma durante el proceso de muestreo.

- **Captación de muestras en un estanque:** Se destapa la botella sosteniendo el tapón con una mano. Con la otra mano se invierte boca abajo el envase y se introduce en el agua unos 30 cm. bajo la superficie, se da vuelta de manera que se llene, evitando que el agua que toca la mano entre en la botella. Se saca el envase lleno hasta tres cuartas parte de su capacidad, se tapa inmediatamente, y se envía al laboratorio.

4.2.4. Transporte de las muestras

El transporte de las muestras se realizó en conservadoras plásticas sin refrigeración activa, debido a que el trayecto desde la planta de tratamiento de Alto SENAC hasta el laboratorio de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tabladita es corto, con una duración aproximada de 10 minutos. Este lapso fue considerado suficiente para garantizar la confiabilidad de los resultados, dado que los análisis estaban orientados a parámetros fisicoquímicos que no requieren estrictas condiciones de preservación en ese intervalo de tiempo.

4.2.5. Laboratorios de análisis

El análisis de las muestras de agua recolectadas se llevó a cabo principalmente en el laboratorio de la PTAP Tabladita, perteneciente a la Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado de Tarija R.L. (COSAALT R.L.), este laboratorio fue el centro analítico principal, debido a su proximidad, disponibilidad operativa y experiencia en el monitoreo de la calidad del agua potable en la ciudad de Tarija. Es importante mencionar que, aunque el laboratorio cuenta con equipamiento adecuado y personal capacitado para el análisis de parámetros físico-químicos, no dispone de infraestructura ni insumos para realizar análisis microbiológicos en el laboratorio de Tabladita.

Parte de los análisis fueron realizados in situ gracias al uso de equipos portátiles con los que cuenta el laboratorio, y así también en las instalaciones del laboratorio de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tabladita.

Se realizó los análisis correspondientes en el laboratorio del Centro de Análisis e Investigación en Agua y Medio Ambiente (CEANID) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, con el propósito de complementar la información. Este análisis se llevó a cabo el 2 de abril de 2025 con dos muestras puntuales: una tomada en la entrada y otra en la salida de la planta. En ambas muestras se analizaron los mismos parámetros físico-químicos ya mencionados (pH, turbiedad, conductividad y cloro residual), y además se incorporó el análisis de coliformes termorresistentes, siguiendo la metodología establecida en la normativa boliviana vigente (NB 512).

De este modo, la estrategia analítica adoptada integró tanto el análisis continuo y de control operativo desarrollado en el laboratorio de COSAALT R.L, como el análisis puntual y microbiológico realizado en CEANID. Esta combinación permitió obtener una visión completa y confiable del comportamiento del sistema de tratamiento y del cumplimiento de los parámetros establecidos para agua potable, lo que fortalece los resultados del diagnóstico técnico realizado a la planta de Alto SENAC.

4.3. MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL DE CALIDAD DE AGUA

Se llevó a cabo el monitoreo de los parámetros de calidad establecidos por la Norma Boliviana NB 512. Se evaluaron los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, turbiedad, temperatura, cloro residual libre y coliformes termorresistentes, considerando su importancia en la caracterización del agua y en la verificación del cumplimiento de los límites permisibles para consumo humano.

Las mediciones in situ se efectuaron mediante el uso de instrumentos portátiles, durante la operación de la planta y bajo la supervisión técnica del personal de la PTAP Tabladita. En los casos donde las condiciones operativas dificultaron el análisis inmediato particularmente durante horarios nocturnos con ingreso de agua de alta turbiedad, se procedió a recolectar y conservar las muestras para su análisis posterior en el laboratorio de la misma planta.

4.3.1. Potencial de hidrógeno (pH)

Materiales y equipos

- Muestra de agua
- Medidor de bolsillo HANNA HI98130 (in situ)
- Medidor multiparamétrico Thermo Orion (laboratorio)



Figura 14 Medición de la muestra en laboratorio.

Fuente: Fotografía del autor.

Procedimiento

1. Colocar la muestra en un vaso limpio.
2. Enjuagar el electrodo tres veces con la misma muestra.
3. Introducir el electrodo del pH-metro y agitar suavemente.
4. Esperar la estabilización de la lectura y registrar el valor.
5. Comparar con los límites establecidos por la NB 512.

4.3.2. Conductividad

Materiales y equipos

- Muestra de agua
- Medidor de bolsillo HANNA HI98130 (in situ)
- Medidor multiparamétrico Thermo Orion (laboratorio)

Procedimiento

1. Verter la muestra en un recipiente limpio.
2. Enjuagar el sensor con la misma muestra tres veces.
3. Sumergir el sensor de conductividad en la muestra.
4. Leer el valor una vez estabilizado.
5. Evaluar los resultados de acuerdo a los rangos establecidos por la NB 512.



Figura 15 Análisis de muestra en Laboratorio.

Fuente: Fotografía del autor.

4.3.3. Turbiedad

Materiales y equipos

- Muestra de agua
- Turbidímetro portátil 2020WE/2020WI (in situ)
- Turbidímetro HI93414 de HANNA (laboratorio)



Figura 16 Turbidímetro y muestras de agua.

Fuente: Fotografía del autor.

Procedimiento

1. Llenar la celda del turbidímetro con la muestra.
2. Enjuagar previamente tres veces la celda con la misma muestra.
3. Secar la celda con el paño de microfibra que viene incluido en los accesorios del turbidímetro.
4. Colocar la celda en el equipo que coincida con la línea de medición del equipo y cerrar la tapa.
5. Esperar la lectura digital y registrar el valor.
6. Comparar con el valor máximo permitido según NB 512 (≤ 5 NTU en agua tratada).

4.3.4. Temperatura

Materiales y equipos

- Muestra de agua
- Medidor HANNA HI98130 (in situ) o Medidor multiparamétrico Thermo Orion (laboratorio)

Procedimiento

1. Enjuagar el sensor con la misma muestra.
2. Colocar el sensor dentro de la muestra.
3. Esperar unos segundos hasta que la lectura se estabilice.
4. Registrar la temperatura en °C.



Figura 17 Análisis en campo.

Fuente: Fotografía del autor.

4.3.5. Cloro residual

Materiales y equipos

- Colorímetro HANNA HI701 Checker HC (in situ y laboratorio).
- Reactivos HI93701-01 específicos para cloro libre.

Procedimiento

1. Llenar la celda del colorímetro con 10 mL de muestra.
2. Realizar la medición de la muestra C1 sin reactivo.
3. Una vez realizada la medición del C1 automáticamente solicita C2 y se debe añadir el reactivo a la celda y agitar suavemente.
4. Insertar la celda en el colorímetro y presionar para iniciar la medición.
5. Leer el resultado en pantalla y registrar el valor.
6. Verificar si se encuentra dentro del rango permitido por NB 512 (0.2 – 1.5 mg/L).



Figura 18 Medición de la muestra de agua clorada in situ.

Fuente: Fotografía del autor.

4.3.6. Coliformes termorresistentes

Materiales y equipos

- Muestra de agua en botellas PET estériles.
- Laboratorio CEANID – Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.
- Método microbiológico (en espera de confirmación por CEANID).



Figura 19 Muestras de agua cruda y tratada para su análisis.

Fuente: Fotografía del autor.

Procedimiento

El análisis fue realizado exclusivamente por personal especializado del CEANID. Las muestras fueron recolectadas el 2 de abril de 2025 en la entrada y salida de la planta, y transportadas al laboratorio bajo condiciones controladas para su análisis.

4.4. ENSAYO DE PRUEBAS DE JARRAS

Con el objetivo de establecer las dosis óptimas de coagulante (sulfato de aluminio) y alcalinizante (hidróxido de calcio) según la calidad del agua cruda, se desarrollaron nueve ensayos de jarras en laboratorio. El análisis se centró en la evaluación de muestras representativas de diferentes niveles de turbiedad, recolectadas directamente en la entrada de la planta.

Materiales y Equipos

- Agua cruda
- Equipo de jarras PHIPPS & BIRD
- Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)

- Hidróxido de calcio (Ca(OH)_2)
- 6 vasos de precipitado de vidrio de 1000 mL
- Balde de 20 L
- 2 pipetas graduadas de 10 mL
- 2 vasos de precipitado de vidrio de 100 mL
- Turbidímetro portátil HI93414 (HANNA Instruments), rango 0–1000 NTU.
- Medidor multiparamétrico Thermo Orion para pH y conductividad.



Figura 20 Equipo de jarras PHIPPS & BIRD.

Fuente: Fotografía del autor.

Procedimiento

1. Se recolectó agua cruda del canal de entrada de la planta.
2. Se inicia la prueba de jarras, midiendo los parámetros de pH, la turbidez, el color en el agua cruda.
3. Se llenaron 6 vasos de precipitado de 1000 mL con agua cruda homogeneizada.
4. Los reactivos de sulfato de aluminio e hidróxido de calcio se añadieron a los vasos con la ayuda de pipetas.
5. Se inició agitación a 250 rpm durante 1 minuto para la mezcla rápida, inmediatamente después de adicionar ambos reactivos a cada vaso. Se redujo la velocidad a 50 rpm durante 3 minutos para la mezcla lenta, se detuvo el agitador y se dejó sedimentar las muestras durante 15 minutos.

6. Pasado este tiempo, se extrajo la fase superior para medir turbiedad, pH, conductividad y temperatura.

Ensayo de filtración con papel filtro

Se utilizo papel filtro para realizar en laboratorio la simulación de los filtros en la planta esto con el propósito de fue determinar el valor máximo de turbiedad del agua cruda que el sistema de filtración directa podría remover eficientemente sin coagulante y estabilizadores de pH.



Figura 21 Muestra de agua filtrada en papel filtro.

Fuente: Fotografía del autor.

Selección de dosis optima

Definir las diferentes dosis del coagulante a analizar, con el fin de establecer cuál es la dosificación de cada jarra, utilizando la siguiente Ec. 5.

$$C1V1=C2V2 \quad \text{ecuación (5)}$$

Donde:

C1: Concentración en el tanque (mg/L).

V1: Volumen agregado en la prueba de jarras de sulfato de aluminio o hidróxido de calcio (L).

V2: Volumen de capacidad del vaso precipitado (L).

C2: Dosis o concentración química de lo que se inyecta, se obtiene de la prueba de jarras y se expresa %, ppm = mg/l o g/m³, es lo que el operador debe manejar.

Concentración en el tanque (C1)

Datos:

Volumen del tanque: 4000 L

Volumen del vaso precipitado: 1 L

Para Sulfato de aluminio (Al₂ (SO₄)₃):

$$C1 = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} = \frac{400000 \text{ g}}{4000 \text{ L}} = 100 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 100000 \text{ mg/L}$$

Para Hidróxido de calcio (Ca (OH)₂)

$$C1 = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} = \frac{50000 \text{ g}}{4000 \text{ L}} = 12,5 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 12500 \text{ mg/L}$$

Reactivo	kg	L	mg/L
Sulfato de Aluminio	400	4000	100000
Hidróxido de Calcio	50	4000	12500

Tabla 4 Resultados del ensayo de pruebas de jarras.

ENSAYO N° 1						
JARRA N°	1	2	3	4	5	6
Sulfato de Aluminio (mL)	0,5	1	1,2	1,5	1,8	2
Hidróxido de Calcio (mL)	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Conductividad (μS/cm)	69,81	106,2	124,2	149,1	176,8	181,8
pH	7,36	5,35	4,04	4,6	4,37	4,37
Temperatura (°C)	17,8	17,8	17,9	18	18	18,1
Turbiedad (NTU)	4,71	3,52	14,14	17,1	19,2	16,2

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla la jarra 1 es la que cumple con los parámetros.

Concentración óptima en la prueba de jarras del sulfato de aluminio:

$$C2 = \frac{C1V1}{V2}$$

$$C2 = \frac{100000 \text{ mg/L} \times 0,0005 \text{ L}}{1 \text{ L}} = 50 \text{ mg/L}$$

4.5. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES

4.5.1. Aforo de caudal de ingreso a la planta

En la Planta Potabilizadora Alto SENAC, el caudal de ingreso se mide mediante un vertedero triangular con un ángulo de 90° instalado en un canal de 0,80 m de ancho. Debido a que la medición automática (sensor de nivel + HMI) se basa en la fórmula teórica del vertedero, es necesario validar y ajustar el coeficiente de descarga “C” para garantizar que las lecturas de caudal en pantalla sean correctas. Durante los ensayos iniciales se intentó medir el caudal mediante un molinete de hélice OTT / C2 (diámetro de hélice 50 mm, paso 0,5 m), colocado aguas arriba del vertedero triangular de 90° en el canal de ingreso.

Debido a esta limitación, se optó por utilizar un aforo volumétrico en un tramo accesible intermedio del conducto: se derivó temporalmente el flujo hacia un balde calibrado de 11 L y se midió el tiempo de llenado. Esta técnica, aunque más manual, proporcionó un valor de caudal real sin depender de criterios hidráulicos de arranque de la hélice. Con ello se pudo construir una curva empírica de calibración del vertedero triangular y comparar con las lecturas del sensor HMI.

Materiales y equipo

- Balde plástico de 11 L (0,011 m³).
- Balde plástico de 40 L
- Cronómetro digital: Precisión 0,1 s (aplicación de teléfono móvil).
- Planilla de registro.
- Regla graduada.
- Transportador graduado.

Procedimiento de aforo:

1. Con el vertedero vacío inicialmente se mide el ángulo del vertedero, el operador regula manualmente la válvula de ingreso hasta que la lámina de agua sobre el vértice alcance la altura deseada ($h = 3 \text{ cm}$, 6 cm o 9 cm , usando balde de 11 L ; $h = 12 \text{ cm}$, 15 cm o 18 cm , usando balde de 40 L). Este ajuste se realiza con la regla el tirante sobre la cresta del vertedero, sin cerrar completamente la válvula, sino modulándola hasta que el agua mantenga la altura estable.
2. Una vez estabilizada la lámina a la altura h , se coloca el balde calibrado bajo del vertedero y se inicia el cronómetro en el instante en que el agua empieza a caer sobre el balde, asegurando que no haya salpicaduras significativas que afecten el volumen.
3. Cuando el balde recoja su volumen nominal (11 L o 40 L), el operador detiene el cronómetro y anota el tiempo de llenado. Se verifica visualmente que el balde esté completamente lleno y que no haya fugas laterales.
4. Para cada altura h , se repite el llenado al menos dos veces y se registra el tiempo en cada intento. Con ello, se calcula un tiempo promedio para cada h , minimizando las variaciones por reacción humana y oscilaciones leves en el flujo.



Figura 22 Medición de la lámina de agua que pasa por la cresta del vertedero.

Fuente: Fotografía del autor.

Alturas medidas sobre el vértice del vertedero

Se eligieron las siguientes alturas h (distancia vertical desde el vértice del vertedero hasta la superficie del agua):

Tabla 5 Datos de altura y tiempos medidos.

Nº	Altura “h” sobre vértice (cm)	Tiempos medidos (s)
1	3	27,02
2	6	5,54
3	9	2,09
4	12	4,10
5	15	2,20
6	18	1,67
7	22	1,24

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del caudal real (aforo volumétrico)

A partir de cada ensayo de aforo (volumen fijo $V=0,011 \text{ m}^3$), se determinó el caudal con la Ec. 6.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (6)$$

Donde:

Q: Caudal (m^3/s).

V: Volumen recolectado (m^3).

T: Tiempo promedio (s).

Datos:

- $V = 11 \text{ litros (L)} = 0,011 \text{ m}^3$
- $t = 27,02 \text{ segundos (s)}$

$$Q = \frac{0,011 \text{ m}^3}{27,02 \text{ s}} = 0,0004 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 6 Determinación de Caudales.

h (cm)	h (m)	Tiempo (s)	Q (L/s)	Q (m³/s)
3	0,03	27,02	0,4071	0,0004
6	0,06	5,54	1,9856	0,0020
9	0,09	2,09	5,2632	0,0053
12	0,12	4,10	9,7561	0,0098
15	0,15	2,20	18,1818	0,0182
18	0,18	1,67	23,9521	0,0240
22	0,22	1,24	32,2581	0,0323

Fuente: Elaboración propia.

Con los caudales y las alturas del vértice se realiza la curva de calibración de la ecuación del vertedero triangular quedando la Ec. 7.

$$Q = 1,1252 \times H^{2,2476} \quad (7)$$

4.5.2. Aforo volumétrico del lavado de filtros

El aforo volumétrico se realizó en la batería de filtros rápidos compuestos por una capa de grava (4-6 mm) y arena (0,5 mm). El retrolavado se efectuó mediante la apertura de válvulas: se cerró la válvula de entrada de agua y se abrió la de lavado para permitir el vaciado del filtro, seguido de la recirculación de agua limpia hasta completar la limpieza. El sistema opera por gravedad, sin emplear un tanque elevado.

Materiales y Equipos

- Tanque metálico con capacidad de 100 litros.
- Balde de 10 litros.
- Cronometro digital.
- Planilla de registro.



Figura 23 Equipos y materiales utilizados en el aforo.

Fuente: Fotografía del autor.

Procedimiento y consideraciones

1. Para la medición del caudal, se utilizó un tanque metálico, calibrado manualmente in situ mediante un balde de 10 litros.
2. El tanque se posicionó a 1 metro de distancia de la salida de la tubería de lavado (diámetro de 8 pulgadas), asegurando que el flujo cae directamente en su interior.
3. El cronometraje se realizó iniciando la medición cuando la tubería estaba completamente llena de agua y el flujo alcanzaba su régimen máximo.
4. Se ejecutaron 5 repeticiones del lavado de un filtro, recolectando 100 litros en cada prueba. Para minimizar errores por salpicaduras (estimadas en $<1\%$ del volumen total), se verificó la caída de agua que impacto en el centro del tanque.



Figura 24 Aforo del lavado de filtros.

Fuente: Fotografía del autor.

Tiempos registrados y caudal

El caudal se calculó mediante la ecuación 6.

Datos:

$$V = 100 \text{ litros} = 0,1 \text{ m}^3$$

$$t = 5 \text{ segundos.}$$

$$Q = \frac{0,10 \text{ m}^3}{5,00 \text{ s}}$$

$$Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$$

Los tiempos de llenado del tanque se muestran en la siguiente tabla 7:

Tabla 7 Resultados del aforo volumétrico (n = 5).

Prueba	Tiempo (s)	Caudal (L/s)	Caudal (m³/s)
1	5,00	20,00	0,02
2	4,00	25,00	0,03
3	3,00	33,33	0,03
4	5,00	20,00	0,02
5	4,00	25,00	0,03
Promedio	4,20	24,67	0,02

Fuente: Elaboración propia.

- **Estimación del volumen de agua utilizada por lavado**

El tiempo de lavado varía según las condiciones de operación:

- Días normales: 9–10 minutos.
- Alta turbiedad (>20 NTU): hasta 12 minutos.
- Baja turbiedad (<5 NTU): cada 2 días, entre 6–8 minutos.

Tomando un valor medio referencial de 9 minutos (540 s) por lavado diario y aplicando el caudal promedio por filtro:

$$V=Q \times t=0,025 \text{ m}^3/\text{s} \times 540\text{s}$$

$$V=13,32\text{m}^3$$

Si se considera la batería completa de 9 filtros:

$$V_{\text{total}}=13,5 \text{ m}^3 \times 9=119,88 \text{ m}^3$$

Tabla 8 Resumen de volumen de agua utilizada en el lavado de filtros.

Número de filtros	Caudal (m³/s)	Tiempo (s)	Volumen (m³)
1	0,02	540	13,32
9	0,222	540	119,88

Fuente: Elaboración propia.

- **Tasa de lavado**

La tasa de lavado real puede calcularse por la Ec. 8.

$$\text{tasa de lavado} = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

$$\text{tasa de lavado} = 0,011 \frac{m}{s} = 0,661 \text{ m/min}$$

4.5.3. Determinación del tiempo de retención hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es un parámetro clave en el diseño y operación de las plantas de tratamiento de agua potable. Este parámetro representa el tiempo promedio que el agua permanece en un componente del sistema, permitiendo que ocurran los procesos físicos, químicos o biológicos correspondientes.

Equipos y materiales

Para la ejecución de la prueba de determinación del TRH, se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- **Balde con válvula tipo caño incorporada:** Permitió dosificar cloro líquido por goteo de manera controlada en los puntos de ingreso del flujo de agua.
- **Hipoclorito de calcio líquido:** Utilizado como trazador químico en sustitución temporal del gas cloro.
- **Reactivo DPD para cloro libre HANNA HI93701-01:** Permite la detección de cloro libre en agua mediante la observación del cambio de color a rosado en contacto con cloro.
- **Cronómetro digital:** Utilizado para el registro preciso de los tiempos de llegada del trazador a cada punto de medición.
- **Recipientes plásticos de muestreo:** Utilizados para la toma de muestras manuales en distintos puntos del sistema.
- **Hoja de campo y bolígrafo:** Para registrar observaciones, tiempos y resultados obtenidos durante la prueba.
- **Personal de apoyo de COSAALT R.L:** Participó en la operación controlada de válvulas y supervisión del procedimiento.

Procedimiento

1. Se realizó una prueba experimental para determinar el TRH total, dado que el agua tratada está destinada al consumo humano, se optó por el uso de cloro líquido como trazador, siguiendo criterios de seguridad sanitaria.
2. Se detuvo la dosificación de cloro gaseoso del sistema, garantizando que el agua en circulación fuera agua cruda sin presencia de desinfectante. Para la dosificación puntual del cloro, se utilizó un balde con caño inferior, permitiendo una dosificación continua por goteo del cloro al flujo de agua cruda.
3. El seguimiento del recorrido del cloro se realizó mediante pruebas de campo con el reactivo DPD para cloro libre que permite identificar la presencia del desinfectante mediante el cambio de color a rosado. Las muestras se tomaron cada 10 segundos en los puntos donde era posible hacerlo, observando el tiempo de llegada del cloro desde el punto de aplicación hasta cada unidad del sistema.
4. La prueba se llevó a cabo en cooperación con personal técnico de COSAALT y el operador de planta, manteniendo un caudal constante de 23,1 L/s durante toda la prueba.



Figura 25 Adición del trazador químico.

Fuente: Fotografía del autor.

Resultados obtenidos

El procedimiento se realizó en tres tramos consecutivos del proceso de tratamiento, con los siguientes resultados en la Tabla 9:

Tabla 9 Tiempo de retención hidráulico por el método de trazadores.

Tramo evaluado	Ubicación del trazador	Punto de detección	Tiempo de llegada
Canal de ingreso → Entrada a filtros	Canal de ingreso	Entrada a batería de filtros	1 minuto 10 segundos
Entrada a filtros → Salida de filtros	Entrada a batería de filtros	Salida de batería de filtros	48 minutos
Salida de filtros → Tanque de almacenamiento	Salida de batería de filtros	Entrada al tanque de almacenamiento	10 segundos

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el tiempo de retención hidráulico total de la planta, desde el ingreso hasta el tanque de almacenamiento, fue de aproximadamente 49 minutos con 20 segundos.

4.5.4. Tasa de filtración

Con el objetivo de analizar la variabilidad del funcionamiento hidráulico de la planta de tratamiento, se calcularon diferentes tasas de filtración para un conjunto de caudales que se observaron en la operación diaria en el tablero de control HMI, en función de la demanda de agua en la red o del manejo operativo por parte del personal de planta.

Datos

- **Número de filtros:** 9 unidades
- **Dimensiones de cada filtro:**
 - Ancho: 1,40 m
 - Largo: 1,60 m

Área de cada filtro:

$$A_f = 1,40 \text{ m} \times 1,60 \text{ m} = 2,24 \text{ m}^2$$

Área total de filtración (A_t):

$$A_t = 2,24 \text{ m}^2 \times 9 = 20,16 \text{ m}^2$$

Caudales considerados: 10 valores reales del tablero de control HMI.

La ecuación general para calcular la tasa de filtración es la Ec. 9.

$$\text{Tasa de filtración} = \frac{Q}{A_t} \quad (9)$$

Donde:

Tasa de filtración ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

Q: Caudal total (m^3/h)

A_t : Área total de filtración (m^2)

Como el caudal disponible se encuentra en L/s, primero se realiza la conversión a (m^3/h):

$$Q(\text{m}^3/\text{h}) = Q(\text{L/s}) \times 3.6$$

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla N° 10:

Tabla 10 Resultados de la tasa de filtración.

N°	Fecha	Caudal (L/s)	Caudal (m^3/h)	Tasa de filtración ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	Tasa de filtración ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)
1	15/1/2025	24,88	89,57	4,44	106,63
2	20/1/2025	19,55	70,38	3,49	83,79
3	23/1/2025	22,95	82,62	4,10	98,36
4	26/1/2025	14,80	53,28	2,64	63,43
5	29/1/2025	24,20	87,12	4,32	103,71
6	5/2/2025	26,25	94,50	4,69	112,50
7	12/2/2025	18,69	67,28	3,34	80,10
8	12/3/2025	23,95	86,22	4,28	102,64
9	7/3/2025	21,97	79,09	3,92	94,16
10	2/4/2025	24,60	88,56	4,39	105,43
PROMEDIO		22,18	79,86	3,96	95,07

Fuente: Elaboración propia.

4.5.5. Determinación de eficiencia de remoción

Se determinaron las eficiencias de remoción de turbiedad en los distintos procesos unitarios, así como la eficiencia global de la planta. El parámetro seleccionado para el cálculo fue la turbiedad, debido a que este representa de forma directa la cantidad de sólidos suspendidos en el agua, permitiendo así evaluar la capacidad de remoción de cada etapa del tratamiento.

Los puntos de muestreo definidos para este análisis fueron los siguientes:

- Entrada de la planta (canal de ingreso).
- Entrada a los filtros (salida de la etapa de coagulación).
- Salida de los filtros (punto de inyección de gas cloro).
- Tanque de almacenamiento final (salida de la planta).

Cabe destacar que la medición de la eficiencia de remoción se enfocó en las etapas donde era técnicamente viable y relevante hacerlo, dado el diseño específico de la planta y sus condiciones operativas.

El cálculo de la eficiencia se realizó aplicando la Ec. 10.

$$\text{Eficiencia(\%)} = \left(\frac{T_i - T_f}{T_i} \right) * 100 \quad (10)$$

Donde:

T_i = Turbiedad de entrada al proceso (NTU).

T_f = Turbiedad a la salida del proceso (NTU).

4.5.5.1. Pretratamiento

La unidad de pretratamiento en la Planta Potabilizadora de Alto SENAC está diseñada para interceptar residuos sólidos de gran tamaño como hojas, ramas, plásticos, trapos u otros elementos flotantes que puedan ser arrastrados por el agua cruda desde el río La Vitoria. Esta unidad cumple una función estrictamente mecánica de protección, evitando que estos materiales obstruyan o dañen los equipos y estructuras de las etapas posteriores del tratamiento.

Justificación Técnica para la Omisión del Cálculo de Eficiencia de Turbiedad

La turbiedad, definida como la dispersión de luz causada por partículas coloidales (0,001–1 μm) y suspendidas (1–1000 μm), no es afectada significativamente por procesos de cribado. Según Crittenden dispositivos como rejillas y coladores solo retienen materiales mayores a 1 mm, mientras que las partículas responsables de la turbiedad requieren coagulación-floculación para su remoción efectiva. (Crittenden et al. 2012, pág. 452).

Por ello, no se calculó la eficiencia de remoción de turbiedad en esta etapa, ya que las unidades de pretratamiento (rejillas, cribas) tienen como función principal la protección de equipos posteriores, no la reducción de sólidos finos. (AWWA, 2017 pág. 143)

4.5.5.2. Coagulación

La evaluación de la eficiencia de la coagulación se llevó a cabo midiendo la turbiedad antes y después del punto de dosificación del coagulante ubicado en la tubería posterior al pretratamiento. Sin embargo, al no contar la planta con una etapa de sedimentación, el coagulante no tiene un espacio donde los flóculos puedan sedimentarse, en cambio, estos son retenidos directamente en la filtración.

La aplicación de coagulación en la planta se efectuó en un número limitado de ocasiones, específicamente en tres fechas distintas durante el período de estudio. Esta selección obedeció a la necesidad de observar el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas específicas, en el marco de la fase de puesta en marcha de la planta. Dichas aplicaciones constituyeron pruebas experimentales orientadas a evaluar el tratamiento del agua con turbiedades superiores a las de diseño, fundamentadas en los resultados de las pruebas de jarras y de ensayos complementarios realizados en laboratorio utilizando filtros de papel.

En sistemas sin sedimentación, la coagulación no busca eliminar partículas en esa etapa, sino desestabilizar coloides para facilitar su retención en los filtros. Según la American Water Works Association (AWWA, 2017, pág. 215): "En plantas de filtración directa, la coagulación actúa como precondicionamiento químico, no como etapa de remoción. La eficiencia real se mide en la filtración, no en la coagulación". Por tanto, la baja eficiencia registrada en esta etapa no indica un mal desempeño, sino que obedece a la configuración

del sistema. La evaluación del efecto del coagulante se refleja de forma más significativa en la etapa de filtración.

Datos:

Turbiedad de entrada de la coagulación: $T_i = 18,50$ NTU

Turbiedad en la entrada de los filtros (salida de coagulación): $T_f = 18,20$ NTU

Aplicando la Ecuación 10 se tiene:

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Coag.}} = \left(\frac{18,50 \text{ NTU} - 18,20 \text{ NTU}}{18,50 \text{ NTU}} \right) * 100$$

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Coag.}} = \left(\frac{0,30 \text{ NTU}}{18,50 \text{ NTU}} \right) * 100$$

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Coag.}} = 1,62 \%$$

4.5.5.3. Filtración

La eficiencia de la filtración fue determinada mediante la comparación de la turbiedad medida en la entrada y salida de los filtros rápidos. Esta unidad constituye la etapa principal de remoción de partículas suspendidas en la planta, especialmente en ausencia de sedimentación. Los resultados obtenidos mostraron una disminución significativa de la turbiedad en esta etapa, representando la mayor eficiencia de remoción dentro del proceso general.

Datos

Turbiedad de entrada a los filtros: $T_i = 18,20$ NTU

Turbiedad a la salida de los filtros: $T_f = 1,59$ NTU

Aplicación de la ecuación 10:

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Fil.}} = \left(\frac{18,20 \text{ NTU} - 1,59 \text{ NTU}}{18,20 \text{ NTU}} \right) * 100$$

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Fil.}} = \left(\frac{16,61 \text{ NTU}}{18,20 \text{ NTU}} \right) * 100$$

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Fil.}}=91,26 \%$$

4.5.5.4. Desinfección

Para evaluar la eficiencia de la desinfección se determinó la remoción de coliformes termorresistentes mediante la comparación de las concentraciones microbiológicas registradas en el canal de entrada de agua cruda y en el tanque de almacenamiento, posterior a la cloración.

Los coliformes termorresistentes constituyen un indicador microbiológico crítico para el control de la calidad sanitaria del agua potable, por lo que su reducción efectiva es fundamental para verificar la eficiencia de la etapa de desinfección.

El cálculo de la eficiencia de remoción se realizó utilizando la siguiente Ecuación 11:

$$\text{Eficiencia}(\%) = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100 \quad (11)$$

Donde:

C_i = Concentración de coliformes termorresistentes antes de la desinfección (NMP/100 mL).

C_f = Concentración de coliformes termorresistentes después de la desinfección (NMP/100 mL).

Datos:

Concentración en la entrada de la planta

$$\circ C_i = 4,7 \times 10^1 \text{ NMP/100 mL}$$

Concentración en la salida de la planta

$$\circ C_f < 1 \text{ NMP/100 mL.}$$

Para efectos del cálculo y siguiendo el criterio establecido en la Norma Boliviana NB 512, se consideró $C_f = 1$ NMP/100 mL como valor de referencia máximo para representar el límite permisible de detección.

Aplicación de la Ec. 11 se determina la eficiencia del proceso de desinfección:

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Desinf.}} = \left(\frac{47-1}{47} \right) * 100$$

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Desinf.}} = \left(\frac{46}{47} \right) * 100$$

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Desinf.}} = 97,87 \%$$

La correcta dosificación de cloro gaseoso y el tiempo de contacto aseguraron una disminución significativa de los contaminantes microbiológicos presentes en el agua cruda.

4.5.5.5. Tanque de almacenamiento (Salida de planta)

Finalmente, se evaluó la eficiencia global de la planta mediante la comparación de la turbiedad del agua cruda en el canal de ingreso con la turbiedad del agua tratada medida en el tanque de almacenamiento. Esta comparación permite analizar el rendimiento total de la planta de tratamiento, considerando la acción conjunta de todas las unidades operativas.

Eficiencia general de la planta

Datos

Turbiedad a la entrada de la planta: $T_i = 18,50 \text{ NTU}$

Turbiedad a la salida de la planta (tanque de almacenamiento): $T_f = 1,60 \text{ NTU}$

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Gral.}} = \left(\frac{18,50 \text{ NTU} - 1,60 \text{ NTU}}{18,50 \text{ NTU}} \right) * 100$$

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Gral.}} = \left(\frac{16,90 \text{ NTU}}{18,50 \text{ NTU}} \right) * 100$$

$$\text{Eficiencia}(\%)_{\text{Gral.}} = 91,35 \%$$



Figura 26 Tanque de almacenamiento.

Fuente: Fotografía del autor.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DE LA INFRAESTRUCTURA DE LOS PROCESOS UNITARIOS

El presente análisis evalúa de forma visual la infraestructura y los principales equipos de la Planta Potabilizadora Alto SENAC, con base en las fichas de visita técnica realizadas durante su fase de arranque. A pesar de ser una instalación de reciente construcción, es fundamental corroborar que:

1. **La edificación y las estructuras civiles** (canales, cámaras, tanques, casetas) mantienen su integridad y cumplen con los requisitos dimensionados en el proyecto.
2. **Los sistemas mecánicos y de instrumentación** (dosificadores, bombas, válvulas, sensores) operan conforme a especificaciones, sin presentar fugas, corrosión o desgastes prematuros.
3. **Los servicios complementarios** (suministro eléctrico, ventilación, accesos) garantizan un entorno seguro y eficiente para la operación y el mantenimiento.

De manera general, las inspecciones indican que la mayoría de los componentes se encuentran en estado “Bueno”, con funcionamiento “Operativo”. No obstante, se identificó que el sistema de precloración está instalado, pero se encuentra inactivo. Asimismo, se ha implementado una modificación temporal en la dosificación de hidróxido de calcio, trasladando el punto de inyección al canal de ingreso de la planta, con el fin de mejorar la homogeneidad del ajuste de pH en situaciones de turbiedad fluctuante.

A continuación, este análisis se desglosa por cada proceso unitario, evaluando tanto la obra civil como los equipos y su estado de funcionamiento:

- **Pretratamiento**

Durante la visita técnica se constató que la infraestructura del canal de ingreso, las compuertas metálicas, válvulas de control, y el acoplamiento universal, presentan condiciones óptimas y sin evidencias de fugas, corrosión ni deformaciones, mas así se evidencio que se presentan grietas en el hormigón que fueron reparadas. Asimismo, los dispositivos de medición, como el sensor de nivel y el turbidímetro, instalados junto al

vertedero triangular, se encuentran funcionando correctamente, proporcionando datos continuos al sistema de control HMI de la planta. Cabe destacar que estos instrumentos, si bien están ubicados físicamente en esta sección, no forman parte del pretratamiento según lo establecido por la NB 689, ya que no intervienen en la remoción de sólidos, sino en el monitoreo de parámetros operativos. Sin embargo, en eventos extraordinarios, como el incremento estacional de turbiedad por lluvias, se recomienda reforzar las medidas de limpieza y mantenimiento de esta unidad para evitar saturaciones.

A pesar de que se realiza mantenimiento rutinario y se asegura la operatividad mecánica de los componentes, se identificó como área de mejora la falta de registros documentados de calibración de los equipos de medición, aspecto que podría comprometer la confiabilidad de los datos en el largo plazo.

Los detalles técnicos e infraestructura evaluada en esta unidad se encuentran documentados en la ficha de inspección técnica correspondiente, la cual ha sido incluida en los anexos del presente documento para respaldo y consulta complementaria.

- **Coagulación**

Durante las visitas técnicas realizadas a la Planta Potabilizadora Alto SENAC, se inspeccionó in situ el estado físico y operativo del sistema de coagulación, el cual se encuentra diseñado para activarse únicamente en condiciones de alta turbiedad en el agua cruda (mayores a 20 NTU). La evaluación visual permitió constatar que, aunque los componentes estructurales e hidráulicos están instalados conforme al diseño, existen aspectos técnicos y operativos relevantes a considerar.

Uno de los principales hallazgos fue el problema operativo recurrente en el sistema de dosificación de hidróxido de calcio, utilizado para el ajuste de pH. La bomba originalmente instalada para este propósito sufrió bloqueos mecánicos y daños debido a la presencia de partículas insolubles como grumos de cal, arena y otros sólidos, lo cual compromete su vida útil. Como resultado, el personal de operación implementó una modificación improvisada que consistió en derivar la solución de cal desde un tanque de PVC adaptado al canal de ingreso de la planta.

- **Filtración Rápida**

El sistema de filtración presenta un lecho filtrante de medio simple, compuesto por una capa de grava de 4–6 mm en la base y una capa superior de arena con tamaño efectivo de 0,5 mm, configuradas en cada uno de los filtros. La infraestructura evaluada durante la visita técnica del 13 de enero de 2025 evidenció un estado físico bueno y funcionamiento operativo, sin signos de obstrucción, deterioro o pérdida de estanqueidad en la estructura de los filtros.

La distribución del caudal hacia los filtros se realiza manualmente mediante columnas de maniobra equipadas con válvulas mariposa DN 200 y DN 100. Estas válvulas, así como las barras de prolongación para su accionamiento, se encuentran operativas; sin embargo, se identificó la necesidad de lubricación preventiva en dos columnas, observación que no compromete la funcionalidad general del sistema, pero debe considerarse dentro del programa de mantenimiento.

El procedimiento de retrolavado se ejecuta de forma ascendente por gravedad, utilizando únicamente agua. Este lavado se activa en función de criterios operativos determinados empíricamente por el personal de planta, debido a que no se dispone de manometría ni piezometría para monitorear la pérdida de carga. Si bien el sistema opera con normalidad, esta ausencia limita la capacidad lo cual representa una oportunidad de mejora operativa, particularmente en condiciones de alta turbiedad en época de lluvias.

Durante las operaciones normales se constató que el reparto de caudal entre los filtros es uniforme, regulado manualmente por el operador a través de las columnas de maniobra. La calidad del agua filtrada es verificada mediante controles de parámetros de calidad mínima, lo que permite validar el desempeño de esta etapa. El sistema de acceso, conformado por barandas metálicas y planchas antideslizantes, también se encuentra en buen estado y garantiza condiciones adecuadas de operación y seguridad.

La información detallada del estado físico, condiciones operativas y observaciones técnicas de esta unidad ha sido documentada en la ficha técnica de visita, la cual se incluye como respaldo en los anexos.

- **Desinfección**

Durante las visitas técnicas se verificó que el sistema de desinfección final se encuentra completamente instalado y operativo, cumpliendo con los requisitos técnicos mínimos establecidos en la Norma Boliviana NB 689 (Volumen 2, Capítulo 7). El sistema incluye: cloradores tipo Hydro, bombas eyectoras, manifold hidráulico, cilindros de cloro de 68 kg, básculas para control de consumo, así como equipamiento de seguridad (detector de fugas, ventilador extractor, ducha lavaojos, sistema de respiración autónomo y kit de emergencia).

El control de dosificación se realiza de forma manual, ajustando la tasa de inyección según los resultados obtenidos con un colorímetro portátil HANNA HI701, buscando mantener los niveles de cloro residual dentro del rango normativo definido por la NB 512:2013, que establece valores entre 0,2 y 1,5 mg/L. Las mediciones en campo han mostrado que se cumplen regularmente estos valores, validando la eficacia del sistema.

- **Evaluación de la línea de precloración no utilizada**

Si bien la planta cuenta con una infraestructura de precloración instalada y en condiciones operativas, se evidenció que esta unidad no está en uso actualmente. El equipo técnico de COSAALT R.L., ha tomado la decisión de prescindir de su utilización bajo las condiciones operativas actuales, y esta elección responde tanto a consideraciones técnicas como económicas.

Desde el punto de vista técnico, según la NB 689 (2013), Volumen 2, Capítulo 7, la precloración es recomendada especialmente en sistemas donde el agua cruda presenta elevadas cargas de materia orgánica o microbiológica, o cuando no existen procesos intermedios que garanticen una remoción eficiente de estos contaminantes. En el caso de la planta Alto SENAC, el agua cruda proveniente del río La Vitoria se encuentra generalmente dentro del rango de diseño de hasta 20 NTU, la combinación de coagulación, filtración rápida ha demostrado ser suficiente para reducir la turbiedad y la carga microbiológica.

En cuanto al criterio económico-operativo, el personal técnico manifestó que el uso simultáneo de precloración y desinfección final con gas cloro implica un mayor consumo

de reactivo, lo que incrementa significativamente los costos de operación y exige una manipulación más frecuente del gas cloro, elevando también los riesgos asociados a su uso. Dado que los niveles de cloro residual logrados con la desinfección final son adecuados y cumplen la normativa vigente, se consideró no justificado implementar una etapa adicional de desinfección en condiciones normales.

Esta práctica, reduce el riesgo de formación de subproductos de desinfección como trihalometanos (THM), los cuales pueden generarse cuando el cloro reacciona con la materia orgánica natural, especialmente si se aplica en una etapa temprana del tratamiento. Por tanto, la decisión de omitir la precloración resulta coherente con los principios de seguridad sanitaria, eficiencia operativa y sostenibilidad económica.

No obstante, se sugiere mantener en condiciones operativas la infraestructura de precloración, de forma que pueda activarse en situaciones excepcionales, como en eventos de lluvias intensas o contaminación accidental del río La Vitoria, tal como recomienda la NB 689 bajo el principio de operación flexible.

La evaluación completa del sistema de desinfección, incluyendo sus componentes, condiciones y observaciones específicas, fue registrada en la ficha técnica de la visita, la cual ha sido incorporada como anexo en este documento, sirviendo como respaldo documental del análisis realizado.

- **Tanque de Almacenamiento**

El tanque de almacenamiento no constituye un proceso unitario convencional en el tratamiento del agua, su análisis resulta indispensable al formar parte de la infraestructura crítica para el cumplimiento de los objetivos sanitarios y operativos de la planta. El tanque representa el último eslabón del sistema de tratamiento, permitiendo la regulación del caudal tratado y la entrega segura a la red de distribución.

Durante las visitas técnicas realizadas, se constató que el tanque de almacenamiento se encuentra construido en hormigón armado H-25, con una capacidad volumétrica de 400 m³. La estructura fue evaluada visualmente y presenta un estado físico general bueno, sin evidencias de filtraciones activas, aunque se identificaron fisuras menores en sus paredes, las cuales ya han sido tratadas con sellador impermeabilizante. Este tipo de mantenimiento

es coherente con las recomendaciones de la NB 689 (Vol. 2), que establece la necesidad de garantizar condiciones de estanqueidad en los componentes de almacenamiento.

La impermeabilización del tanque está constituida por una capa de cartón asfáltico, la cual se encuentra en buenas condiciones. No obstante, como parte de las recomendaciones técnicas formuladas, se sugiere realizar inspecciones semestrales para verificar su integridad.

En cuanto a los componentes hidráulicos, el sistema cuenta con un conjunto de válvulas mariposa, válvulas ventosas, válvulas de retención, codos, reducciones y tees, todos fabricados en acero al carbono o materiales FFD, los cuales mostraron estado funcional operativo y ausencia de corrosión visible. Cabe destacar que las válvulas presentan condiciones adecuadas de funcionamiento, sin obstrucciones ni fugas, aunque se recomendó programar lubricación preventiva cada tres meses como parte del plan de mantenimiento rutinario.

Asimismo, se verificó la presencia de un sistema de ventilación pasiva mediante válvulas ventosas, lo cual garantiza la protección estructural del tanque ante variaciones de presión internas. No se evidenciaron problemas de sedimentación ni taponamiento en las conexiones del sistema, lo que refuerza el correcto diseño hidráulico del mismo.

Su estado actual es adecuado para la operación continua de la planta, aunque su buen desempeño a largo plazo dependerá de la continuidad del mantenimiento preventivo y del seguimiento de las recomendaciones emitidas. La ficha técnica detallada de la visita de inspección correspondiente a este componente se incluye en los anexos del presente documento como respaldo documental.

5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CALIDAD DEL AGUA

Durante la evaluación del funcionamiento de la Planta Potabilizadora de Alto SENAC, se analizaron los parámetros de control mínimo establecidos por la Norma Boliviana NB 512, 2018. Estos parámetros fueron evaluados en distintos puntos del proceso con el objetivo de verificar el cumplimiento de los límites establecidos por la normativa vigente y determinar la eficiencia en cada etapa del tratamiento.

A partir de las diez campañas de muestreo realizadas entre enero y abril de 2025, se calcularon los valores promedio de cada parámetro en los cuatro puntos críticos de los procesos unitarios presentes en el anexo.

5.2.1. Análisis del cumplimiento de los parámetros de control mínimo

Se consideran los resultados promedio en el punto final de salida de la planta, el cual refleja el rendimiento combinado de las etapas de coagulación, filtración y desinfección. A continuación, se presenta la Tabla 11, seguida de un análisis detallado de cada parámetro desde el punto de vista técnico y normativo.

Tabla 11. Comparación de parámetros de calidad del agua tratada con la Norma NB 512.

Parámetro	Unidad	Valor promedio	Límite NB 512	Margen sobre límite
Cloro residual	mg/L	0,70	0,20 – 1,50	+0,50 sobre mínimo
Conductividad	μS/cm	24,89	≤ 1 500	–1 475,11 (amplio margen)
pH	–	6,95	6,5 – 9,0	+0,45 sobre límite inferior
Temperatura	°C	17,18	“Aceptable”	En rango ideal
Turbiedad	NTU	1,16	≤ 5	–3,84 (muy por debajo)

Fuente: Elaboración propia.

- **Cloro residual:** El resultado promedio, evidencia un control estable del sistema de dosificación y una protección microbiológica adecuada sin excesos que puedan derivar en formación de subproductos de desinfección.
- **Conductividad eléctrica:** Con un valor promedio casi sesenta veces inferior al máximo normativo, el agua tratada mantiene una extrema pureza iónica, reflejando la muy baja mineralización del agua tratada. El amplio margen frente al límite de 1 500 μS/cm indica que la incorporación de iones procedentes de reactivos es mínima. Desde el punto de vista de operación, permite considerar estrategias de

reducción de dosis de coagulante para optimizar costos, sin que ello comprometa la calidad final.

- **pH:** El pH promedio cercano a 7,0 asegura condiciones favorables tanto para la estabilidad del cloro residual como para la minimización de corrosión en la red de distribución. No obstante, su ubicación próxima al límite inferior (6,5) revela una ligera tendencia a la acidificación, implicando elevar la concentración uso de hidróxido de calcio para estabilizar el pH óptimo para el consumo humano y prolongando la vida útil de las tuberías.
- **Turbiedad:** La turbiedad final promedio de 1.16 NTU, inferior a la cuarta parte del rango admisible de la normativa, confirma una alta eficiencia de la planta a través de los procesos unitarios.
- **Temperatura:** Con un promedio de 17,18 °C, la temperatura del agua tratada se ubicó en un rango óptimo para el consumo y para la eficacia de los procesos de coagulación y desinfección. Las pequeñas variaciones observadas reflejan más bien las condiciones climáticas locales que cualquier alteración propia del tratamiento.

Los valores promedio demuestran que la Planta Alto SENAC opera de manera consistente dentro de los parámetros de la NB 512. El análisis integrado de descripción y comparación normativa evita solapamientos y facilita la identificación de oportunidades de mejora, especialmente en el ajuste de pH y en la optimización de la dosificación alcalina.

5.2.2. Verificación de Resultados mediante Análisis Comparativo COSAALT-CEANID

La validación de resultados mediante la comparación de resultados entre los laboratorios de la Planta de tratamiento de Agua Potable de Tabladita y el CEANID, realizada el 2 de mayo de 2025, permite garantizar la confiabilidad y la precisión analítica de los datos obtenidos en campo ya que las diferencias observadas son mínimas y se limitan a variaciones decimales dentro del margen de error instrumental.

Los valores medidos por ambas entidades se presentan en la Tabla 12.

**Tabla 12 Comparación de resultados entre los laboratorios de COSAALT vs.
CEANID.**

Punto de Muestreo	Parámetro	Valor Medido en COSAALT	Valor Medido en CEANID	Discrepancia	Interpretación
Entrada a la Planta	Conductividad (μS/cm)	21,03	21,33	0,30 μS/cm (1,43%)	Variación dentro del error de conductivímetros portátiles (±2%).
	pH	7,26	7,24	0,02 (0,28%)	Diferencias menores al error estándar de pH-metros (±0.1 unidades).
	Temperatura (°C)	14,20	24,9	10,7°C (75,35%)	Discrepancia atribuible a horarios de muestreo o exposición ambiental.
Punto de Muestreo	Parámetro	Valor Medido en COSAALT	Valor Medido en CEANID	Discrepancia	Interpretación
Entrada a la Planta	Turbiedad (NTU)	15,80	15,5	0,3 NTU (1,90%)	Coherencia dentro del margen de error de turbidímetros portátiles (±2 NTU).
	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	No analizado	47	-	Validación externa de contaminación microbiológica en agua cruda.
	Cloro Residual (mg/L)	0,50	0,48	0,02 mg/L (4,00%)	Variación aceptable para métodos colorimétricos (<5%).
	Conductividad (μS/cm)	16,21	16,62	0,41 μS/cm (2,53%)	Diferencias dentro del error instrumental (±2%).
	pH	6,75	6,41	0,34 (5,04%)	Desviación atribuible a calibración de equipos.
Salida de la Planta	Temperatura (°C)	14,50	24,9	10,40°C (71,72%)	Discrepancia atribuible a horarios de muestreo o exposición ambiental.
	Turbiedad (NTU)	0,38	0,38	0 NTU (0%)	Exactitud en la medición de agua tratada.
	Coliformes termotolerantes (UFC/100 mL)	No analizado	<1	-	Confirmación de desinfección efectiva (<1 UFC/100 mL).

Fuente: Elaboración propia.

La tabla evidencia que las discrepancias entre COSAALT y CEANID son menores al 5% en parámetros clave como cloro residual y turbiedad, y menores al 2% en conductividad y pH. Estas variaciones se deben a varios factores entre ellos tenemos: Factores operativos de errores y márgenes de error instrumental.

La comparación entre laboratorios demuestra que los resultados obtenidos por el laboratorio de Tabladita son técnicamente válidos y confiables.

5.2.3. Ensayo de Pruebas de Jarras

En el presente apartado se analizan las nueve pruebas de jarras realizadas en laboratorio con distintas turbiedades iniciales correspondientes y concentraciones de coagulante sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

El objetivo fue comprobar que, al ajustar dosis de sulfato de aluminio y cal según la turbiedad del agua cruda, se logre reducir la turbiedad residual por debajo del límite máximo permisible (5 NTU) y mantener el pH final dentro del rango aceptable (6,5–9,0) establecido por la Norma Boliviana NB 512.

Tabla 13 Resultados de pruebas de jarras.

Fecha Muestreo	Turbiedad inicial (NTU)	pH inicial	Conc. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (mg/L)	Conc.5 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (mg/L)	Turbiedad final (NTU)	pH final
26/01/2025	625	7,20	100	80	3,84	6,90
28/01/2025	150	7,03	250	437,5	0,96	8,83
12/02/2025	45,3	8,65	20	32,5	2,34	6,53
17/02/2025	18,4	6,05	100	75	3,76	6,53
18/02/2025 (1)	288	8,00	50	87,5	2,05	7,22
18/02/2025 (2)	737	7,85	50	62,5	0,99	6,65
03/03/2025 (1)	119	7,00	50	225	4,00	8,99
03/03/2025 (2)	52,6	8,63	50	12,5	4,71	7,36
09/03/2025	63,8	8,26	22,5	35	3,49	6,70

Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas confirman que, mediante ajustes en la dosis de sulfato de aluminio e hidróxido de calcio se logra una turbiedad final < 5 NTU con pH dentro de rango normativo, incluso cuando la turbiedad inicial supera ampliamente el umbral de diseño (20 NTU).

El ensayo del 17/2/2025, con una turbiedad inicial de 18.4 NTU, dosis de 100 mg/L de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y 75 mg/L de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Este resultado sugiere que, para aguas con turbiedad baja (< 20 NTU), el uso de coagulante en dosis altas no solo es innecesario, sino contraproducente. Los resultados de aguas con alta turbiedad validan plenamente el uso de coagulantes en dosis moderadas (50 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), logrando una eficiencia del 99.87%.

El pH final en ocho de nueve casos se ubicó dentro del rango 6,5–9,0. En ningún caso el pH descendió por debajo de 6,5 ni excedió 9,0 de forma prohibitiva.

Cuando el pH final estuvo próximo al límite superior (8,83 en el 28/01/2025), la remoción de turbidez fue excelente (0,96 NTU), pero puede generar consumo excesivo de reactivo alcalino y dificultades en el control del pH aguas abajo.

Ensayo de filtración con papel filtro

El ensayo de filtración con papel filtro mostró que para turbiedades iniciales por debajo de 20 NTU, la filtración simple reducía la turbidez a valores cercanos a 5 NTU (casi cumpliendo NB 512), pero no fue efectiva para turbiedades superiores a 50 NTU.

Esto sugiere que, durante eventos de turbiedad baja (p. ej., aguas claras en invierno), la planta podría optar por minimizar o suspender temporalmente la dosificación de reactivos, confiando en la filtración rápida para cumplir con NB 512, siempre y cuando se lleve a cabo un retrolavado frecuente y riguroso.

5.3. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES

5.3.1. Análisis de Caudales Registrados

Los caudales de entrada y salida de la Planta Potabilizadora Alto SENAC, registrados desde el tablero de control HMI, promedian 22,18L/s y 11,01L/s respectivamente. El caudal de salida, representa el consumo poblacional. La operación de la planta no es constante la producción se ajusta a la demanda, lo que explica la diferencia entre caudales

de entrada y salida, sin indicar fugas. Las horas pico de consumo se identifican típicamente entre las 6:00-8:00 a.m. y 18:00-20:00 p.m.

Tabla 14 Caudales de entrada y salida de la planta

Nº	Fecha	Hora	Turbiedad entrada (NTU)	Caudal de entrada (L/s)	Caudal de salida (L/s)
1	15/1/2025	8:00 a. m.	1,62	24,88	13,68
2	20/1/2025	8:30 a. m.	18,5	19,55	10,75
3	23/1/2025	8:40 a. m.	12,3	22,95	11,48
4	26/1/2025	8:30 a. m.	80,1	14,80	7,10
5	29/1/2025	10:00 a. m.	4,68	24,20	12,10
6	5/2/2025	9:00 a. m.	1,33	26,25	11,03
7	12/2/2025	9:00 a. m.	35,9	18,69	8,41
8	12/3/2025	10:00 a. m.	2,43	23,95	11,26
9	7/3/2025	8:00 a. m.	27,1	21,97	13,18
10	2/4/2025	8:05 a. m.	15,8	24,60	11,07
PROMEDIO			19,98	22,18	11,01

Fuente: Elaboración propia.

Con un caudal de salida promedio de 11,01L/s (equivalente a 951.264 L/d) se estima que la planta atiende actualmente a 4756 habitantes aproximadamente. La planta fue diseñada para un caudal de 25L/s y una población de 10800 habitantes para el año 2035. El caudal actual (11,01L/s) representa aproximadamente el 44% del caudal de diseño, indicando una capacidad holgada para la demanda futura.

El análisis de la operación revela que en días con turbiedades de entrada elevadas, la planta tendió a operar con un caudal de entrada menor. Esta estrategia busca optimizar la eficiencia de remoción de partículas al aumentar el tiempo de contacto en las unidades de proceso, asegurando la calidad del agua tratada ante condiciones desafiantes del afluente.

5.3.2. Calibración y verificación del vertedero triangular

El vertedero triangular instalado en la planta Alto SENAC (ángulo de 90°) fue calibrado empíricamente para asegurar que las lecturas de caudal mostradas en el HMI (basadas en la fórmula teórica ($Q=C \times H^{5/2}$) correspondieran con la realidad hidráulica del canal de ingreso. A partir de los aforos volumétricos, se obtuvo la ecuación recalibrada:

$$Q=1,1252 \times H^{2,2476}$$

En términos generales, cinco de las siete alturas calibradas presentan un error relativo inferior al 5 %. El sensor de nivel está calibrado correctamente en el rango 3 cm–18 cm.

5.3.3. Retrolavado de filtros

El aforo volumétrico realizado sobre uno de los filtros permitió estimar el caudal promedio de lavado, así como evaluar la cantidad de agua utilizada por operación de retrolavado.

- **Caudal utilizado**

El caudal promedio registrado fue de 24,67 L/s, considerando un tiempo promedio de lavado de 9 minutos, se determinó que un solo filtro utiliza aproximadamente 13,32 m³ de agua por lavado. Al tratarse de una batería de filtros, se estima que la operación de lavado completa demanda alrededor de 119, 88 m³ diarios, si se realiza un lavado por día. Esta cantidad representa cerca del 5,55 % del caudal diario de tratamiento de la planta (caudal de diseño: 25 L/s; volumen diario tratado: 2160 m³). Si bien este consumo puede considerarse aceptable en plantas de filtración rápida, el hecho de que el agua empleada para el lavado no es recuperada y se descarga directamente a la quebrada representa una pérdida técnica.

- **Tasa de lavado**

La tasa de lavado alcanzada durante el aforo fue de aproximadamente 0,67 m/min. Comparado con los parámetros establecidos en la Norma Boliviana NB 689 Volumen 2, que recomienda una tasa de 0,7 a 1,0 m/min para filtros rápidos con lavado solo con agua, el valor observado se encuentra ligeramente por debajo del rango mínimo sugerido.

Una tasa de lavado inferior al umbral mínimo puede no generar la expansión adecuada del lecho filtrante (25 – 30 %), afectando la remoción efectiva de partículas acumuladas en la grava y la arena. Esto podría provocar una acumulación progresiva de sedimentos, una reducción de la capacidad filtrante, y un incremento en la pérdida de carga en los filtros, con potencial impacto sobre la eficiencia del proceso y la calidad del agua producida.

El aforo realizado permitió estimar de manera práctica y confiable el caudal y volumen de agua empleados en el retrolavado de filtros de la planta Alto SENAC. Si bien el sistema cumple funcionalmente con su objetivo, se identificó que la tasa de lavado actual está apenas por debajo del umbral mínimo recomendado por la NB 689, lo que podría comprometer la eficiencia de limpieza a largo plazo.

5.3.4. Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico (TRH) corresponde al período que el agua permanece dentro del sistema de tratamiento, desde su ingreso hasta su salida. Este parámetro es fundamental para asegurar que los procesos de coagulación, filtración y desinfección tengan la duración necesaria para ser efectivos.

Se utilizó cloro líquido como trazador, siguiendo un procedimiento estandarizado con reactivo DPD para identificar la presencia del marcador en distintos puntos del sistema.

Los tiempos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 15 Resumen de resultados del TRH.

Tramo evaluado	Tiempo de llegada
Canal de ingreso → Entrada a filtros	1 minuto 10 segundos
Entrada a filtros → Salida de filtros	48 minutos
Salida de filtros → Tanque de almacenamiento	10 segundos
Total	49 minutos con 20 segundos

Fuente: Elaboración propia.

El TRH obtenido evidencia un diseño hidráulico funcional, sin zonas muertas aparentes ni desplazamientos anómalos del flujo. Sin embargo, es recomendable implementar monitoreos periódicos del TRH utilizando diferentes condiciones de caudal, especialmente en época de lluvias o durante variaciones operativas, con el fin de verificar la estabilidad del comportamiento hidráulico a largo plazo.

5.3.5. Tasa de filtración

Los caudales evaluados corresponden a registros operativos reales observados durante las jornadas de aforo y operación diaria, los cuales oscilan entre 14,80 L/s y 24,60 L/s, reflejando variaciones habituales por condiciones de turbiedad y demanda en red.

De los resultados obtenidos, se observa que:

- Las tasas fluctúan entre 63,43 y 112,50 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$
- El valor promedio de 95,07 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ se encuentra por debajo del mínimo recomendado por la NB 689, incluso en los valores más bajos del rango medio.

Esto indica que la planta opera con tasas de filtración conservadoras, es decir, por debajo del límite inferior sugerido. Desde el punto de vista operativo, esto puede tener implicancias tanto positivas como negativas:

Ventajas:

- Mayor eficiencia de remoción de turbiedad, dado que el agua tiene más tiempo de contacto con el medio filtrante.
- Menor frecuencia de retrolavados prolongando la vida útil del lecho filtrante y reduciendo costos operativos.
- Mayor estabilidad en situaciones de alta turbiedad, donde se requiere un mayor tiempo de paso para garantizar la calidad del agua.

Desventajas:

- Subutilización del sistema: los filtros están operando por debajo de su capacidad potencial, lo cual puede ser relevante si aumenta la demanda en el futuro.
- Mayor volumen de infraestructura por unidad de agua tratada, lo que puede representar un sobredimensionamiento operativo.

La tasa de filtración promedio registrada en la planta de tratamiento Alto SENAC es de 3,96 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, equivalente a 95,07 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$, un valor técnicamente funcional, pero inferior

al rango medio establecido por la NB 689. Esto indica una operación conservadora, priorizando la calidad del tratamiento sobre el rendimiento hidráulico máximo.

Este enfoque puede considerarse positivo en la fase inicial de puesta en marcha y validación del sistema, permitiendo la flexibilidad para manejar aumentos de demanda o turbiedad, especialmente en contextos de crecimiento poblacional o mayor demanda de agua potable.

5.3.6. Eficiencia de remoción

5.3.6.1. Pretratamiento

Desde un punto de vista operacional e hidráulico, la eficiencia de esta unidad no puede ser evaluada en términos de reducción de turbiedad, ya que las partículas responsables de esta (en su mayoría coloidales y de tamaños menores a 1 mm) no son retenidas en el proceso de cribado. Esta realidad técnica fue confirmada durante los muestreos, donde se observó que la turbiedad del agua antes y después del pretratamiento se mantenía prácticamente constante, sin una reducción cuantificable. Es técnicamente justificable ya que la norma boliviana NB 689 (Vol. 2, Cap. 5) clasifica el pretratamiento como un proceso de protección, no sujeto a métricas de calidad.

Pese a no participar directamente en la mejora de parámetros como la turbiedad o los coliformes, su presencia garantiza un entorno operativo seguro y estable, lo que sí influye indirectamente en la eficiencia de todo el sistema, al evitar cargas innecesarias o daños estructurales en componentes sensibles como bombas dosificadoras, válvulas mariposa, filtros o inyectores de cloro.

5.3.6.2. Coagulación

La coagulación en la Planta Alto SENAC diseñada sin una etapa intermedia de sedimentación, los flóculos desestabilizados por el coagulante pasan directamente a la etapa de filtración. Esto implica que la eficiencia de remoción de turbiedad en coagulación, expresada como reducción porcentual de NTU, debe interpretarse como un preacondicionamiento químico más que como una etapa de remoción definitiva (AWWA, 2017, pág. 215).

A continuación, se resumen los resultados de eficiencia obtenidos en las fechas de aplicación del coagulante:

Tabla 16 Resultados de eficiencia de coagulación.

Fecha	Turbiedad entrada (NTU)	Turbiedad salida (NTU)	Eficiencia de coagulación (%)
20/01/2025	18,50	18,20	1,62
27/01/2025	80,10	79,85	1,39
12/02/2025	35,90	35,85	0,14

Fuente: Elaboración propia.

La baja eficiencia se explica porque, al no realizarse sedimentación, la mayor parte de las partículas coloidales y finas permanece en suspensión hasta llegar a los filtros.

Los resultados de eficiencia de coagulación (1,62 %, 0,56 % y 0,14 %) reflejan el comportamiento esperado en un sistema de filtración directa sin sedimentación, muestra que esta etapa cumple su función de preacondicionamiento químico en un sistema de filtración directa, sin pretender una remoción significativa de turbiedad.

5.3.6.3. Filtración

La filtración representa uno de los procesos más importantes en la Planta Potabilizadora de Alto SENAC, debido a que es la unidad encargada de retener la mayor cantidad de partículas que no fueron removidas en las etapas anteriores, especialmente porque la planta no cuenta con un proceso de sedimentación. En este tipo de configuración denominada “filtración directa”, los filtros cumplen un rol fundamental en la clarificación del agua, funcionando como la principal barrera física para eliminar los sólidos suspendidos.

Se analizaron 10 datos de eficiencia de remoción de turbiedad, comparando los valores antes y después del paso por los filtros. Para tener una mejor comprensión del comportamiento del sistema, se agruparon los datos en dos escenarios:

Tabla 17 Eficiencia de la filtración.

Fecha	Turbiedad entrada (NTU)	Turbiedad salida (NTU)	Eficiencia (%)
15/1/2025	1,56	0,40	74,36%
20/1/2025	18,20	1,59	91,26%
23/1/2025	12,30	1,85	84,96%
26/1/2025	79,85	2,91	96,36%
29/1/2025	4,68	1,48	68,38%
5/2/2025	1,33	0,30	77,44%
12/2/2025	35,85	1,08	96,99%
12/3/2025	2,43	0,31	87,24%
7/3/2025	27,11	1,24	95,43%
2/4/2025	15,79	0,38	97,59%
PROMEDIO	19,91	1,15	87,00%

Fuente: Elaboración propia.

- **Días con turbiedad de entrada baja (≤ 5 NTU)**

En los días con turbiedad relativamente baja, la eficiencia promedio observada fue de 76,86 %, con un rango que osciló entre 68,38 % y 87,24 %. Estos valores evidencian que la eficiencia de remoción disminuye en condiciones de agua más limpia. Este comportamiento es técnicamente esperable, ya que cuando la carga de partículas es baja, el medio filtrante retiene una menor cantidad de sólidos, y la diferencia entre las turbiedades de entrada y salida se reduce, lo cual afecta el valor porcentual de eficiencia.

En días con baja turbiedad se observa que el lavado de filtros se realiza con menor frecuencia (cada dos días), lo cual puede influir ligeramente en la acumulación de partículas finas y afectar la eficiencia general.

- **Días con turbiedad de entrada alta (> 5 NTU)**

Durante los días con turbiedades de entrada elevadas, la eficiencia de remoción alcanzó promedios más altos, con un valor medio de 93,76 %, y valores máximos de hasta 97,59 %. Este comportamiento evidencia la alta capacidad de los filtros para retener sólidos en suspensión cuando la coagulación es efectiva y el sistema opera con mayor frecuencia de lavado. Este rendimiento es muy positivo, ya que indica que el sistema de

filtración responde eficazmente ante condiciones exigentes y garantiza la calidad del agua final.

- **Promedio general**

Considerando todos los muestreos, la eficiencia global de la filtración fue de 87,00 %, lo que confirma que el sistema trabaja adecuadamente dentro de los estándares esperados para plantas de filtración directa.

La NB 689 Volumen 2 no establece un valor exacto mínimo de eficiencia, pero sí da referencia a la calidad del agua de salida. Dado que en todos los casos analizados el agua después de los filtros presentó turbiedad inferior a los 5 NTU (e incluso en muchos casos <2 NTU), se concluye que el proceso cumple con la normativa y que la planta trabaja dentro de sus parámetros técnicos.

El análisis de eficiencia de remoción en la etapa de filtración muestra que la planta opera con un alto nivel de rendimiento técnico, especialmente en condiciones de mayor turbiedad. Aunque en días con baja carga de sólidos la eficiencia parezca menor, el agua sigue cumpliendo con los estándares de calidad establecidos en la NB 512, lo cual valida el buen funcionamiento de los filtros.

5.3.6.4. Desinfección

La desinfección es la última y más crítica etapa del proceso de potabilización, encargada de inactivar microorganismos patógenos presentes en el agua, asegurando así su calidad sanitaria para el consumo humano.

Tabla 18 Eficiencia de remoción de la desinfección

Fecha	Coliformes (entrada) (NMP)	Coliformes (salida) (NMP)	Eficiencia de coagulación (%)
2/4/2025	47	1	97,87

Fuente: Elaboración propia.

El resultado obtenido en la prueba de remoción de coliformes termotolerantes arrojó una eficiencia de desinfección del 97,87 %, lo cual refleja un desempeño altamente favorable. Este valor no solo cumple con los requisitos establecidos por la Norma Boliviana NB 512,

que exige la ausencia de coliformes termorresistentes en 100 mL de agua tratada, sino que también evidencia una operación correctamente ajustada del sistema de cloración.

La alta eficiencia es indicadora que en las etapas anteriores al proceso de desinfección están cumpliendo su función, ya que una menor carga de sólidos y materia orgánica favorece la acción del cloro. Esto permite utilizar una dosis controlada, evitando el uso excesivo de desinfectante.

La evaluación realizada demuestra que la etapa de desinfección de la Planta es eficiente y operativamente estable, asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos para el agua potable.

5.3.6.5. Eficiencia general de la planta

En la Planta Potabilizadora Alto SENAC, el valor promedio de eficiencia global alcanzado fue de 86,88 %, mientras que, en una de las jornadas de medición, bajo condiciones representativas, se obtuvo una eficiencia puntual de 97,59 %. Estos resultados muestran que el sistema tiene un comportamiento hidráulico y operativo eficiente, incluso en condiciones de variabilidad moderada de la calidad del agua cruda.

Tabla 19 Eficiencia de remoción general de la planta.

Fecha	Caudal de entrada (L/s)	Turbiedad entrada (NTU)	Turbiedad salida (NTU)	Eficiencia General (%)
15/1/2025	24,88	1,62	0,48	70,37%
20/1/2025	19,55	18,50	1,6	91,35%
23/1/2025	22,95	12,30	1,9	84,55%
26/1/2025	14,80	80,10	2,9	96,38%
29/1/2025	24,20	4,68	1,46	68,80%
5/2/2025	26,25	1,33	0,26	80,45%
12/2/2025	18,69	35,90	1,09	96,96%
12/3/2025	23,95	2,43	0,32	86,83%
7/3/2025	21,97	27,10	1,23	95,46%
2/4/2025	24,60	15,80	0,38	97,59%
PROMEDIO	22,18	19,98	1,16	86,88%

Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista técnico, una eficiencia global superior al 85 % es considerada favorable para sistemas de filtración directa sin sedimentación intermedia, como es el caso de esta planta. Este valor también evidencia que la planta opera dentro de un rango

aceptable según referencias de la literatura técnica (AWWA, 2017; Crittenden et al., 2012), y que la calidad del agua tratada cumple los criterios de la Norma Boliviana NB 512, lo cual es fundamental para la protección de la salud pública.

El análisis de la eficiencia general, con un promedio de 86,88 % y un rango entre 68,8 % y 97,6 %, permite verificar que la planta cumple y supera las expectativas de diseño. Según los criterios de concepción, la unidad fue proyectada para tratar aguas con turbiedades de hasta 20 NTU; sin embargo, durante el periodo de evaluación se registraron episodios de entrada de hasta 80,10 NTU, en los que la planta mantuvo un comportamiento estable y eficiente, alcanzando eficiencias de remoción superiores al 95 % y entregando turbiedades de salida dentro de los límites de la NB 512. Desde el punto de vista hidráulico, este resultado fue posible gracias a la reducción de caudal implementada en condiciones críticas (14–19 L/s), lo que incrementó el tiempo de retención hidráulica (TRH) en la zona de coagulación-floculación y disminuyó la tasa de filtración superficial en los filtros, evitando sobrecargas hidráulicas y pérdida prematura de carga en el lecho granular. En paralelo, el ajuste en la dosificación de coagulante y la ejecución de lavados oportunos garantizaron la formación de flóculos de mayor densidad y la preservación de la capacidad de retención del medio filtrante. Esto valida que la planta es hidráulicamente estable y eficiente frente a variaciones de calidad del agua cruda, lo que asegura un funcionamiento correcto y confiable en escenarios más exigentes que los considerados originalmente en su diseño.

La eficiencia global puede variar dependiendo de factores operativos como el caudal de ingreso, el ajuste de la dosis de coagulante y las condiciones de los filtros. Por tanto, mantener esta eficiencia requiere una gestión continua y un monitoreo operativo riguroso, durante eventos de turbiedad alta en el agua cruda.

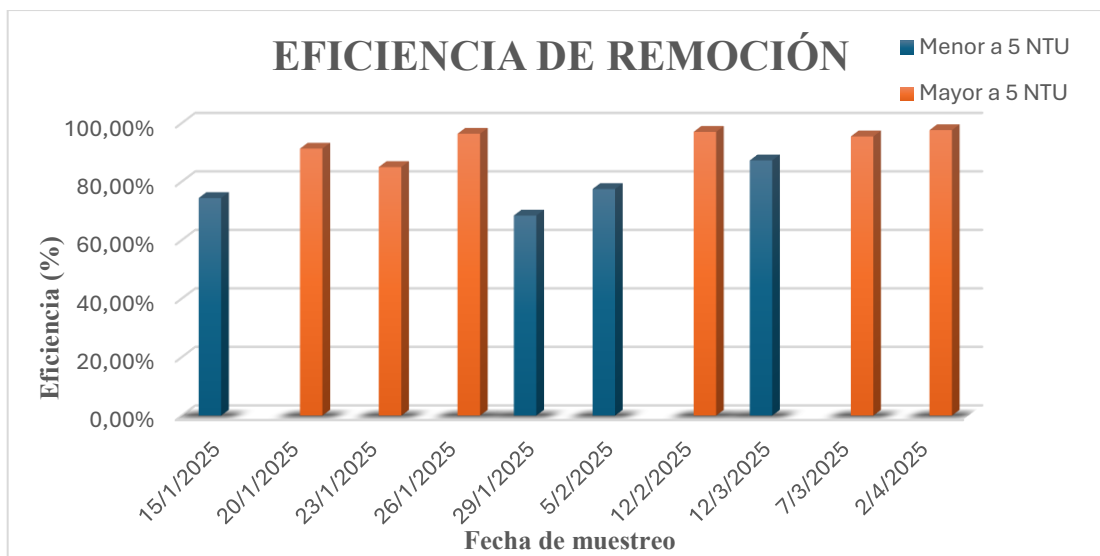


Figura 27 Eficiencia de remoción general de acuerdo a la turbiedad de entrada de la planta.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la Planta de Tratamiento Alto SENAC presenta una eficiencia global adecuada, acorde con su diseño y tecnología implementada. La operación conjunta de sus procesos garantiza una reducción efectiva de turbiedad, validando su capacidad de producir agua potable conforme a los estándares nacionales. No obstante, se recomienda implementar estrategias de mejora continua en el monitoreo de parámetros críticos, para asegurar la continuidad de estos niveles de eficiencia y reforzar la confiabilidad del sistema frente a escenarios de alta demanda o variabilidad de calidad del agua.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- La caracterización técnica de la Planta Potabilizadora Alto SENAC durante su etapa de puesta en marcha confirmó que la infraestructura y los equipos instalados cumplen con los requisitos constructivos y operativos exigidos por las normas NB 689 y NB 496, garantizando su correcto funcionamiento dentro de los parámetros de diseño.
- La eficiencia global de remoción de turbiedad de la planta es de 86,88 %, resultado técnicamente favorable considerando la ausencia de una etapa de sedimentación. Este desempeño evidencia que la combinación de coagulación con filtración rápida es suficiente para alcanzar una remoción significativa de sólidos suspendidos en condiciones controladas de operación.
- Las mediciones “in situ” y de laboratorio de los parámetros de control mínimo demostraron que el agua tratada alcanza consistentemente los límites establecidos por la NB 512, validando la eficiencia sanitaria de los procesos unitarios de coagulación, filtración rápida y desinfección.
- Se obtuvo la ecuación ajustada $Q=1,1252 \times H^{2,2476}$, resultante de la calibración del vertedero triangular. La comparación con los valores del sistema HMI demostró una buena concordancia, validando la confiabilidad del sensor de nivel instalado.
- El tiempo de retención hidráulico (TRH) total de la planta, determinado mediante trazadores de cloro líquido, fue de 49 min 20 s, lo cual es favorable para los procesos de acondicionamiento y garantiza un tránsito adecuado del agua en las unidades.
- La evaluación de la tasa de filtración para distintos escenarios operativos demostró que los valores varían entre 63,43 y 112,5 m³/m²·d, manteniéndose dentro de los rangos aceptables establecidos en la Norma Boliviana NB 689 para medios filtrantes simples. El valor promedio fue de 95,07 m³/m²·d, lo cual indica un funcionamiento adecuado del sistema de filtración, sin sobrecargar los medios filtrantes ni comprometer su capacidad de remoción.
- El aforo volumétrico del lavado de filtros reveló un caudal promedio de 24,67 L/s por unidad filtrante. Considerando nueve filtros y un tiempo de lavado promedio de 9 minutos, el volumen total requerido por ciclo de limpieza asciende a 13.320

litros. Si bien esta cantidad representa una pérdida operativa considerable, es técnicamente necesaria para preservar la eficiencia del sistema de filtración.

- A través de ensayos de prueba de jarras, se determinaron las dosis óptimas de sulfato de aluminio e hidróxido de calcio para distintas turbiedades, ampliando el rango operativo de la planta más allá del valor de diseño (20 NTU) hasta aproximadamente 80 NTU en condiciones controladas, así también aportando criterios útiles para la actualización del manual de operación y mantenimiento.

6.2. RECOMENDACIONES

- Diseñar un circuito de recuperación del agua de retrolavado, permitiendo recuperar hasta un 50 % del volumen de lavado para usos secundarios (prelavado o limpieza de instalaciones), reduciendo el volumen descargado a la quebrada y el consumo total de agua.
- Implementar un sistema integral de monitoreo y registro operativo en la planta, que incluya bitácoras diarias de control de calidad del agua (pH, turbiedad, cloro residual, conductividad y coliformes termotolerantes), así como parámetros hidráulicos (caudales, tiempos de retención, tasas de filtración y frecuencia de lavado de filtros). Esto permitirá asegurar un seguimiento técnico del funcionamiento de cada proceso unitario, facilitar la toma de decisiones operativas oportunas y respaldar la trazabilidad del cumplimiento con la Norma Boliviana NB 512.
- Incorporar sensores de presión o piezómetros en los filtros rápidos para monitorear la pérdida de carga y programar el retrolavado de acuerdo con límites específicos de caída de presión, en lugar de basarse solo en criterios de turbiedad o tiempo.
- Evaluar la necesidad de incorporar una etapa de sedimentación o decantación convencional antes de la filtración rápida en caso de que la fuente de abastecimiento presente consistentemente turbiedades superiores a los rangos para los que la planta fue diseñada. Un estudio de factibilidad técnico-económica deberá analizar el impacto de esta adición en la eficiencia de remoción, el consumo de químicos, la vida útil de los filtros y la capacidad de tratamiento de la planta.
- La caracterización de los lodos generados en la planta y el diseño de un sistema de tratamiento y disposición final de los mismos representa un área de investigación pertinente para una futura tesis de grado. Esta investigación deberá incluir la cuantificación de la producción de lodos (provenientes principalmente del retrolavado de filtros y purgas), su caracterización fisicoquímica, la evaluación de opciones de tratamiento como lechos de secado, espesamiento o deshidratación mecánica y el impacto ambiental de la disposición final de los lodos.