

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Desde finales de los años ochenta, como con otros descubrimientos adversos de estudios epidemiológicos, existe un considerable debate en la comunidad científica a nivel mundial sobre el significado de hallazgos en el tratamiento de agua potable y su incidencia en las enfermedades, tomando en cuenta la realidad de cada país y las problemáticas que atraviesa la población.

Entrando en el contexto y análisis regional. En 1990 entra en funcionamiento la Planta de Tratamiento de agua potable de Tabladita. Los procesos que se plantearon y realizaron para su correcto funcionamiento fueron, una coagulación/floculación inicial, seguida de una sedimentación para una posterior filtración, culminando con una desinfección.

La desinfección inicial en 1990 se aplicó mediante el uso de hipoclorito de calcio sólido. Lo que se hacía era usar un producto del 65% al 70% de cloro, siendo lo demás materia inerte. La aplicación de este método, se realizó mediante la relación de cloro y la normativa NB 512 de agua potable, en función al caudal suministrado.

Dicho método de desinfección se mantuvo en uso hasta la gestión 2010 aproximadamente, optando por el hipoclorito de sodio líquido al 8% traído desde el departamento de Santa Cruz, estando en uso este método aproximadamente solo 5 años, hasta la gestión 2015, debido a la inestabilidad del desinfectante y la complicación de su uso al ser una sustancia controlada en ese entonces, además de presentarse la facilidad de usar gas cloro.

Es así, que, a partir del 2015, se instala en la planta equipos dosificadores con un costo considerable para realizar el uso de gas cloro en la desinfección, al 99% de pureza, cambiando el sistema manual por uno más práctico y tecnológico, para su uso en caudales mayores. Actualmente dicho método de desinfección es el que se mantiene desde la gestión 2015 en la planta potabilizadora del barrio Tabladita, sin cambios significativos en el mismo.

Debido a la actual demanda de agua potable de aproximadamente 520 l/s y al hecho de que la planta llega a abarcar un caudal de 340 l/s, además de fuentes superficiales, se tienen fuentes subterráneas que son administradas por COSSALT, las subterráneas son los pozos que se instalaron en zonas a las que no se llega por gravedad compensando la demanda requerida. En dichos pozos el método de desinfección que se usa es con hipoclorito de calcio sólido, debido a la experiencia previa en la planta con el mismo.

Según investigaciones previas en la planta, como lo es un trabajo denominado “EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE TARIJA (TABLADITA) Y ANÁLISIS DE REÚSO DEL AGUA DE AUTOLAVADO DE FILTROS”, por Widen Molina Céspedes, para obtener la licenciatura en ingeniería civil en la gestión 2016. Del análisis y evaluación que se hizo a la planta de tratamiento de Tabladita se concluye que la eficiencia de la misma es aceptable y que el agua que suministra a la población de Tarija cumple con los requisitos básicos que establece la Norma Boliviana 512 referente a la calidad de agua para consumo humano.

No obstante, han pasado ya siete años de dicha investigación y actualmente gran parte de la población tiene conocimiento de la problemática de contaminación de las fuentes de agua más importantes para Tarija como lo es el Rio Guadalquivir. La Planta de Tratamiento en época de estiaje recibe una cantidad de agua del Rio, que, aunque no es mayoritaria si debe ser de importancia ya que según monitoreos recientes del SEDEGIA, se sabe que la calidad del agua del rio Guadalquivir está en un estado pésimo, es decir, es de clase D según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), considerando los resultados de sus monitoreos. (*SIHITA – Sistema de Información Hídrica de Tarija*, s. f.).

Existen inquietudes y preocupación sobre el tratamiento adecuado del agua para la población, que ha aumentado aún más debido a las recientes enfermedades y epidemias como lo es el coronavirus y el dengue, entre otros.

Con el riesgo creciente de la remoción e inactivación de algunos patógenos más resistentes, al tiempo que se minimizan los subproductos de desinfección, otras opciones distintas de la tradicional cloración están ganando popularidad, así como también sistemas combinados que implican más de un método de desinfección, particularmente en el tratamiento de agua superficial contaminada.

En todo caso, se ha de tener en cuenta que la desinfección tendrá éxito solo si se asegura un pretratamiento impecable. Actualmente se conoce que tanto a nivel mundial, Latinoamérica, nacional y regional se usa como pretratamiento las etapas de coagulación/floculación, sedimentación, filtración y desinfección, con leves variaciones, entre las cuales están materiales de construcción, medios filtrantes, sustancias coadyuvantes, entre otros.

Es importante resaltar que el buen funcionamiento del sistema no solo depende de las operaciones que lleve a cabo la planta sino del manejo operativo que se realice, pues un mal seguimiento de los parámetros o la incorrecta dosificación de químicos puede ser el detonante del impacto a la sociedad generado por el consumo de un agua que no cumple con las características adecuadas. Por consiguiente, el diagnóstico y elaboración de alternativas son el procedimiento para verificar y optimizar el estado actual de un sistema de abastecimiento de agua potable, donde es necesario contar con un estudio de las condiciones físicas, técnicas y operativas de la planta para mejorar su eficiencia y eficacia.

Objetivos: General y Específicos

Objetivo General

Diseñar una propuesta de optimización para la Planta de Tratamiento de agua potable de Tabladita.

Objetivos Específicos:

1. Identificar las falencias técnicas y operativas que serán objeto de optimización, mediante el diagnóstico del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de agua potable de Tabladita en época de estiaje.

2. Analizar las alternativas de optimización posibles, con base en las falencias técnicas y operativas identificadas.
3. Establecer una propuesta de optimización viable según criterios de calidad necesarios para la prestación de este servicio.

Justificación del Proyecto de grado

El presente proyecto pretende contribuir a mejorar el tratamiento de una necesidad actual en el mundo, como lo es el agua potable, por lo cual un análisis del porqué realizarlo es simple de explicar y se muestra a continuación.

Justificación tecnológica

El avance constante de la tecnología, combinado con los desafíos sanitarios emergentes, subraya la necesidad imperante de que cada Planta Potabilizadora de Agua esté plenamente consciente de este dinamismo. Aunque es cierto que los tratamientos actuales pueden cumplir con las normas establecidas, es esencial reconocer que la adecuación a estas normas no siempre garantiza una respuesta óptima a las problemáticas sanitarias específicas del departamento.

En este contexto, la investigación propuesta busca destacar la importancia de considerar tecnologías avanzadas que puedan contribuir significativamente a la eliminación de agentes dañinos para la salud de la población. La selección estratégica de estas tecnologías puede marcar la diferencia en la efectividad del tratamiento, no solo cumpliendo con las normativas, sino abordando de manera más directa y eficiente los problemas de salud actuales en la población.

El enfoque de esta investigación es proporcionar propuestas concretas para la optimización de los procesos de tratamiento de agua, asegurando que estén más alineados con las necesidades de salud específicas que enfrenta la población en el departamento. Esto implica la identificación y aplicación de tecnologías estratégicas que vayan más allá de los métodos convencionales, considerando las particularidades de las problemáticas sanitarias actuales.

Justificación económica

Es ampliamente reconocido a nivel nacional que los sistemas de salud están enfrentando desafíos significativos, abordando una variedad de problemas que, aunque no están directamente vinculados con la calidad del agua que se consume, están siendo afectados de manera indirecta por esta cuestión vital. El agua desempeña un papel fundamental en la salud de la población, y la mejora en su tratamiento puede representar un apoyo valioso para la recuperación de la salud general.

La relación entre la calidad del agua y la carga de enfermedades es innegable. La implementación de procesos de tratamiento más eficientes contribuiría directamente a la reducción de enfermedades transmitidas por el agua, proporcionando un impacto positivo en la salud de la población. Esta mejora en la calidad del agua potable podría traducirse en una disminución significativa de las enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada, aliviando así la presión sobre los sistemas de salud.

Este beneficio directo para la salud pública tiene ramificaciones económicas sustanciales. La reducción de enfermedades asociadas al agua implica una disminución en los gastos en tratamientos médicos y consultas, lo que a su vez tiene un impacto positivo en la economía de las familias a nivel departamental. La carga económica asociada con la atención médica puede ser considerable, y cualquier reducción en estos costos contribuye no solo a la mejora de la salud individual, sino también al alivio de las presiones financieras en los hogares.

Es por ello que el implementar la propuesta de optimización para la planta claramente se debe ver por propuestas viables económicamente como la que se presenta en el trabajo, considerando que es una planta de un país en vías de desarrollo y además la situación de COSAALT.

Justificación ambiental

El propósito fundamental de este estudio de investigación radica en la optimización de los procesos de tratamiento llevados a cabo en una Planta Potabilizadora de agua. En este contexto, se busca analizar de manera exhaustiva los riesgos ambientales

inherentes al tratamiento del agua, con el objetivo principal de prevenir la generación de subproductos contaminantes asociados a ciertos procedimientos.

La justificación ambiental subyacente a este proyecto se basa en la necesidad imperante de minimizar los impactos negativos sobre el entorno natural. El tratamiento inadecuado del agua potable podría desencadenar la liberación de sustancias perjudiciales, afectando tanto la calidad del agua como la salud de los ecosistemas acuáticos circundantes. Por ende, la optimización de los procesos de tratamiento no solo responde a una mejora operativa, sino que también se erige como una medida preventiva y proactiva para reducir la carga contaminante en los cuerpos de agua receptores.

Este enfoque se alinea estrechamente con la normativa NB 512, que establece los estándares y requisitos técnicos para el tratamiento de agua potable en la región correspondiente. Además, el marco legal representado por la Ley 1333 y su reglamentación proporciona un respaldo normativo para las acciones emprendidas en pro de la protección ambiental. La implementación de prácticas mejoradas de tratamiento no solo busca el cumplimiento de estas normativas, sino que también persigue la promoción activa de estrategias que vayan más allá de las exigencias mínimas, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

Justificación social

En los últimos diez años, hemos sido testigos de la emergencia de diversos problemas sanitarios, entre ellos, enfermedades específicas como el coronavirus y el dengue. Estas situaciones han suscitado una creciente preocupación en la población respecto a la adecuada desinfección de los alimentos que utilizan y consumen en su vida cotidiana. El agua, como el líquido de mayor consumo en la sociedad, ha sido objeto de un escrutinio particular en términos de su tratamiento para el consumo humano.

Esta creciente inquietud entre los habitantes ha generado cuestionamientos sobre la efectividad de los procesos de desinfección del agua. Aunque muchos de los miembros de la comunidad pueden carecer de conocimientos técnicos en la materia, es

comprendible que demanden un mayor control y transparencia en los métodos de desinfección, especialmente en un contexto donde la seguridad sanitaria se ha vuelto una prioridad evidente. Los eventos sanitarios recientes han agudizado la conciencia pública sobre la importancia de asegurar que el agua consumida cumpla con los más altos estándares de calidad y desinfección.

En este sentido, la percepción de la población, aunque pueda carecer de una comprensión técnica profunda, apunta hacia la necesidad de optimizar los procesos de tratamiento de agua. Esta búsqueda de optimización no solo responde a una demanda pública, sino que también refleja una conciencia colectiva sobre la importancia de salvaguardar la salud de la población. La certeza en la calidad del agua potable se ha convertido en un componente crucial de la seguridad y el bienestar comunitario.

Justificación personal

La disparidad en la implementación de mejoras en el tratamiento de agua potable frente a las problemáticas sanitarias actuales me preocupa considerablemente. Observo con inquietud la falta de iniciativas para difundir información y llevar a cabo proyectos que aborden las situaciones específicas de diversas plantas potabilizadoras, y esto cobra relevancia, especialmente en áreas con fuentes de abastecimiento desafiantes, como es el caso del Río Guadalquivir en el departamento.

La situación del Río Guadalquivir, catalogada como "mala" según estudios recientes del SEDEGIA, y también según auditoría del 2016 del ministerio de medio ambiente, destaca la urgente necesidad de evaluar alternativas y proponer optimizaciones en el tratamiento de agua. Aunque es alentador que el tratamiento actual cumpla con las normas establecidas, reconozco que estas normas establecen límites mínimos y no abordan necesariamente las circunstancias específicas o las problemáticas sanitarias locales.

La iniciativa de evaluar alternativas y proponer mejoras es un paso crucial hacia la promoción de la salud pública. Los informes de calidad nos brindan una visión general, pero debemos ir más allá de los estándares mínimos para adaptar los procesos de

tratamiento y asegurar un suministro de agua potable que sea óptimo y proactivo en términos de salud.

Al proponer optimización, estoy comprometida no solo a abordar la calidad del agua, sino también a considerar factores específicos relacionados con las problemáticas sanitarias locales. Creo en la importancia de ser consciente de las necesidades y condiciones particulares del departamento para adaptar los procesos de tratamiento y brindar una mayor seguridad y beneficios para la salud de la comunidad.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

1.1. MATERIA PRIMA

El agua, es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). Es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. El término agua generalmente se refiere a la sustancia en su estado líquido, aunque la misma puede hallarse en su forma sólida llamada hielo, y en su forma gaseosa denominada vapor. Se encuentra en la naturaleza en estado más o menos puro formando parte de ríos, lagos y mares; ocupa las tres cuartas partes del planeta Tierra.

1.1.1. Fuentes de Agua

El total del agua presente en el planeta, en todas sus formas, se denomina hidrosfera. El agua cubre 3/4 partes (71 %) de la superficie de la Tierra. Se puede encontrar esta sustancia en prácticamente cualquier lugar de la biosfera y en tres estados de agregación de la materia: sólido, líquido y gaseoso.

Las fuentes potencialmente utilizables de agua están constituidas por:

- Aguas superficiales (ríos, quebradas, lagos naturales y artificiales).
- Aguas subterráneas (vertientes y pozos).
- Aguas de lluvia.

1.1.2. Agua potable

La Organización Mundial de la Salud y la Unión Europea consideran el agua potable como aquella que una persona puede beber todos los días, durante toda su vida y sin ningún riesgo para su salud.

1.2. LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

La planta de tratamiento de Agua Potable de Tabladita se encuentra ubicada en el barrio Tabladita, como su nombre propiamente lo indica, perteneciendo a la zona urbana de la provincia Cercado del departamento de Tarija, tiene unos 1980 m.s.n.m. como altitud promedio.

A continuación, se muestran las coordenadas geográficas y localización de la planta:

Cuadro I-1. Coordenadas de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tabladita

Punto	Coordenadas UTM WGS 84	
	X	Y
1	316.842,800	7.618.112,100
2	316.984,800	7.618.083,300
3	316.834,800	7.618.055,700
4	316.972,100	7.618.007,200

Fuente: Google Maps

Figura 1-1. Localización Satelital de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tabladita



Fuente: Google Maps

1.3. DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA

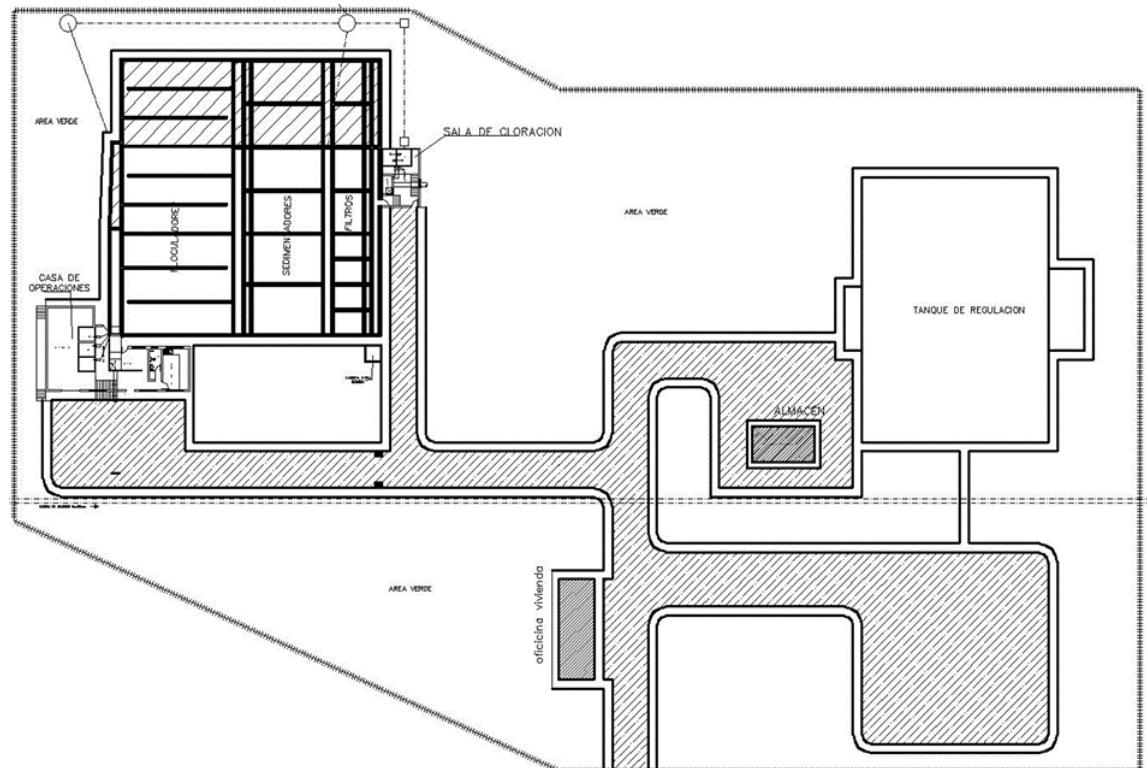
La Planta Potabilizadora de agua de Tabladita , cuenta con:

- Mezclador de resalto hidráulico
- Floculadores
- Sedimentadores

- Filtros
- Área de desinfección
- Almacenamiento

A continuación, se muestra un plano de la distribución de la misma:

Figura 1-2. Plano de la distribución de la PTAP



Fuente: (COSAALT, 2021)

Figura 1-3. Planta de tratamiento



Fuente: Elaboración propia

1.4. SERVICIOS AUXILIARES

Los servicios auxiliares en la planta de tratamiento de agua potable son el conjunto de infraestructuras y sistemas de apoyo que aseguran la operación continua y segura de la instalación.

Estos elementos, incluyendo la red hidráulica interna para el transporte de agua y reactivos entre las unidades de proceso, aunque no tratan el agua directamente, son indispensables para el funcionamiento general de la planta y el cumplimiento de sus objetivos.

Los principales servicios auxiliares presentes en la planta incluyen:

1.4.1. Suministro de Energía Eléctrica

La energía eléctrica es proporcionada por SETAR, el suministro de Energía Eléctrica es usado para la iluminación de la planta y para las bombas que se usan en el proceso, en este caso específico, para la bomba de gas cloro y para la bomba que envía agua para los tanques de insumo.

Para estos usos se tienen dos tableros de distribución eléctrica, los cuales tienen relés térmicos como protección. La planta no cuenta con generador de energía eléctrica.

1.4.2. Suministro de Agua para Servicios

Se emplea agua tratada de la propia planta para la preparación de soluciones químicas. Además, se emplea agua del desarenador de Alto Senac, para los baños y el laboratorio.

1.4.3. Almacenamiento y Dosificación de Productos Químicos

Se cuenta con áreas específicas para el almacenamiento seguro de los químicos requeridos. Una bodega para lo que es la cal y el sulfato de aluminio ubicada en el mismo lugar donde están los tanques de preparación y agitadores del sistema de dosificación. De igual manera para el gas cloro, este posee su propia sala de cloración en la etapa de desinfección, donde son almacenados los cilindros.

También existe en el caso del gas cloro un sistema de dosificación ubicado en la etapa de desinfección del proceso, que se mencionara a profundidad en la descripción del proceso y capítulos posteriores.

1.4.4. Laboratorio y Control de Calidad

La planta dispone de un área de laboratorio con equipamiento básico, como ser multiparámetro de HANNA, turbidímetro y checker HANNA HI701, para el monitoreo rutinario de cada cuatro horas de parámetros clave del agua, en el ingreso y la salida de la misma. Proporcionando un historial de control de calidad de parámetros diarios muy beneficioso para trabajos de investigación y monitoreo.

1.4.5. Infraestructura General

La planta dispone de áreas administrativas, las cuales son una oficina general, en donde se encuentra el técnico de la planta y la documentación de mayor relevancia, además de una oficina de los operadores que se encuentra al lado de los floculadores, y es usada por cada operador según su turno asignado.

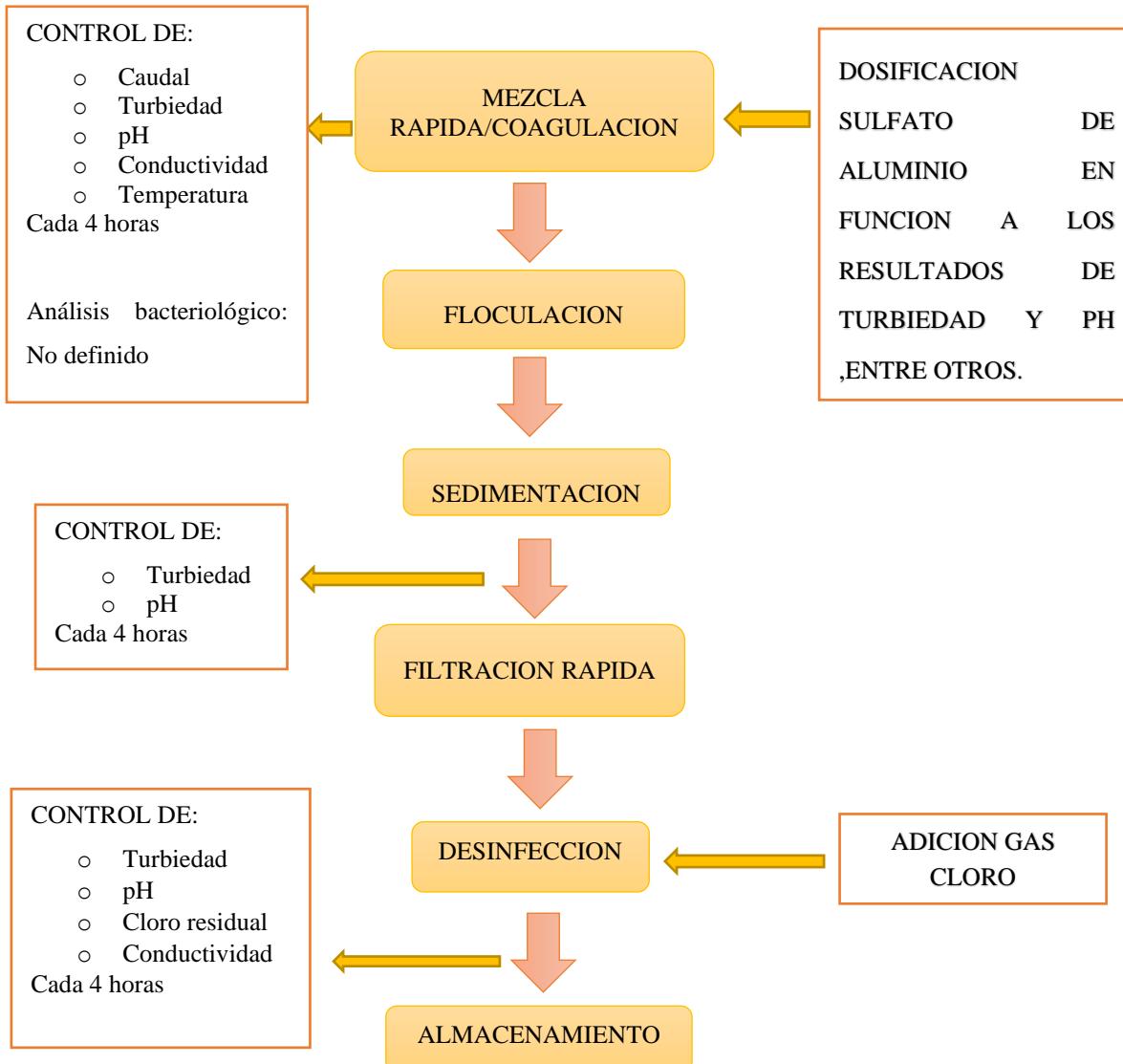
También poseen sus servicios básicos, como ser un baño al lado de la oficina y un vestidor ubicado al lado del tanque de almacenamiento.

A su vez, la planta cuenta con una bodega ubicada en la zona subterránea a la zona de dosificación, en esta bodega se guardan todas las herramientas de los operadores.

1.5. OPERACIÓN Y CONTROL

Actualmente la Planta Potabilizadora de agua ubicada en el barrio Tabladita opera de forma continua y sigue el proceso y control descrito a continuación:

Figura 1-4. Proceso de Potabilización



Fuente: Elaboración Propia basada en (COSAALT, 2021)

1.5.1. MEZCLA RÁPIDA/COAGULACIÓN

Es la primera etapa en el tratamiento, para que se lleve a cabo la coagulación se requiere de una unidad de mezcla rápida. Para esto se usa el mezclador de resalto hidráulico en donde dependiendo a la turbiedad del agua, por la época climática en la que nos encontramos se realiza la dosificación con sulfato de aluminio, donde más adelante hará que el sulfato entre en reacción, para promover la coagulación, sustancias húmicas y microrganismos en general.

El mezclador de resalto hidráulico además de ser la unidad en donde se realiza la mezcla rápida de las aguas que ingresan a la planta, también sirve como un regulador del caudal.

Figura 1-5. Unidad de Mezcla Rápida



Fuente: Elaboración propia.

CRITERIO DE OPERACIÓN

Al ser esta unidad de tipo hidráulico, tiene sus dos parámetros físicos (tiempo de mezcla e intensidad de agitación) determinados por la geometría de la unidad y el caudal de entrada.

Dependiendo de las características del agua cruda entrante se dosificará el sulfato de aluminio de ser necesario para el proceso de coagulación, en esta unidad se debe realizar el muestreo de los parámetros para saber las características entrantes del agua cruda, parámetros estipulados en la Normativa Boliviana, cada cuatro horas al día.

CRITERIO DE MANTENIMIENTO

- Se tiene que inspeccionar la unidad de mezcla rápida, así como compuertas de distribución de caudal a las unidades siguientes.
- Inspección de materiales flotantes que estuviesen retenidos contra las paredes, o de materiales sumergidos que pudieran obstaculizar el paso de agua.
- Diariamente el personal de la planta deberá inspeccionar las tuberías de descarga de las soluciones de sulfato de aluminio en la unidad de mezcla rápida, garantizando que no exista taponamientos
- Para la realización del mantenimiento de esta unidad se deberá utilizar el equipo de protección adecuada (EPP), para el operador; como ropa de trabajo, guantes, lentes de seguridad, botas de trabajo.

1.5.2. FLOCULACIÓN

Esta es la segunda etapa en el tratamiento que recibe el agua, en esta unidad el agua ingresa por un canal y son distribuidos a los floculadores que tienen un patrón de flujo pistón, Existen 6 unidades de 12,3 metros de largo, 3,50 metros de ancho y 1,50 metros de profundidad diseñadas para tratar 160 l/s. Desde la unidad de mezcla rápida el agua es conducida por un canal a la unidad de floculación, donde se dispone en su interior pantallas de madera quina.

Figura 1-6. Unidad de Floculación



Fuente: Elaboración propia.

CRITERIO DE OPERACIÓN

La unidad de floculadores está conformada por 6 cajones, el agua una vez que pasa por el mezclador de resalto hidráulico, entra por gravedad, donde después de un tiempo se forma flocs, (Es un conglomerado de partículas sólidas que se genera a través de los procesos de coagulación y floculación, está constituido en primer lugar por los sólidos que se separan del agua, así como también por los sólidos que aporta el coagulante.) Para precipitar en el sedimentador.

CRITERIO DE MANTENIMIENTO

- La limpieza de las cámaras de floculación se realizará semanalmente, se limpiarán las pantallas de madera de las partículas adheridas por las características del agua cruda.
- Ningún tipo de regulación de caudal se debe realizar en estas unidades.
- Para la realización de la limpieza se deberá trabajar con guantes para agua, así también con botas para agua y protección corporal

1.5.3. SEDIMENTACIÓN

A la salida de la unidad de floculación el agua es conducida por un canal que distribuye el agua floculada a esta unidad que contiene placas de Asbesto

Cemento inclinadas para precipitar los flocs, Existen alrededor de 50cm de sedimentos acumulados. El ingreso es ascendente, es decir de abajo arriba, donde varias tuberías perforadas conducen el agua clarificada en esta unidad y se transporta a la unidad de filtración.

Figura 1-7. Unidad de Sedimentación



Fuente: Elaboración propia.

CRITERIO DE OPERACIÓN

Durante la operación normal, la compuerta de ingreso al decantador debe permanecer completamente abierta, a fin de evitar gradientes de velocidades que provoquen la ruptura del floculo y perjudique la eficiencia del proceso

CRITERIO DE MANTENIMIENTO

Los flóculos sedimentan en la base de los sedimentadores donde se van acumulado dependiendo de las características de agua cruda, se acumularán junto con algunos compuestos químicos por la utilización del coagulante. La limpieza de estas unidades se realiza mensualmente, a veces trimestralmente dependerá de la eficiencia de remoción y de la calidad del efluente a tratar. Para la limpieza se tiene que ingresar por unas compuertas a la parte de debajo de los sedimentadores, para la realización de esta actividad se tiene que entrar

con el equipo apropiado para la protección de la humedad producida por agua, consistiendo en botas para agua y un traje impermeable

1.5.4. FILTRACIÓN RÁPIDA

La unidad de filtración es descendente y el agua sedimentada entra a este proceso donde atraviesa una capa de antracita de un espesor de 50 centímetros, luego una capa de arena de 25 centímetros de espesor, seguido de una capa de grava de 25 centímetros y finalmente el agua es captada con un fondo tipo Wheler. Se cuenta con 6 filtros en la planta de Tratamiento del barrio tabladita.

Figura 1-8. Unidad de Filtración rápida



Fuente: Elaboración propia.

CRITERIO DE OPERACIÓN

Cuenta con 6 filtros: 4 filtros de 4 m³, y 2 de 6m³, mediante válvulas el agua en proceso de tratado entra a los filtros y por gravedad pasa por las diferentes capas, hasta desembocar en una tubería que direcciona el agua a la sala de cloración.

CRITERIO DE MANTENIMIENTO

Se realiza la limpieza de un filtro por día, dependiendo del operador cual es el filtro que se limpiara de acuerdo a la saturación en los mismos, cuando no existe movimiento del agua, todo dependiendo de la calidad del agua cruda entrante.

La limpieza profunda de los filtros se realiza mensualmente, raspando las paredes por la generación de algas, bacterias y organismos presentes en el agua, como también el raspado de la capa denominada piel de filtro que se genera sobre la capa de arena.

1.5.5. DESINFECCIÓN

La razón fundamental de la desinfección del agua es disminuir el riesgo de infecciones debido a las enfermedades transmitidas por el agua, mediante la destrucción o inactivación de los diversos organismos patógenos que están o pueden estar presentes en la fuente de agua que una persona utiliza para satisfacer sus necesidades básicas, y para cumplir con lo estipulado dentro de la Normativa Boliviana vigente.

El compuesto químico más utilizado para la desinfección en la Planta es el cloro gaseoso, siendo el hipoclorito de calcio usado en casos de emergencia. El cloro es un gas de color ámbar que pesa 2,5 veces más que el aire, se produce en forma gaseosa por electrólisis de una solución de cloruro de sodio, sus características son:

Cuadro I-2. Características del gas cloro

Símbolo: Cl	Peso atómico: 35,400
Punto de fusión: -101,400 °C	Punto de ebullición: -34,500 °C
Densidad: 2,500	Aire: 1
Presión crítica: $7,711 \times 10^7$	Calor latente de evaporación: 289 kJ/kg
Temperatura crítica: 144°C	

Fuente: (COSAALT, 2021)

Figura 1-9. Unidad de desinfección



Fuente: Elaboración propia.

CRITERIO DE OPERACIÓN

En la planta Potabilizadora del barrio Tabladita, se cuenta con una sala donde se realiza la cloración del agua, con la utilización de gas cloro que llega a la planta en cilindros con 68 kg de gas cloro, en dicho espacio se encuentra el equipo al cual van instalados los cilindros de gas, una caja de control pequeña para la dosificación mediante la bomba dosificadora, y la disponibilidad de energía eléctrica, para el buen funcionamiento del dosificador.

El agua filtrada es conducida a una cámara de desinfección. Una vez que pasa por la desinfección el agua es almacenada, el agua tratada es conducida mediante tubería de FFD en diámetro de 400 mm., a dos tanques de almacenamiento de 900 m³ cada uno localizados en el mismo predio.

CRITERIO DE MANTENIMIENTO

No existe un mantenimiento determinado en el equipo de dosificación actualmente.

El rango para el cloro residual según la norma NB - 512 calidad de agua para consumo humano, es de 0,2 a 1,5 mg/l, siendo un valor deseable **0,5 mg/l**.

1.5.6. ALMACENAMIENTO

Esta es la última unidad, en la cual el agua ingresa después de ser desinfectada, en la misma se genera el tiempo de retención del agua, que varía en función al horario, para luego ser transportada en la red de distribución.

Figura 1-10. Unidad de Almacenamiento



Fuente: Elaboración propia.

CRITERIO DE OPERACIÓN

La unidad está conformada por dos tanques, cada uno con un volumen de 9000m³.

El agua una vez que pasa por la desinfección, entra por gravedad, donde después de un tiempo es distribuida a la población mediante la red de distribución.

CRITERIO DE MANTENIMIENTO

- Se realiza la limpieza de los tanques una vez al año, en época seca, debido a que se trabaja con uno solo en dicha época. Para realizar la limpieza, se utilizan botas de agua, overol de tela y guantes.
- De igual manera, se realiza una vez al año el pintado del tanque.

1.6. CONCEPTOS Y NORMAS BÁSICAS PARA LA CALIDAD DEL AGUA

1.6.1. Parámetros de calidad del agua

1.6.1.1. Parámetros Físicos

Los parámetros físicos del agua son: Turbiedad, Color, Olor, Sabor, Conductividad y Resistividad, Salinidad.

Se llaman físicos porque se pueden detectar con los sentidos (vista, olfato, etc.), y esto implica que tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas del agua.

Turbiedad. Es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas insolubles en suspensión, coloidales o muy finos que se presentan principalmente en aguas superficiales. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez.

Color. El color en el agua puede deberse a la presencia de materia orgánica, por ejemplo, sustancias húmicas, metales como hierro y manganeso. Existen dos tipos de color que se reconocen en el agua, el color verdadero, es decir, el color de la muestra una vez que su turbidez ha sido removida; y el color aparente, que incluye no solamente el color real sino también el color de las sustancias en suspensión. (Rojas J. A., 2000)

Olor. Se debe principalmente a la presencia de sustancias inorgánicas y/u orgánicas; algunos olores indican el incremento en la actividad biológica.

Sabor. El sabor, al igual que el olor en el agua frecuentemente ocurren juntos y en general son prácticamente indistinguibles. Muchas pueden ser las causas de olores y sabores en el agua, entre las más comunes se encuentran: Materia orgánica, cloruro de sodio, sulfato de sodio y magnesio, productos de cloro, hongos, diferentes especies de algas, etc.

La determinación del olor y sabor en el agua es útil para evaluar la calidad de la misma y su aceptabilidad por parte del consumidor. Tanto el olor como el sabor pueden describirse cualitativamente y esto es muy útil especialmente en casos de reclamo por parte del consumidor. (Rojas J. A., 2000)

Conductividad y Resistividad. La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua. El agua pura contribuye mínimamente a la conductividad, y en su casi totalidad es el resultado del movimiento de los iones de las impurezas presentes. La resistividad es la medida recíproca de la conductividad.

Salinidad. Cuando en el agua el principal constituyente es el cloruro de sodio y su concentración es mayor de lo usual, se dice que el agua es salina, cuya concentración se expresa en partes por mil. (Rojas J. A., 2000)

1.6.1.2. Parámetros Químicos

Los principales parámetros químicos, teniendo en cuenta su posible prevalencia en el agua y los efectos que puedan tener sobre la salud, o el impacto que causen sobre los procesos de tratamiento o las implicaciones de tipo económico son el pH, Alcalinidad, Acidez, Dureza, Coloides, Sólidos Disueltos, Sólidos en suspensión, Sólidos totales, Cloruros, Sulfatos, Nitratos.

pH. Es una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar a los usos específicos del agua. La mayoría de aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8. Su medición se realiza fácilmente con un pHmetro bien calibrado, aunque también se puede disponer de papeles especiales que, por coloración, indican el pH. Los valores del pH han de ser referidos a la temperatura de medición, pues varían con ella.

Alcalinidad. Puede definirse como su capacidad de neutralizar ácidos como su capacidad de reaccionar con iones Hidrógeno y se debe a la presencia de bicarbonatos. La determinación de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad es

importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento y control de corrosión.

Dureza. La dureza, debido a la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio, mide la capacidad de un agua para producir incrustaciones. Afecta tanto a las aguas domésticas como a las industriales, siendo la principal fuente de depósitos e incrustaciones en calderas, intercambiadores de calor, tuberías, etc. Por el contrario, las aguas muy blandas son agresivas y pueden no ser indicadas para el consumo.

Existen distintas formas de dureza:

Dureza total o título hidrométrico, TH. Mide el contenido total de iones Ca^{++} y Mg^{++} . Se puede distinguir entre la dureza de calcio, THCa , y la dureza de magnesio, THMg .

Dureza permanente o no carbonatada. Mide el contenido total de iones Ca^{++} y Mg^{++} . Está determinada por todas las sales de calcio y magnesio.

Dureza temporal o carbonatada. Mide la dureza asociada al contenido de carbonatos y bicarbonatos. Si la dureza es inferior a la alcalinidad toda la dureza es carbonatada, pero si la dureza es superior a la alcalinidad hay una parte de dureza no carbonatada, asociada a otros aniones. La dureza de carbonatos es igual al valor m si $\text{TH} > m$, e igual a TH si $\text{TH} < m$. La dureza no carbonatada solo existe en el primer caso y es igual a $\text{TH} - m$.

La dureza se puede expresar como mg/l , en ppm de CaCO_3 . Las aguas con menos de 50 ppm en CaCO_3 se llaman blandas, hasta 100 ligeramente duras, hasta 200 moderadamente duras, y a partir de 200 ppm muy duras.

Coloides. Es una medida del material en suspensión en el agua. Los coloides pueden ser de origen orgánico (ejemplo, macromoléculas de origen vegetal) o inorgánico (ejemplo, óxido de hierro y manganeso). En aguas potables puede ser una molestia solo de tipo estético. La dificultad de sedimentación se salva con un proceso de coagulación - floculación previa.

Sólidos Disueltos. Los sólidos disueltos o salinidad total, es una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua. El origen de los sólidos disueltos puede ser múltiple, orgánico o inorgánico, tanto en aguas subterráneas como superficiales. Aunque para las aguas potables se indica un valor máximo deseable de 500 ppm, el valor de los sólidos disueltos no es por sí solo suficiente para determinar la bondad del agua. En los usos industriales la concentración elevada de sólidos disueltos puede ser objetable por la posible interferencia en procesos de fabricación, o como causa de espuma en calderas.

Sólidos en Suspensión. Son una medida de los sólidos sedimentables (no disueltos) que pueden ser retenidos en un filtro. Las aguas subterráneas suelen tener menos de 1 ppm, pero en las superficiales varía mucho en función del origen y las circunstancias de la captación. Se separan por filtración y decantación.

Sólidos totales. Los sólidos totales son la suma de los sólidos disueltos y de los sólidos en suspensión.

Cloruros. El ion cloruro, Cl^- , forma sales en general muy solubles. Suele ir asociado al ión Na^+ , especialmente en aguas muy salinas. El contenido en cloruros afecta la potabilidad del agua y su potencial uso agrícola e industrial. A partir de 300 ppm el agua empieza a adquirir un sabor salado. Las aguas con cloruros pueden ser muy corrosivas

Sulfatos. El ión sulfato, SO_4^{2-} , corresponde a sales de moderadamente solubles a muy solubles. Aunque en agua pura se satura a unos 1500 ppm, como SO_4Ca , la presencia de otras sales aumenta su solubilidad.

Nitratos. El ión nitrato, NO_3^- , forma sales muy solubles y bastante estables, aunque en medio reductor puede pasar a nitrito, nitrógeno, o amoníaco. Concentraciones elevadas en las aguas de bebida pueden ser la causa de cianosis infantil. Su presencia en las aguas superficiales, juntamente con fosfatos, determina la eutrofización, que se caracteriza por un excesivo crecimiento de las algas.

Fosfatos. El ión fosfato, PO_4^{3-} , en general forma sales muy poco solubles y precipita fácilmente como fosfato cálcico. Al corresponder a un ácido débil, contribuye a la alcalinidad de las aguas.

Sílice. Se encuentra en el agua disuelta como ácido silícico, SiO_4H_4 , y como materia coloidal. Contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua.

Oxígeno Disuelto. Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, septicización, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.

1.6.1.3. Parámetros Orgánicos

Tanto la actividad natural como la humana contribuyen a la contaminación orgánica de las aguas naturales. La descomposición de la materia animal y vegetal da lugar a ácidos húmico y fúlvico y a materias colorantes.

Entre estos se tiene:

Demanda bioquímica de oxígeno. Mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua, mediante procesos biológicos aerobios. En general se refiere al oxígeno consumido en 5 días (DBO5) y se mide en ppm de O_2 .

Demanda química de oxígeno. Mide la capacidad de consumo de un oxidante químico, dicromato o permanganato, por las materias oxidables contenidas en el agua, y también se expresa en ppm de O_2 . Indica el contenido en materias orgánicas oxidantes y otras sustancias reductoras, tales como Fe^{++} , NH_4^+ , etc.

Carga orgánica total. Es una medida del contenido en materia orgánica del agua, especialmente aplicable a pequeñas concentraciones.

1.6.1.4. Parámetros microbiológicos

Bacterias Coliformes. Las bacterias del género coliformes se encuentran principalmente en el intestino de los humanos y de los animales de sangre caliente, pero también ampliamente distribuidas en la naturaleza, especialmente en suelos,

semillas y vegetales. No todos los coliformes son de origen fecal, por lo que se hace necesario desarrollar pruebas para diferenciarlos a efectos de emplearlos como indicadores de contaminación. Se distinguen, por lo tanto, los coliformes totales -que comprende la totalidad del grupo- y los coliformes fecales -aquellos de origen intestinal-. Desde el punto de vista de la salud pública esta diferenciación es importante puesto que permite asegurar con alto grado de certeza que la contaminación que presenta el agua es de origen fecal.

Escherichia coli. Se trata de una bacteria que se encuentra generalmente en los intestinos animales y por ende en las aguas negras. En la calidad del agua se considera como indicador de contaminación fecal reciente.

Enterococos intestinales. Los enterococos intestinales incluyen las especies del género *Streptococcus* y son un subgrupo del grupo más amplio de los estreptococos fecales.

El grupo de los enterococos intestinales puede utilizarse como índice de contaminación fecal, ya que la mayoría de las especies no proliferan en medios acuáticos. Los enterococos intestinales se han utilizado en el análisis del agua natural como índice de la presencia de agentes patógenos fecales que sobreviven durante más tiempo que *E. coli*. (Salud, 2011)

1.6.2. Reglamentos y Normas de Calidad de Agua Potable

1.6.2.1. Ley 1333 de medio ambiente

De acuerdo al marco de la Ley 1333 de Medio Ambiente, la clasificación de los cuerpos de agua, según las clases señaladas en el Cuadro A-1, basada en su aptitud de uso y de acuerdo con las políticas ambientales del país en el marco del desarrollo sostenible, será determinada por el Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.

La clasificación general de cuerpos de agua; en relación con su aptitud de uso, obedece a los siguientes lineamientos:

CLASE “A”: Aguas naturales de máxima calidad, que las habilita como agua potable para consumo humano sin ningún tratamiento previo, o con simple desinfección bacteriológica en los casos necesarios verificados por laboratorio.

CLASE “B”: Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

CLASE “C”: Aguas de utilidad general, que para ser habilitadas para consumo humano requieren tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica.

CLASE “D”: Aguas de calidad mínima, que, para consumo humano, en los casos extremos de necesidad pública, requieren un proceso inicial de presedimentación, pues pueden tener una elevada turbiedad por elevado contenido de sólidos en suspensión, y luego tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica especial contra huevos y parásitos intestinales.

Según la ley 1333, se considera como parámetros básicos, los siguientes: DBO5; DQO; Colifecales; Oxígeno Disuelto; Arsénico Total; Cadmio; Cianuros; Cromo Hexavalente; Fosfato Total; Mercurio; Plomo.

1.6.2.2. Norma Boliviana 512 – Calidad de Agua Potable para consumo humano - Requisitos

Según la NB 512, la calidad del agua con destino al consumo humano tiene implicaciones importantes sobre los aspectos sociales y económicos que actúan indirectamente sobre el desarrollo de un país. Caracterizar la calidad a través de la definición de los límites permisibles de los parámetros físico-químicos y microbiológicos es fundamental para garantizar la salud pública.

Los parámetros de control de calidad del agua para consumo humano, que deben realizar las EPSA, se clasifican de acuerdo a su factibilidad técnica y económica en los siguientes grupos: Control Mínimo, Control Básico, Control Complementario y Control Especial. A continuación, se muestran los parámetros de control mínimo y básico, que como su nombre lo dice, deben ser los de mayor importancia.

Cuadro I-3. Parámetros de control mínimo

Nº	Parámetro	Valor máximo aceptable
1	pH	6,5 a 9,0
2	Conductividad	1.500,0 μ S/cm
3	Turbiedad	5 UNT
4	Cloro libre residual	0,2 mg/L a 1,5 mg/l
5	Coliformes	<1 UFC/100 ml
	Termotolerantes	<2 NMP/100 ml
6	Escherichia coli	<1 UFC/100 ml
		<2 NMP/100 ml

Fuente: Adaptado de (Agua Potable y Saneamiento Basico, 2021)

Cuadro I-4. Parámetros de control básico

Nº	Parámetro	Valor máximo aceptable
Físicos		
1	Color	15 UCV
2	Sabor y olor	Aceptables
Químicos		
3	Solidos disueltos totales	1.000,0 mg/l
Químicos Inorgánicos		

4	Alcalinidad total	370,0 mg/l $CaCO_3$
5	Calcio Ca	200,0 mg/l
6	Cloruros Cl^-	250,0 mg/l
7	Dureza total	500,0 mg/l $CaCO_3$
8	Hierro total Fe	0,3 mg/l
9	Magnesio Mg	150,0 mg/l
10	Manganoso Mn	0,1 mg/l
11	Nitritos NO_2^-	0,1 mg/l
12	Nitratos NO_3^-	45,0 mg/l
13	Sulfatos $SO_4^{=}$	400,0 mg/l
Microbiológicos		
14	Heterotróficas	5×10^2 UFC/ML

Fuente: Adaptado de (Agua Potable y Saneamiento Basico, 2021)

1.6.2.3.Norma Boliviana 689 – Instalaciones de agua – Diseño para sistemas de agua Potable

La norma establece los criterios técnicos de diseño de sistemas de agua potable de carácter público y/o privado, en el área urbana, peri-urbana y rural del país, para obtener obras con calidad, seguridad, durabilidad y economía; y de esa manera, contribuir al mejoramiento del nivel de vida y salud de la población.

Esta norma se aplica a nivel nacional para el diseño, ejecución o control de sistemas de agua potable públicos y/o privados.

Es obligatorio el conocimiento y aplicación de la norma por el proyectista, ejecutor, supervisor y fiscalizador de la obra. Sin embargo, se podrán aplicar criterios de diseño, constructivos y métodos de control no especificados en la presente toda vez que se justifiquen técnicamente ante la Autoridad Competente. (Ministerio d. S., 2004)

1.6.2.4. Norma Boliviana 496 – Agua Poble – Toma de Muestras

La determinación de los parámetros físico-químicos, bacteriológicos y radiológicos de caracterización del agua potable, son esenciales para el control de la calidad y permiten garantizar la salud pública. La actividad de muestreo y las frecuencias de control, deben ser confiables y representativas, siendo una de las etapas más importantes dentro del proceso de control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano.

1.6.2.4.1. Selección de puntos de muestreo

➤ Criterios de selección

Las muestras deben tomarse en lugares representativos del sistema de agua potable, aplicando los criterios de selección y ubicación en los puntos de muestreo, de acuerdo con la reglamentación vigente.

1.6.2.4.2. Método de muestreo

➤ Muestreo

El procedimiento de muestreo en sistemas de abastecimiento se debe iniciar con el muestreo para análisis bacteriológico, seguido de las determinaciones, en el lugar, de cloro residual libre, pH, temperatura, conductividad y finalmente el muestreo para el análisis fisicoquímico o los requeridos de acuerdo a la frecuencia de muestreo.

➤ Puntos de muestreo

Para realizar el muestreo se deben elegir grifos de instalaciones domiciliaria o pública en perfectas condiciones de funcionamiento.

1.6.2.5. Norma Boliviana 495 – Agua Potable – Definiciones y terminología

Esta norma establece las definiciones y términos empleados en las normas sobre agua potable, sistemas de abastecimiento de agua, muestreo y análisis de laboratorio.

1.6.3. Toma de muestras y análisis

El muestreo envuelve el conjunto de actividades que permiten obtener una proporción homogénea y representativa que será objeto de estudio para determinar las condiciones reales de la calidad de un determinado cuerpo de agua.

Así, la colecta de una muestra no solo involucra el proceso de adquirir físicamente una muestra para su futuro análisis, sino también es una herramienta fundamental para caracterizar el ambiente en el cual fue tomada, el manejo de la misma debe proteger cabalmente el valor del objetivo propuesto. La obtención de una muestra representativa y el acondicionamiento para su transporte hasta el laboratorio, no deberán representar factores determinantes que puedan afectar en forma significativa las condiciones originales de la misma.

La adecuada elección del sitio y la frecuencia de muestreo es el inicio de un buen estudio, el cual generará resultados confiables que serán utilizados para evaluar y proponer las distintas alternativas de solución a los problemas de contaminación antropogénica o natural del recurso hídrico.

1.6.3.1. Actividades previas al muestreo

Antes de realizar el muestreo es necesario el cumplimiento de ciertas actividades que tienen como objetivo garantizar la ejecución de un trabajo eficiente, en función a los procedimientos de muestreo. Estas actividades están contempladas dentro de los siguientes ítems:

- ✓ Plan de muestreo
- ✓ Preparación del material utilizado en el muestreo
- ✓ Ubicación y descripción de las estaciones de muestreo

1.6.3.1.1. Plan de muestreo

Deben ser tomados en cuenta los objetivos del muestreo de tal forma que no sean desperdiciados tiempo y dinero a través de la adquisición de datos demasiado precisos o no suficientemente precisos para sus objetivos. Un plan de muestreo completo proporciona al laboratorio, la seguridad y protección de las muestras contra errores u

omisiones que podrían en un momento dado comprometer o invalidar los resultados del muestreo.

1.6.3.1.2. Preparación del material utilizado en el muestreo

- a) **Acondicionamiento de envases.** Es imprescindible establecer una cadena de custodia cuando los envases hayan sido preparados, sellados y enviados al laboratorio
- b) **Revisión de equipo de muestreo en campo.** La obtención de muestras representativas de agua generalmente requiere de muchas provisiones. Este factor es importante sobre todo en los casos en que los sitios de muestreo son muy distantes del centro de trabajo.

1.6.3.1.3. Ubicación y descripción de las estaciones de muestreo

Se debe contar con un archivo fotográfico de los sitios de las estaciones fijas, con el propósito de documentar el sitio.

1.6.3.2. Recipientes de muestreo

La selección de los recipientes de muestreo es un punto básico en la actividad de la toma de muestra y de ellos dependerá gran parte la representatividad de ésta. El empleo de recipientes para muestras, en cuya fabricación se utilizan materiales inertes es una manera de evitar la alteración de uno o más de los componentes de la muestra de agua y que esta alteración puede ser pérdida, agregación o transformación durante la recolección, transporte y almacenamiento de la muestra.

1.6.3.3. Ubicación de los puntos de muestreo

Para elegir los puntos de muestreo, es necesario considerar muchos factores, entre los cuales se cita:

- ✓ **Variabilidad de la calidad del agua en un sistema.** Debe considerarse si las aguas no son mezcladas (Lago estratificado), o agua en proceso de ser mezclada (río agua abajo)
- ✓ **Representatividad del punto de muestreo.** Por lo general se debe evitar que el punto de muestreo se encuentre cerca de los límites de los sistemas de agua,

la orilla de un río, zonas de puntos muertos como canales de desagüe. También evitar sacar muestras cerca de la superficie, esto para evitar introducir sedimentos u otros contaminantes que no son representativos del sistema.

1.6.3.4. Tipos de muestreo

- a) **Muestreo Simple.** Es aquella que se toma en un tiempo y lugar, pero se corre el riesgo de que la muestra solamente represente la composición de la fuente en ese tiempo y lugar.
- b) **Muestreo Compuesto.** Es la mezcla de muestras simples, recogidas en el mismo punto de muestreo a diferentes tiempos, durante un período de 24 horas.
- c) **Muestreo Integrado.** Este muestreo consiste en hacer muestreo de muestras simples, recogidas en diferentes puntos simultáneamente.

1.6.4. Selección de los parámetros a analizar

Existen por lo menos 100 parámetros catalogados en las guías para calidad de agua potable. Aunque todos los parámetros deben examinarse periódicamente o cuando se planifican nuevos proyectos de abastecimiento de agua, generalmente resulta innecesario y no es económico para la mayoría de las organizaciones provinciales y autoridades de salud, el considerar análisis de rutina para pruebas adicionales a aquellas esenciales.

Por lo tanto, los parámetros críticos de análisis de muestras y en base a los cuales se analizarán las unidades de tratamiento de agua potable deben ser estratégicos y planteados según un estudio adecuado.

CAPÍTULO II

CONCEPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL

PROBLEMA

2.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tabladita, ubicada en la ciudad de Tarija, ha sido un componente esencial en el abastecimiento de agua potable desde su implementación en 1990. A lo largo de su historia, la planta ha experimentado diversas modificaciones en sus métodos de desinfección, desde el uso de hipoclorito de calcio sólido, pasando por hipoclorito de sodio líquido, hasta la instalación de equipos dosificadores de gas cloro en 2015. Este último sistema, que se mantiene en operación, ha mejorado la eficiencia del proceso de desinfección, especialmente para manejar caudales mayores. Sin embargo, las crecientes demandas de agua potable, que actualmente ascienden a 520 l/s frente a la capacidad de la planta de 340 l/s, han hecho evidente la necesidad de fuentes complementarias, incluyendo pozos subterráneos desinfectados con hipoclorito de calcio.

Paralelamente, estudios recientes han revelado problemas significativos en la calidad del agua del río Guadalquivir, una fuente relevante para la planta, particularmente en época de estiaje. Según datos del SEDEGIA y otros estudios previos, esta fuente de agua presenta niveles alarmantes de contaminación, lo que plantea un desafío creciente para la planta en términos de garantizar un suministro de agua que cumpla con los estándares de calidad establecidos por la Norma Boliviana NB 512. A esto se suman preocupaciones sociales y sanitarias amplificadas por recientes epidemias, como el coronavirus y el dengue, que han resaltado la importancia de un tratamiento adecuado y robusto frente a patógenos emergentes.

Los cambios climáticos impredecibles y el marcado deterioro de las cuencas hídricas, causado por la contaminación y la deforestación, han intensificado los riesgos asociados con la calidad del agua de las fuentes utilizadas para el abastecimiento de la población. Este contexto no solo exige métodos complementarios de tratamiento, sino que en casos extremos puede requerir la suspensión del suministro de agua. Adicionalmente, fuentes específicas de contaminación, como los vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, se combinan con la polución generada por lluvias que arrastran sedimentos y resuspenden los lechos de los ríos. Estas dinámicas

incrementan significativamente los sólidos suspendidos, la turbiedad, el color aparente, el carbono orgánico disuelto (COD) y el amoniaco, mientras reducen la conductividad, la temperatura y la alcalinidad del agua.

La eficacia de una planta de potabilización está directamente asociada con su capacidad para adaptarse a estas variaciones extremas en la calidad de las fuentes de agua. Sin embargo, esto requiere optimizar continuamente los procesos de tratamiento y ajustar los procedimientos operativos. En este sentido, la Planta de Tratamiento de Tabladita enfrenta el reto de no solo mantener el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos, sino también de garantizar un suministro de agua potable seguro y confiable ante las crecientes presiones ambientales y sociales.

Por lo tanto, **el problema principal radica en la ausencia de mejora continua en los procesos operativos y tecnológicos de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tabladita, sabiendo la constante variación de la fuente de abastecimiento superficial que posee la planta.** Esto incluye una revisión integral de los procesos actuales, la incorporación de tecnologías avanzadas adecuadas al caso y la implementación de estrategias preventivas que aseguren la sostenibilidad del sistema frente a los desafíos climáticos, ambientales y sanitarios que enfrenta el departamento de Tarija.

Por lo mencionado previamente, se procede a el diagnostico correspondiente, que nos permitirá reconocer las falencias a solucionar.

2.1.1. Diagnóstico del funcionamiento actual de la PTAP

Primeramente, se explicará cada punto que se toma en cuenta en el diagnostico, para posteriormente proceder a dar los resultados del mismo y su conclusión.

2.1.1.1. Revisión de la PTAP

Se realizó un reconocimiento del estado de cada unidad que compone la PTAP verificando el estado físico de las estructuras y de los medios que se encuentran en algunas de sus unidades. Además, se verificó la operación y proceso que se lleva a cabo en cada unidad con su correspondiente utilización de reactivos químicos, el

cumplimiento de las condiciones de seguridad, y recopilación de planos para el respectivo análisis del diseño.

Figura 2-1. Toma de datos de las unidades.



Fuente: Elaboración propia.

2.1.1.2. Toma de muestras

Se realizaron dos muestreos de tipo puntual al afluente y efluente de la PTAP (agua captada y agua tratada), con el fin de apoyar al análisis, basándose en la contaminación de la fuente del Río Guadalquivir, ya que, en la **época seca**, la misma abastece la planta con casi el 50% del caudal.

En el monitoreo se evaluó solo parámetros estratégicos, debido a que según un análisis de informes pasados de COSAALT, desde la Gestión 2019 a la 2023, los parámetros mínimos y básicos según la NB-512 son evaluados adecuadamente por COSAALT en la planta, contando ya con la información necesaria para realizar la caracterización en función a datos históricos.

Además, para ello, se tomó en cuenta los lineamientos establecidos por la ley 1333 y la normativa boliviana NB 689, considerando de igual manera información de los análisis del monitoreo al Río Guadalquivir del *Programa Asistente de Gestión*

Unificada del Agua-SIHITA de la Gobernación del Departamento de Tarija y también los análisis del seguimiento al Rio Guadalquivir realizados por COSAALT.

Figura 2-2. Toma de muestra en la entrada de la planta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-3. Toma de muestra en la salida de la planta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-4. Muestras en cadena de frío.



Fuente: Elaboración propia.

2.1.1.3. Caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas

Las caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas como previamente se menciona, se realizaron basándose en valores de informes semestrales del Departamento de Control de Calidad de COSAALT, según los métodos establecidos por el mismo, desde la gestión 2019 a la 2023. Además de tomar en cuenta los valores de parámetros diarios que se realizan en la planta, según sus informes de control de cada 4 horas.

A continuación, se presenta el Cuadro II- 1 y II- 2 donde se muestran los métodos usados en el laboratorio de COSAALT para los informes semestrales y los usados para parámetros diarios en la planta de Tabladita.

Cuadro II-1. Métodos usados en el laboratorio de COSAALT para informes semestrales.

PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO
Ph	Adimensional	NB-31001
Conductividad Específica	µS/cm	Electrométrico
Turbiedad	UNT	Nefelométrico
Coliformes Fecales	NMP/100ml	Filtro membrana
Color	UCV	SM 2120 B
Sabor y Olor	Adimensional	SM (2160-2150) B
Solidos Totales Disueltos	mg/l	Electrométrico
Alcalinidad Total	mg/l	SM 2320 B
Calcio	mg/l	SM 3500 - Ca D
Cloruros	mg/l	SM 4500 - Cl B
Dureza Total	mg/l	SM 2340 C
Hierro total	mg/l	8508 HACH
Magnesio	mg/l	SM 3500 - Mg E
Manganoso	mg/l	8149 HACH
Sulfatos	mg/l	SM 4500 - SO4 E
Nitritos	mg/l	8507 HACH
Nitratos	mg/l	8039 HACH
Aluminio	mg/l	8012 HACH
Amoniaco	mg/l	SM 4500-C
Cobre	mg/l	8506-8026 HACH

Zinc	mg/l	8009 HACH
Sodio	mg/l	Electrométrico - ion selectivo
Coliformes Totales	NMP/100ml	Filtro membrana
Pseudomonas aeruginosa	Aus/Pre.	Cultivo en placa
Clostridium perfringens	Aus/Pre.	Cultivo en placa

Fuente: Dpto. control de calidad COSAALT.

Cuadro II-2. Métodos usados en la Planta de Tabladita para parámetros diarios

PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO EMPLEADO
Caudal	l/s	In Situ por medio de vertedero
Turbiedad	UNT	In Situ por medio de Turbidímetro
pH		In Situ por medio de Multiparámetro de HANNA
Conductividad	µS/cm	In Situ por medio de Multiparámetro de HANNA
Temperatura	°C	In Situ por medio de Multiparámetro de HANNA
Cloro residual	mg/l	In Situ por medio de Checker HANNA HI701

Fuente: P.T.A.P. Tabladita

Figura 2-5. Informe anual 2022 del Departamento de Control de Calidad de COSAALT

Fuente: Dpto. control de calidad COSAALT.

Figura 2-6. Ejemplo de Control de Parámetros Diarios 2023

CONTROL DE PARAMETROS DIARIOS
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Fecha: 16-10-2023

Hoja N°.....

OPERADOR	Hora	Caudal Agua	Turbiedad		pH	Conductividad		Temp. °C	Dissipación	
			Cruda	Trat.		Cruda	Trat.			Cruda
MEM	0:00	233,38	3,58	0,64	7,26	3,13	31,05	39,00	16,81	0,43
Edith	10:00	233,38	0,2	0,2	7,43	3,43	36,30	37,30	17,3	0,75
W. M.	14:00	233,38	5,14	1,31	7,81	3,70	49,00	58,77	21,1	0,65
W. M.	18:00	233,37	6,63	2,10	7,46	3,46	53,21	52,11	22,1	0,65
Alonso	22:00	233,38	2,21	1,77	7,15	2,08	37,00	58,72	20,5	0,16
Total	2:00	283,88	6,00	1,81	7,33	3,12	57,60	63,21	19,1	0,58

LAVADO DE FILTROS			CONSUMO DE REACTIVOS						
Filtro N°	Hora Inicial	Hora Final	Hora	Gas	Al(50%)	Disco.	De Ca	Cal	Operador
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Nº 10 min 4/row

LAVADO DE FLOCULADORES			LAVADO DE SEDIMENTADORES		
Floculador N°	Hora Inicial	Hora Final	Sedimentador N°	Hora Inicial	Hora Final
N-1	08:00	15:30			
A	14:30	14:30			

OBSERVACIONES.....

1/10/23

$Turb = 0,56$ FNU
 $pH = 7,42$
 $Cond = 19,41$
 $T^{\circ}C = 17,15$

$T_1 pas = 4,87$
 $Turb = 4,87$
 $pH = 7,5$
 $Cond = 48,37$
 $T^{\circ}C = 18$

Fuente: P.T.A.P. Tabladita

A su vez, a manera de comparación y **verificación** de valores, basándose en la contaminación en la fuente del Rio Guadaluquivir, se accedió a información de los análisis del monitoreo al Rio Guadaluquivir del **Programa Asistente de Gestión Unificada del Agua-SIHITA** de la Gobernación del Departamento de Tarija en la gestión 2022 y también los análisis del seguimiento al Rio Guadaluquivir realizados por COSAALT en la gestión 2023.

Los parámetros y métodos de medición que realizan se presentan en el Cuadro II-3 y el Cuadro II-4

Cuadro II-3. Métodos usados en el SEDEGIA en septiembre del 2022

PARAMETRO	UNIDAD	METODO DE ENSAYO
Conductividad	µs/cm	Potenciometría
Oxígeno disuelto	mg/l	Potenciometría
pH		Potenciometría
Turbiedad	NTU	Nefelometría
Temperatura del agua	°C	Termometría
Cromo total	mg/l	Espectrometría de absorción atómica
DQO	mg/l	Fotometría
Dureza total	mg/l	Volumetría
Fosforo(c/fosfato)	mg/l	Espectrofotometría
Hierro total	mg/l	Espectrometría de absorción atómica
Nitratos	mg/l	Fotometría
Nitritos	mg/l	Fotometría
Sulfatos	mg/l	Nefelometría
Coliformes totales	NMP/100ml	Tubos múltiples
Escherichia coli	NMP/100ml	Tubos múltiples

Fuente: SEDEGIA (GADT)

Cuadro II-4. Métodos usados en COSAALT para seguimiento del Rio Guadaluquivir, septiembre 2023

PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO
Temperatura	°C	Electrométrico
pH		Electrométrico
Conductividad	µs/cm	Electrométrico
Oxígeno disuelto	mg/l	Oxidímetro
Turbidez	UNT	Nefelométrico
DBO5	mg/l	Electrodo Selectivo-Oxidímetro
DQO	mg/l	Oxidación-Reflujo Cerrado
Coliformes Totales	NMP/100ml	Tubos múltiples
Coliformes Fecales	NMP/100ml	Tubos múltiples

Fuente: Dpto. control de calidad COSAALT.

Figura 2-7. Informe temporada seca 2022, SEDEGIA

GUADALQUIVIR

RESULTADOS

Nº	Parámetros	Resultados	Unidad	Técnica Empleada
Parámetros medidas in situ				
1	Conductividad eléctrica	113	µS/cm	Potenciómetria
2	Oxígeno Disuelto	6,38	mg/l	Potenciómetria
3	pH	6,44		Potenciómetria
4	Turbiedad	1,83	NTU	Nefelometria
5	Temperatura del Agua	19,49	°C	Termometria
Parámetros fisicoquímicos medidas en Laboratorio				
6	Cloro total (±3 y +6)	<0,038	mg/l	Especrometría de absorción atómica
7	DOD	45	mg/l	Fotometria
8	Dureza total	66,37	mgCaCO ₃ /l	Volumetrica
9	Fosforo (cifra total)	0,73	mg/l	Especrofotometria
10	Hierro total	0,51	mg/l	Especrometría de absorción atómica
11	Nitratos	53,8	mg/l	Fotometria
12	Nítricos	1,32	mg/l	Fotometria
13	Sulfatos	16,21	mg/l	Nefelometria
Parámetros microbiológicos medidas en Laboratorio				
14	Coliformes Totales	4,6 x 10 ³	NMP/100ml	Tubos múltiples
15	Escherichia coli	2,0 x 10 ²	NMP/100 ml	Tubos múltiples

Ensayo: *Elizabeth Arriaga Colino*
Analista: *Mario Cornelio Guerra M.*
Centro de Investigación del Agua (CIMA) /
Laboratorio de Referencia y Busto de
Agua

Aprobado: *Mario Cornelio Guerra M.*
Centro de Control de Calidad
Centro de Investigación del Agua
(CIMA) /
Laboratorio de Referencia y Busto de
Agua

Firma: *Elizabeth Arriaga Colino* Firma: *Mario Cornelio Guerra M.*

CENTRO DE INVESTIGACION DEL AGUA
UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MIGUEL SARACO
Avda. Vizcaína, Col. Lomas del Templo, zona 13
Tel: +52 724 464 4557
Tuxtla - Baja

Guadalupe

Fuente: SEDEGIA

Figura 2-8. Informe de seguimiento del Rio Guadalquivir, COSAALT

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD
DE AGUAS "COSAALT"

LAB-COSAALT-FOR-039
Versión: 01
Vigencia: 06/10/2015
Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO DE ANALISIS DE AGUA

SEGUIMIENTO DEL RIO GUADALQUIVIR

SOLICITANTE		GERENCIA TECNICA					
DATOS DE LA MUESTRA		Nº 41 al 45					
ZONA		Ciudad de Tarija					
FUENTE		Río Guadalquivir (Desde Obrajes hasta El Temporal)					
FECHA DE MUESTREO		Miércoles 06 de Septiembre 2023					
MUESTREADOR		Sr. Hugo Carrón					
FECHA DE RECEPCION		Miércoles 06 de Septiembre 2023					
		HORA: 11:55 a.m.					
MUESTRA Nº	Unidad	Método	1 El Angosto	2 B/Petrolero	3 German Busch	4 San Martín	5 Obrajes
ZONA			08:30 a.m.	08:50 a.m.	09:20 a.m.	09:40 a.m.	10:40 a.m.
LUGAR							
HORA							
Temperatura	°C	Electrométrico	18,6	18,6	18,7	18,8	18,8
pH		Electrométrico	7,31	6,99	6,75	6,45	6,63
Conductividad	µS/cm	Electrométrico	353,0	170,0	89,0	98,0	76,0
Oxígeno Disuelto	mg/l	Oxídmetro	3,53	4,42	5,38	5,54	5,35
Turbidez	UNT	Nefelométrico	8,24	4,58	3,91	3,77	3,28
DBOS	mg/l	Electrodo Selectivo-Oxídmetro	16,44	5,46	4,02	3,80	4,12
DQO	mg/l	Oxidación -Refugio Cerrado	33,65	15,53	10,36	7,76	12,95
Sólidos Susp.Totales	mg/l	Gravimétrico					
Califormes Totales	NMP/100ml	Tubos múltiples	1,5E+06	9,3E+05	7,5E+03	4,3E+02	1,1E+04
Califormes Fecales	NMP/100ml	Tubos múltiples	4,3E+05	4,3E+04	4,3E+03	2,3E+02	4,6E+03

Observación: No se realizó el análisis de Sólidos Suspensos por desperfectos de la bomba de vacío.

Fecha Presentación: 12 de Septiembre del 2023

Responsable Análisis: *Jorge E. Arriaga Colino*
Fisicoquímico y Microbiológico
Téc. Sup. Leticia Cano C.

JEFE DPTO. DE CALIDAD
Ing. Enrique T. Arriaga F.
S. I. 322-0000-0000-0000-0000
COSAALT R.L.

Fuente: Dpto. control de calidad COSAALT.

Debido a variaciones en ciertos parámetros que se desvían de la norma, como lo son la **Ley 1333, la NB 689 y la NB 512**, según los datos mostrados e informes históricos de la gobernación y COSAALT, se añadió los mismos en los monitoreos de los parámetros estratégicos realizados para apoyo al presente proyecto, los cuales para fortificar el mismo, fueron llevados a dos laboratorios, el de COSAALT y el del CEANID.

Los parámetros y métodos de medición que realizan se presentan en el Cuadro II-5 y el Cuadro II-6.

Cuadro II-5. Métodos usados en COSAALT en los análisis

PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO
Fosforo Total	mg/l	8023-HACH
Cromo hexavalente	mg/l	8023-HACH
DBO5	mg/l	Oxidímetro
DQO	mg/l	Oxidación Reflujo Cerrado

Fuente: Dpto. control de calidad COSAALT.

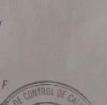
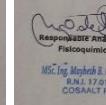
Cuadro II-6. Métodos usados en el CEANID en los análisis

PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO
DBO5	mg/l	SM 5210- B
DQO	mg/l	USEPA 410.4
Fosforo Total	mg/l	SM 4500-P-D
Cromo Total	mg/l	SM 3500-CrB
Cadmio disuelto	mg/l	SM 3500-CdB

Fuente: CEANID (UAJMS)

Además de los parámetros insitu que se tomaron en planta al momento de tomar la muestra, cuyos métodos usados se encuentran en el Cuadro II-2.

Figura 2-9. Informe del monitoreo, COSAALT

 LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE AGUAS "COSAALT-R.L." Zona: San Luis Teléf: 66-30594 - email: lab_cosaalt@yahoo.es INFORME DE ENSAYO DE ANÁLISIS DE AGUA COSAALT-FOR-039 Versión 01 Vigente: 01/09/2015 Página 1 de 1	 LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE AGUAS "COSAALT-R.L." Zona: San Luis Teléf: 66-30594 - email: lab_cosaalt@yahoo.es INFORME DE ENSAYO DE ANÁLISIS DE AGUA COSAALT-FOR-039 Versión 01 Vigente: 01/09/2015 Página 1 de 1																				
INFORME DE ENSAYO DE ANÁLISIS DE AGUA																					
<p>Solicitante: Paola S. Galean Ayarde Dirección: -Teléfono: - DATOS DE MUESTRA: Zona: Tabladita, Av. San Antonio Lugar de Muestreo: Planta de Tratamiento de agua potable Aspecto de la Muestra: Entrada a planta - Tipos: Río Guadaluquivir Resp. de Muestreo: Paola Galean Ayarde Fecha de Muestreo: 16/10/2023 Fecha de Recipción en lab.: 17/10/2023 Fecha de Realización del ensayo: 18 al 27/10/2023</p> <p>Salida: Tabladita, Av. San Antonio Lugar de Muestreo: Planta de Tratamiento de agua potable Aspecto de la Muestra: Entrada a planta - Tipos: Río Guadaluquivir Resp. de Muestreo: Paola Galean Ayarde Fecha de Muestreo: 16/10/2023 Fecha de Recipción en lab.: 17/10/2023 Fecha de Realización del ensayo: 18 al 27/10/2023</p>																					
<p>RESULTADOS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Unidad</th> <th>Técnica</th> <th>Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fórmico Total</td> <td>mg/l</td> <td>8023 - HAC1</td> <td>0,38</td> </tr> <tr> <td>Cróme hexavalente</td> <td>mg/l</td> <td>8023 - HAC4</td> <td>0,02</td> </tr> <tr> <td>DBO5</td> <td>mg/l</td> <td>Oxímetro</td> <td>1,20</td> </tr> <tr> <td>DQO</td> <td>mg/l</td> <td>Oxidación Refugio Cerrado</td> <td>2,60</td> </tr> </tbody> </table> <p>Sol. = Sólidos SM = Standard Methods; NB Norma Boliviana.</p> <p>Observaciones: Los resultados emitidos corresponden a la muestra recibida en el laboratorio. Los datos de la muestra analizada fueron proporcionados por el cliente.</p>		Parámetro	Unidad	Técnica	Resultado	Fórmico Total	mg/l	8023 - HAC1	0,38	Cróme hexavalente	mg/l	8023 - HAC4	0,02	DBO5	mg/l	Oxímetro	1,20	DQO	mg/l	Oxidación Refugio Cerrado	2,60
Parámetro	Unidad	Técnica	Resultado																		
Fórmico Total	mg/l	8023 - HAC1	0,38																		
Cróme hexavalente	mg/l	8023 - HAC4	0,02																		
DBO5	mg/l	Oxímetro	1,20																		
DQO	mg/l	Oxidación Refugio Cerrado	2,60																		
       <p>Paola S. Galean Ayarde Responsable Análisis Fisiológico Té. Sup. Lógica Cierre R.N. 11.892 Analista Microbiología de Agua Laboratorio COSAALT R.L. SALB R.N. 11.892 COSAALT R.L.</p> <p>Ing. Enrique T. Ayarde F. Responsable Análisis Fisiológico Té. Sup. Lógica Cierre R.N. 11.892 Analista Microbiología de Agua Laboratorio COSAALT R.L. SALB R.N. 11.892 COSAALT R.L.</p> <p>Paola S. Galean Ayarde Responsable Análisis Fisiológico Té. Sup. Lógica Cierre R.N. 11.892 Analista Microbiología de Agua Laboratorio COSAALT R.L. SALB R.N. 11.892 COSAALT R.L.</p> <p>Ing. Enrique T. Ayarde F. Responsable Análisis Fisiológico Té. Sup. Lógica Cierre R.N. 11.892 Analista Microbiología de Agua Laboratorio COSAALT R.L. SALB R.N. 11.892 COSAALT R.L.</p>																					

Fuente: Dpto. control de calidad COSAALT.

Figura 2-10. Informe del monitoreo, CEANID

<p>CEANID-FOR-03 Versión 01 Fecha de emisión: 03/08/2015</p> <p>UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAIL SABACHO" FACULTAD DE "CIENCIAS Y TECNOLOGÍA" CENTRO DE ANÁLISIS, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO "CEANID" Laboratorio Oficial del Ministerio de Salud y Deportes Red Nacional de Laboratorios Oficiales de Alimentos Laboratorio Oficial del "SENASAG"</p> <p>INFORME DE ENSAYO</p> <p>I. INFORMACIÓN DEL SOLICITANTE</p> <p>Cliente: Paola Galean Ayarde Solicitante: Paola Galean Ayarde Dirección: Av. El Encoro s/n - Barrio Tablada Teléfono/Fax: 72992786 Correo-e: ***** Código: AG 289/23</p> <p>II. INFORMACIÓN DE LA MUESTRA</p> <p>Descripción de la muestra: Agua Superficial Código de muestra: SP-01 Fecha de vencimiento: ***** Lote: **** Fecha y hora de muestreo: 2023-10-16 Procedencia: Lugar de muestreo: Tarja - Tablada - Tarja Tablada - PTAR Tarja (Salida de la planta) Responsable de muestreo: Paola Galean Ayarde Código de la muestra: 1448 FQ 1119 Fecha de recepción de la muestra: 2023-10-16 Código de la muestra: 1448 FQ 1119 Fecha de ejecución de ensayo: De 2023-10-16 al 2023-10-27 Cantidad recibida: 1000 ml</p> <p>III. RESULTADOS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>PARÁMETRO</th> <th>TECNICA Y/O MÉTODO DE ENSAYO</th> <th>UNIDAD</th> <th>RESULTADOS</th> <th>LIMITES PERMITIDOS (para agua potable) Min. - Max.</th> <th>REFERENCIA DE LOS LÍMITES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cromo disuelto</td> <td>SM 3500 GEB</td> <td>mg/l</td> <td>< 0,002</td> <td>Sin referencia</td> <td>Sin referencia</td> </tr> <tr> <td>OD645/OD665</td> <td>mg/l (referencia: 0.005)</td> <td></td> <td>0.000</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>1) Los resultados reportados se remiten a la muestra ensayada en el Laboratorio 2) El presente informe sólo puede ser reproducido en forma parcial y/o total, con la autorización del CEANID 3) Los datos de la muestra y el muestreo, fueron suministrados por el Cliente</p> <p>Tarja, 27 de octubre de 2023</p> <p>M.Sc. Ing. Freddy G. Lopez Zamora Jefe CEANID</p> <p>CEANID - Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo - UNAJS - TARIJA</p>	PARÁMETRO	TECNICA Y/O MÉTODO DE ENSAYO	UNIDAD	RESULTADOS	LIMITES PERMITIDOS (para agua potable) Min. - Max.	REFERENCIA DE LOS LÍMITES	Cromo disuelto	SM 3500 GEB	mg/l	< 0,002	Sin referencia	Sin referencia	OD645/OD665	mg/l (referencia: 0.005)		0.000			<p>CEANID-FOR-03 Versión 01 Fecha de emisión: 03/08/2015</p> <p>UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAIL SABACHO" FACULTAD DE "CIENCIAS Y TECNOLOGÍA" CENTRO DE ANÁLISIS, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO "CEANID" Laboratorio Oficial del Ministerio de Salud y Deportes Red Nacional de Laboratorios Oficiales de Alimentos Laboratorio Oficial del "SENASAG"</p> <p>INFORME DE ENSAYO</p> <p>I. INFORMACIÓN DEL SOLICITANTE</p> <p>Cliente: Paola Galean Ayarde Solicitante: Paola Galean Ayarde Dirección: Av. El Encoro s/n - Barrio Tablada Teléfono/Fax: 72992786 Correo-e: ***** Código: AG 289/23</p> <p>II. INFORMACIÓN DE LA MUESTRA</p> <p>Descripción de la muestra: Agua superficial Código de muestra: EP-01 Fecha de vencimiento: ***** Lote: **** Fecha y hora de muestreo: 2023-10-16 Procedencia: Lugar de muestreo: Tarja - Tablada - Tarja Tablada - PTAR Tarja (Entrada a la planta) Responsable de muestreo: Paola Galean Ayarde Código de la muestra: 1448 FQ 1119 Fecha de recepción de la muestra: 2023-10-16 Código de la muestra: 1448 FQ 1119 Fecha de ejecución de ensayo: De 2023-10-16 al 2023-10-27 Cantidad recibida: 1000 ml</p> <p>III. RESULTADOS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>PARÁMETRO</th> <th>TECNICA Y/O MÉTODO DE ENSAYO</th> <th>UNIDAD</th> <th>RESULTADOS</th> <th>LIMITES PERMITIDOS (para agua potable) Min. - Max.</th> <th>REFERENCIA DE LOS LÍMITES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ODO 1</td> <td>SM 4500-D</td> <td>mg/l</td> <td>11</td> <td>Sin referencia</td> <td>Sin referencia</td> </tr> <tr> <td>ODO 2</td> <td>US EPA 210.4</td> <td>mg/l</td> <td>18.6</td> <td>Sin referencia</td> <td>Sin referencia</td> </tr> <tr> <td>Fórmico total</td> <td>SM 4500-D</td> <td>mg/l</td> <td>0,02</td> <td>Sin referencia</td> <td>Sin referencia</td> </tr> </tbody> </table> <p>1) Los resultados reportados se remiten a la muestra ensayada en el Laboratorio 2) El presente informe sólo puede ser reproducido en forma parcial y/o total, con la autorización del CEANID 3) Los datos de la muestra y el muestreo, fueron suministrados por el Cliente</p> <p>Tarja, 27 de octubre de 2023</p> <p>M.Sc. Ing. Freddy G. Lopez Zamora Jefe CEANID</p> <p>CEANID - Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo - UNAJS - TARIJA</p>	PARÁMETRO	TECNICA Y/O MÉTODO DE ENSAYO	UNIDAD	RESULTADOS	LIMITES PERMITIDOS (para agua potable) Min. - Max.	REFERENCIA DE LOS LÍMITES	ODO 1	SM 4500-D	mg/l	11	Sin referencia	Sin referencia	ODO 2	US EPA 210.4	mg/l	18.6	Sin referencia	Sin referencia	Fórmico total	SM 4500-D	mg/l	0,02	Sin referencia	Sin referencia
PARÁMETRO	TECNICA Y/O MÉTODO DE ENSAYO	UNIDAD	RESULTADOS	LIMITES PERMITIDOS (para agua potable) Min. - Max.	REFERENCIA DE LOS LÍMITES																																						
Cromo disuelto	SM 3500 GEB	mg/l	< 0,002	Sin referencia	Sin referencia																																						
OD645/OD665	mg/l (referencia: 0.005)		0.000																																								
PARÁMETRO	TECNICA Y/O MÉTODO DE ENSAYO	UNIDAD	RESULTADOS	LIMITES PERMITIDOS (para agua potable) Min. - Max.	REFERENCIA DE LOS LÍMITES																																						
ODO 1	SM 4500-D	mg/l	11	Sin referencia	Sin referencia																																						
ODO 2	US EPA 210.4	mg/l	18.6	Sin referencia	Sin referencia																																						
Fórmico total	SM 4500-D	mg/l	0,02	Sin referencia	Sin referencia																																						

Fuente: CEANID - UAJMS

Como hubo variaciones entre estos dos laboratorios, y teniendo conocimiento de que la gobernación realizo su monitoreo en octubre, se vio por conveniente el solicitar los resultados de su monitoreo para hacer comparaciones actuales y sacar conclusiones.

Los parámetros y métodos de medición que realizo el SEDEGIA en la gestión 2023 se presentan en el Cuadro II-7

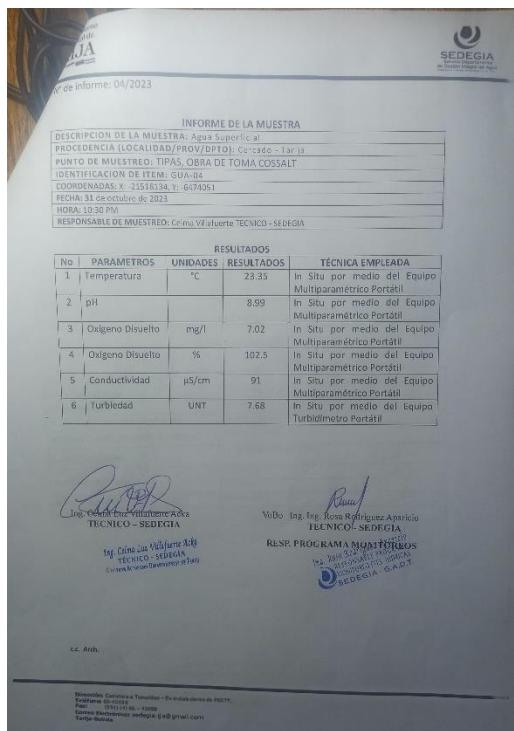
Cuadro II-7. Métodos usados en el SEDEGIA gestión 2023

PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO EMPLEADO
Temperatura	°C	In Situ, por medio del Equipo Multiparametrico Portatil
pH		In Situ, por medio del Equipo Multiparametrico Portatil
Oxígeno disuelto	mg/l	In Situ, por medio del Equipo Multiparametrico Portatil
Oxígeno disuelto	%	In Situ, por medio del Equipo Multiparametrico Portatil
Conductividad	µS/cm	In Situ, por medio del Equipo Multiparametrico Portatil
Turbiedad	UNT	In Situ, por medio del Equipo Turbidímetro Portatil
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)	mg/l	Manometría
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	Fotometría
Nitritos	mg/l	Fotometría
Nitratos	mg/l	Fotometría
Nitrógeno amoniacal	mg/l	Volumetría
Cromo (VI)	mg/l	Fotometría
Hierro total	mg/l	Fotometría
Sulfatos	mg/l	Fotometría
Cloro total	mg/l	Fotometría
Sodio total	mg/l	Espectrofotometría de AA
Potasio total	mg/l	Fotometría
Calcio total	mg/l	Fotometría

Magnesio total	mg/l	Fotometría
Alcalinidad total	mg/l	Fotometría
Dureza total	mg/l	Volumetría
Fosforo total (c/fosfato)	mg/l	Fotometría
Solidos Suspensidos Totales	mg/l	Gravimetría
Coliformes totales	NMP/100ml	Tubos múltiples
Coliformes fecales	NMP/100ml	Tubos múltiples

Fuente: Elaboración propia basada en informe de SEDEGIA gestión 2023

Figura 2-11. Informe temporada seca 2023, SEDEGIA



RESULTADOS			
Nº	PARÁMETRO	RESULTADOS	UNIDAD
1	Demandia Biológica de Oxígeno (DBO5)	7	mg/l
2	Demandia Química de Oxígeno	33	mg/l
3	Nitratos	0,07	mg/l
4	Nitratos	<0,1	mg/l
5	Nitrógeno amoniacal	2,6	mg/l
6	Cloro (Cl)	0,0583	mg/l
7	Cloro total	0,08	mg/l
8	Sulfatos	10	mg/l
9	Cloro total	0,05	mg/l
10	Sodio total	6,4	mg/l
11	Potasio total	<0,1	mg/l
12	Calcio total	10	mg/l
13	Magnesio total	0	mg/l
14	Alcalinidad total	205	mg/l
15	Bicarbonato total	20	mg/l
16	Fosforo total (c/fosfato)	0,15	mg/l
17	Sólidos Suspensos Totales	123,8004	mg/l
PARAMETROS MICROBIOLOGICOS MEDIDOS EN LABORATORIO			
18	Coliformes totales	4,60E+03	NMP/100 ml
19	Coliformes fecales	1,50E+03	NMP/100 ml

n.d. no detectado

COPIA

Fuente: SEDEGIA (GADT) – CIAGUA (UAJMS)

2.1.1.3.1. Dosificación de gas cloro

Teniendo en cuenta que varios valores de cloro residual se encuentran bajos en comparación con valor óptimo de la normativa nacional vigente, se analizó la dosis óptima para el tratamiento de desinfección, para lo cual se realizó una curva de comportamiento del gas cloro en función al cloro residual, donde se hizo el registro cada cuatro horas de la dosificación del cloro en función al cloro residual.

Figura 2-12. Estudiante haciendo el registro de la dosificación de gas cloro



Fuente: Elaboración propia

2.1.1.4. Pruebas de tratabilidad

Las pruebas de tratabilidad se llevaron a cabo por medio del ensayo de jarras. Estas pruebas consisten en simular el proceso de coagulación - floculación que se lleva a cabo en la planta de tratamiento. Para ello fue necesario utilizar seis (6) jarras cada una con una concentración diferente de sulfato de aluminio y cal, aplicando un ensayo de jarras con ajuste simultaneo.

En estas pruebas como se puede ver en la parte de resultados y análisis se vio por conveniente el usar diferentes turbiedades para poder realizar un análisis más completo y además que se adecue a las posibilidades de usar el equipo de prueba de jarras en planta, ya que no siempre está sin uso y a disposición de prácticas.

Figura 2-13. Ensayo de jarras



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-14. Formación de flocs y sedimentación



Fuente: Elaboración propia

2.1.1.5. Pruebas hidráulicas y operativas

El objeto de estas pruebas era la comprobación del correcto montaje, funcionamiento operativo de cada unidad, accesorios, equipos e instrumentos y la proyección que se utilizó para la construcción de la planta. Para ello fue necesario tomar las medidas de cada una de las unidades, para así realizar los cálculos según la norma NB 689 y sus reglamentos técnicos.

Para las pruebas operativas fue necesario verificar el manual de operación e identificar las funciones del operario, el horario y la frecuencia en que las realiza.

Figura 2-15. Consultas a técnico PTAP



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-16. Consultas a operario PTAP



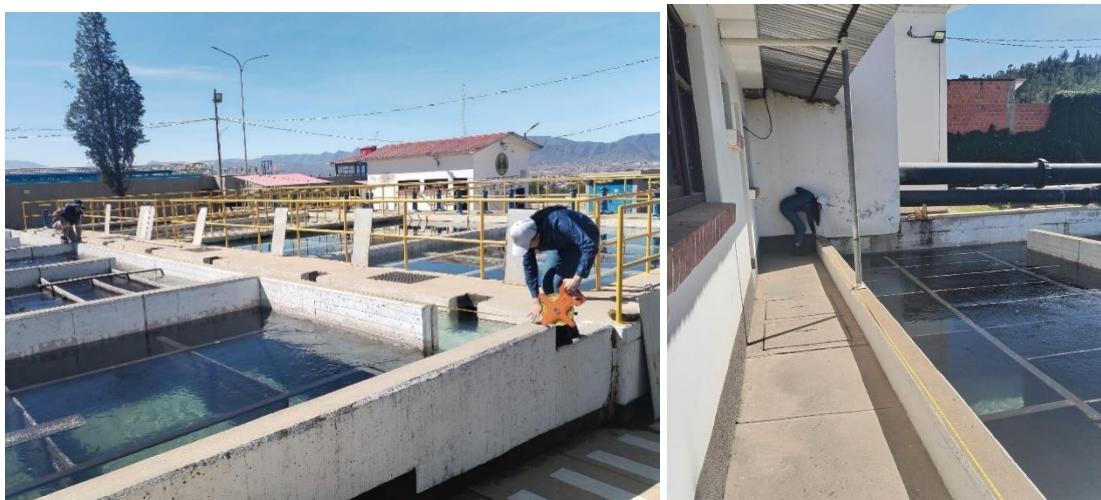
Fuente: Elaboración propia

Figura 2-17. Medición de datos de la Unidad de Mezcla Rápida



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-18. Medición de datos de la Unidad de Floculación



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-19. Medición de datos de la Unidad de Filtración



Fuente: Elaboración propia

2.1.2. Resultados y Análisis

Ahora mediante este apartado se procede a ver los resultados y análisis del diagnóstico según lo mencionado previamente.

2.1.2.1. Revisión de la PTAP

Para la revisión de la PTAP se tuvo en cuenta el manual de operación, los diferentes planos y el proceso de tratamiento, el cual se describió previamente. Por lo cual se procedió a realizar las fichas técnicas del proceso, que se adjuntan al presente trabajo.

Cuadro II-8. Ficha Técnica de la Unidad de Mezcla rápida

Unidad
Mezcla rápida

			
Material de construcción	Concreto		
Dimensiones	Ancho: 0,800 metros Altura de caída de agua variable en función a la época.		
Operación y proceso	<p>Mediante esta unidad se permite realizar el proceso de coagulación al agua y hacer la medición del caudal. Dependiendo de las características del agua cruda entrante se dosifica el sulfato de aluminio de ser necesario para el proceso de coagulación.</p> <p>En esta unidad se debe realizar el muestreo de los parámetros para saber las características entrantes del agua cruda, parámetros estipulados en la Normativa Boliviana, cada cuatro horas al día.</p>		
Estado físico	Bueno	X	<ul style="list-style-type: none"> - La unidad en si no presenta filtraciones. - Se encuentra impermeabilizada con pintura y solo cuando esta sin agua se hace limpieza, es decir una vez al año.
	Regular		
	Malo		

Estado operativo	<ul style="list-style-type: none"> - En época de estiaje se inspecciona la unidad de mezcla rápida, así como compuertas de distribución de caudal a las unidades siguientes cada mes aproximadamente, mientras que las válvulas de compuerta se inspeccionan solo cuando llega agua turbia. - Todos los días se hace inspección de materiales flotantes que estuviesen retenidos contra las paredes, o de materiales sumergidos que pudieran obstaculizar el paso de agua. - Diariamente el personal de la planta inspecciona las tuberías de descarga de las soluciones de sulfato de aluminio y cal en la unidad de mezcla rápida, garantizando que no exista taponamientos. El mantenimiento de dichas tuberías en caso de taponamientos se realiza una vez al año.
-------------------------	---

Fuente: Elaboración propia

Cuadro II-9. Ficha Técnica de la Unidad de Floculación

Unidad	
Floculación	
	
Material de construcción	Pantallas de madera quina
Dimensiones	Existen 2 unidades de 12,300 metros de largo, 10,500 metros de ancho y 1,500 metros de profundidad diseñadas para tratar 160 l/s.
Operación y proceso	El agua una vez que pasa por el canal de parshall, entra por gravedad, donde después de un tiempo se forma floccs, (Es un

	conglomerado de partículas sólidas que se genera a través de los procesos de coagulación y floculación, está constituido en primer lugar por los sólidos que se separan del agua, así como también por los sólidos que aporta el coagulante.) para luego precipitar en el sedimentador.		
Estado físico	Bueno		<ul style="list-style-type: none"> - Varias pantallas de madera se encuentran muy viejas, se cambian cada 10 años aproximadamente y se hace basándose en una inspección visual por el operador. - Existen perdidas leves por infiltración en la entrada y en las uniones de cada compartimento. - Las compuertas del canal que unen el floculador con el sedimentador se encuentran en buen estado, a pesar de que no se cambian. Existe una leve fuga de agua en las mismas. - Se depositan sedimentos de manera muy continua en el floculador.
	Regular	X	
	Malo		
Estado operativo	<ul style="list-style-type: none"> - En época seca la limpieza de las cámaras de floculación se realiza semanalmente, se limpia las pantallas de madera de las partículas adheridas por las características del agua de las tipas, la cual posee algas y demás. 		

	<ul style="list-style-type: none"> - Para la realización de la limpieza se trabaja con guantes que no son para agua, así también con botines que no son para agua, los overoles que utilizan diariamente los operadores y casco de seguridad en caso de caídas.
--	--

Fuente: Elaboración propia

Cuadro II-10. Ficha Técnica de la Unidad de Sedimentación

Unidad		
Sedimentación		
		
Material de construcción	Placas de Asbesto Cemento inclinadas y separadores de madera de aproximadamente 1 pulgada (2,54cm)	
Dimensiones	<p>4 unidades de con:</p> <p>W=ancho= 4,500</p> <p>L=longitud= 9,700</p> <p>H=altura= 4,500</p>	
Operación y proceso	A la salida de la unidad de floculación el agua es conducida por un canal que distribuye el agua floculada a esta unidad que contiene las placas de Asbesto Cemento inclinadas para precipitar los flocs. El ingreso es ascendente, es decir de abajo arriba, donde varias tuberías perforadas conducen el agua clarificada en esta unidad y se transporta a la unidad de filtración.	
Estado físico	Bueno	<input checked="" type="checkbox"/> Paredes de hormigón
	Regular	

	Malo		<p>desgastadas y con fisuras leves.</p> <p>- Las válvulas de compuerta se cierran correctamente y poseen buena maniobrabilidad, se les realiza mantenimiento una vez al año, poseen deterioro y corrosión leves.</p>
Estado operativo			<ul style="list-style-type: none"> - Durante la operación normal, la compuerta de ingreso al sedimentador permanece completamente abierta, a fin de evitar gradientes de velocidades que provoquen la ruptura del floculo y perjudique la eficiencia del proceso. - La limpieza de estas unidades se realiza dependiendo al operador, lo que es usual mensualmente, a veces trimestralmente, todo depende de la eficiencia de remoción y de la calidad del efluente a tratar, por ejemplo, en época seca es más frecuente por la calidad del agua de las Tipas. - Para la limpieza se ingresa por unas compuertas a la parte de debajo de los sedimentadores, para la realización de esta actividad se entra con botas para agua y un traje impermeable, además de guantes de tela o hilo.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro II-11. Ficha Técnica de la Unidad de Filtración rápida

Unidad
Filtración rápida

	 							
Material de construcción	La unidad de filtración actualmente está formada por una capa de arena, seguido de una capa de grava la cual funciona como soporte final							
Dimensiones	Son 4 filtros pequeños de $4m^3$ y 2 grandes de $6m^3$, ambos de aproximadamente 5 metros de profundidad.							
Operación y proceso	La unidad de filtración es descendente y el agua sedimentada entra a este proceso donde atraviesa una capa de arena de 30 centímetros de espesor, seguido de una capa de grava de 50 centímetros y finalmente el agua es captada con un fondo tipo Wheler.							
Estado físico	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">Bueno</td> <td style="width: 33%;"></td> <td rowspan="3" style="width: 33%; vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> - Las paredes de los filtros están desgastadas y necesitan una impermeabilización interna, la recomiendan cada 5 años, pero al parecer ya pasaron más de 5 años de la última vez. - No hay pérdidas por compuertas del canal de </td> </tr> <tr> <td>Regular</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Malo</td> <td style="text-align: center;">X</td> </tr> </table>	Bueno		<ul style="list-style-type: none"> - Las paredes de los filtros están desgastadas y necesitan una impermeabilización interna, la recomiendan cada 5 años, pero al parecer ya pasaron más de 5 años de la última vez. - No hay pérdidas por compuertas del canal de 	Regular		Malo	X
Bueno		<ul style="list-style-type: none"> - Las paredes de los filtros están desgastadas y necesitan una impermeabilización interna, la recomiendan cada 5 años, pero al parecer ya pasaron más de 5 años de la última vez. - No hay pérdidas por compuertas del canal de 						
Regular								
Malo	X							

			<p>recolección o son leves.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El material de filtración ha cambiado con los años, se ha eliminado la antracita. - Existe mucha perdida por lavado y no se lava a veces por falta de agua.
Estado operativo			<ul style="list-style-type: none"> - Usualmente se realiza la limpieza superficial de uno a tres filtros por día, dependiendo del operador cual es el filtro que se limpiara de acuerdo a la saturación en los mismos, cuando no existe movimiento del agua, todo dependiendo de la calidad del agua cruda entrante. En época seca se pierde mucho más debido a que por la calidad del agua se lava todos los filtros todos los días, para evitar saturación. - La limpieza profunda de los filtros se realiza mensualmente, raspando las paredes por la generación de algas, bacterias y organismos presentes en el agua, como también el raspado de la capa denominada piel de filtro que se genera sobre la capa de arena.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro II-12. Ficha Técnica de la Unidad de Desinfección

Unidad
Desinfección

		
Material de construcción	Cámara de desinfección de concreto	
Dimensiones	Cámara de desinfección de 3m de largo, 1,300 de ancho y 2,500 de alto.	
Operación y proceso	<p>El agua filtrada es conducida a una cámara de desinfección, que se encuentra en la sala de cloración, para la cloración se utiliza gas cloro. Que llega a la planta en cilindros con 68 kg del gas. Una vez que pasa por la desinfección el agua es almacenada, el agua tratada es conducida mediante tubería de FFD en diámetro de 400 mm., a los tanques de almacenamiento. El tiempo desde la desinfección hasta los tanques es un aproximado de 5 minutos según operarios.</p>	
Estado físico	Bueno	
	Regular	X
	Malo	<ul style="list-style-type: none"> - En la sala de cloración no existen fisuras, grietas o fugas. - La sala de cloración se muestra como un espacio pequeño para guardar todos los cilindros y a su vez dosificar.

			<ul style="list-style-type: none"> - El estado físico de la cámara de desinfección se observa bueno, no cuenta con fisuras u otros, según las partes observables, ya que el caudal es constante, no se puede ver el estado del fondo.
Estado operativo			<ul style="list-style-type: none"> - Se realiza la limpieza de la sala de cloración una vez cada 15 días y el pintado de la misma una vez al año. - No existe un mantenimiento determinado en el equipo de dosificación actualmente, solo se hace cuando se obstruye y actualmente no se nota obstrucción. - No se hace limpieza de la cámara de desinfección debido a que hay una desinfección constante, no se aplica una desviación del agua.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro II-13. Ficha Técnica de la Unidad de Almacenamiento

Unidad
Almacenamiento

		
Material de construcción	Concreto	
Dimensiones	2 tanques de 9.000m ³	
Operación y proceso	La planta cuenta con dos tanques de almacenamiento, cada uno con un volumen de 9.000m ³ . Después de la desinfección, el agua llega al tanque que esté operando en ese momento, para luego ser distribuido en un tiempo que es variable en función al horario.	
Estado físico	Bueno	- Presenta filtraciones
	Regular	
	Malo	
Estado operativo	<ul style="list-style-type: none"> - Se realiza la limpieza de los tanques una vez al año, en época seca. Para realizar la limpieza, se utiliza botas de agua, overol de tela y guantes. - De igual manera, se realiza una vez al año el pintado del tanque. 	

Fuente: Elaboración propia

2.1.2.2. Toma de muestras

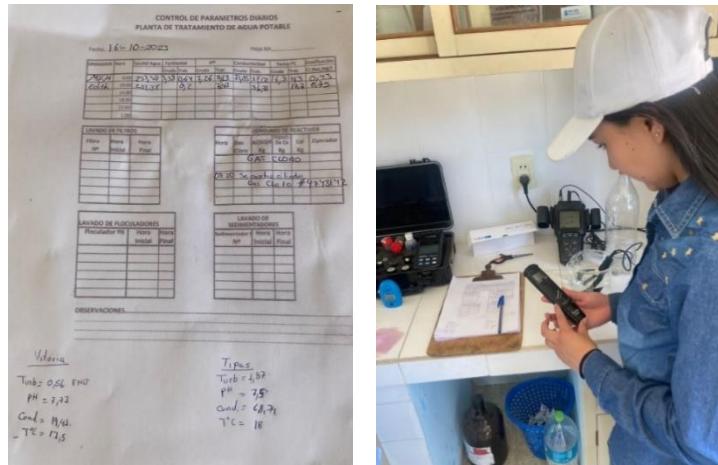
Se realizaron dos muestreos de tipo puntual al afluente y efluente de la PTAP, los días 16 de octubre y 06 de noviembre en horas de la mañana. A cada muestra se le realizó la medición de parámetros in situ (turbiedad, pH, temperatura, conductividad) y su correspondiente cadena de custodia.

Figura 2-20. Toma de datos in situ



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-21. Datos in situ del monitoreo



Fuente: Elaboración propia

2.1.2.3. Caracterizaciones físicoquímicas y microbiológicas

En los cuadros II-14, II-15 y II-16 se resumen los valores de los parámetros anuales evaluados por el Departamento de Control de Calidad de COSAALT y diarios evaluados en la planta, ambos en época seca

Cuadro II-14. Valores de promedios mensuales en época seca a la salida de la planta

				2022									
PARAMETROS		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE	
CONTROL MINIMO	UNIDADES	RANGO	TQ.PTAP 1	TQ.PTAP 2	TQ.PTAP 1	TQ.PTAP 2	TQ.PTAP 1	TQ.PTAP 2	TQ.PTAP 1	TQ.PTAP 2	TQ.PTAP 1	TQ.PTAP 1	TQ.PTAP 1
PH	Adimensional	6.5-9.0	7.36	7.34	7.26	7.33	7.55	7.67	7.84	7.66	7.40	7.35	7.53
Conductividad Especifica	µS/cm	1.500.000	444,43	47,87	144,48	57,70	661,13	65,50	72,85	73,78	74,50	94,90	75,10
Turbiedad	UNT	5.000	1.40	1.66	1.55	1.85	1.91	1.10	1.07	1.32	0.59	0.62	1.22
Cloro Residual	mg/l	0.2 - 1.5	0.38	0.47	0.43	0.67	0.70	0.68	0.70	0.64	0.68	0.60	0.50
Coliformes-Temps resistentes	UFC/100ml	< 1											
CONTROL BASICO													
Color	UCV	15,00	5.000							5.000		5.000	
Sabor y Olor	Adimensional	Aceptable	Aceptable							Aceptable		Aceptable	
Soldados Totales Disueltos	mg/l	1.000,00	26,000							39,980		44,520	
Alcalinidad Total	mg/l	37,00	15,600							15,600		30,230	
Calcio	mg/l	200,00	14,810							11,840		18,750	
Cloruros	mg/l	250,00	14,210							8,820		10,290	
Dureza Total	mg/l	500,00	22,700							1,970		22,700	
Hierro Total	mg/l	0,30	0,160							0,100		0,200	
Magnesio	mg/l	150,00	7,900							13,840		41,450	
Manganoso	mg/l	0,10	0,000							0,005		0,019	
Sulfatos	mg/l	400,00	4,000							0,100		0,009	
Nitratos	mg/l	0,10	0,009							0,005		0,001	
Nitratos	mg/l	45,00	0,900							2,400		12,140	

2023																				
PARAMETROS			JUNIO			JULIO			AGOSTO			SEPTIEMBRE			OCTUBRE			NOVIEMBRE		
CONTROL	UNIDADES	RANGO	TQ.PTAP 1	TQ. PTAP 2																
PH	Adimensional	6.5-9.0	7.15	7.23	7.19	7.09	7.25	7.31	7.23	7.14	7.24	7.06	6.03	6.18	6.03	6.18	6.03	6.18		
Conductividad Específica	µS/cm	1.500.000	30,76	17,10	49,08	49,60	64,70	40,75	51,95	54,50	57,60	49,75	84,58	110,30						
Turbiedad	UNT	5.000	0,85	0,49	1,08	0,71	1,21	0,76	1,29	2,70	0,92	1,45	2,23	4,35						
Cloro Residual	mg/l	0,2 - 1,5	0,70	0,82	0,73	0,68	0,65	0,80	0,69	0,67	0,79	0,70	0,97	0,56						
Coliformes Temp resistentes	UFC/100ml	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1						
CONTROL BASICO																				
Color	UCV	15,00		5,000																
Sabor y Olor	Adimensional	Acceptable		Acceptable																
Sólidos Totales Disueltos	mg/l	1.000,00		38,000																
Alcalinidad Total	mg/l	37,00		13,650																
Cálcio	mg/l	200,00		10,860																
Cloruros	mg/l	250,00		10,290																
Dureza Total	mg/l	500,00		15,790																
Hierro Total	mg/l	0,30		-																
Magnesio	mg/l	150,00		4,930																
Manganoso	mg/l	0,10		0,002																
Sulfatos	mg/l	400,00		5,160																
Nitratos	mg/l	0,10		-																
Nitratos	mg/l	45,00		1,20																

Fuente: Adaptado de Dpto. control de calidad COSAALT.

Cuadro II-15. Valores de parámetros anuales a la fuente de las Tipas separados por grupos según la NB-689

Fuente: Elaborado a partir de Dpto. control de calidad COSAALT.

Cuadro II-16. Valores de promedios semanales y mensuales de parámetros diarios.

	CAUDAL (l/s)		TURBIEDAD			PH			CONDUTIVIDAD			TEMPERATURA			CLORO RESIDUAL	
	Tipas	Rincon	Total	Cruda	Cruda	Tratada	Cruda	Cruda	Tratada	Cruda	Rincon	Tratada	Cruda	Rincon	Tratada	mg/l
JUNIO				Tipas	Rincon		Tipas	Rincon		Tipas	Rincon		Tipas	Rincon		
1-4				270.73	270.73		0.63	0.51		7.18	7.03		16.05	16.65		11.89
5-11				289.55	289.55		0.61	0.39		7.19	6.99		16.21	16.72		12.38
12-18				273.01	273.01		0.61	0.42		7.28	7.14		16.37	16.93		8.41
19-25				255.76	310.76		8.68	21.30		1.61	7.59		7.11	92.74		0.5519
26-30				55.00	261.31		8.95	6.81		0.71	7.49		7.19	78.48		0.5506
PROM				55.00	270.59		8.79	6.47		0.75	7.55		7.27	70.09		0.5220
JULIO																
1-7				110.00	204.69		314.69	8.98		0.54	1.36		7.63	7.31		15.34
8-14				110.00	195.94		305.94	7.65		0.91	1.18		7.48	7.25		14.70
15-21				110.00	186.11		296.11	7.83		0.67	1.10		7.61	7.44		13.90
22-28				110.00	184.94		294.94	4.88		0.88	0.92		7.64	7.59		10.57
29-31				110.00	179.94		289.94	6.79		1.12	1.37		7.60	7.40		12.21
PROM				110.00	190.77		300.77	7.14		0.79	1.16		7.59	7.40		0.5450
AGOSTO																
1-6				110.00	179.94		289.94	6.81		0.63	1.02		7.77	7.85		15.39
7-13				110.00	179.94		289.94	7.88		1.04	0.97		7.77	7.55		0.5643
14-20				110.00	179.94		289.94	7.94		0.71	1.34		7.76	7.47		13.09
21-27				110.00	170.45		280.45	7.38		0.84	1.40		7.79	7.59		14.87
28-31				110.00	155.03		265.03	7.12		0.79	1.61		7.80	8.33		0.5098
PROM				110.00	174.58		284.58	7.47		0.81	1.24		7.78	7.70		0.5633
SEPTIEMBRE																
1-3				110.00	155.03		265.03	6.70		0.79	1.93		7.99	8.05		14.66
4-10				110.00	152.88		262.88	6.51		0.74	1.82		7.69	7.51		0.5493
11-17				110.00	147.51		257.51	6.49		0.65	1.51		7.78	7.92		16.13
18-24				110.00	138.29		248.29	5.43		0.82	1.35		7.70	7.56		0.5052
25-30				110.00	138.06		248.06	5.48		0.46	1.45		7.73	7.51		18.34
PROM				110.00	145.47		255.47	6.07		0.69	1.57		7.75	7.67		0.5011
OCTUBRE																
1-8				110.00	132.53		242.53	5.95		0.99	1.70		7.81	7.47		17.87
9-15				110.00	125.47		235.47	5.67		0.65	1.27		7.54	7.43		0.5164
16-22				110.00	150.40		260.40	23.69		2.58	1.30		7.61	7.55		0.5584
23-29				110.00	144.14		254.14	437.56		0.66	1.33		7.59	7.25		0.6074
30-31				110.00	117.87		227.87	13.93		0.59	2.55		8.10	7.15		0.6297
PROM				110.00	136.64		246.64	107.87		1.17	1.48		7.67	7.41		0.6620
NOVIEMBRE																
1-5				110.00	109.05		219.05	10.45		0.51	2.39		8.27	7.96		0.5670
6-12				110.00	109.05		223.55	1.306.36		0.65	1.92		7.64	7.19		0.6120
13-19				110.00	109.05		235.44	929.87		0.67	1.54		7.48	7.12		19.37
20-26				110.00	101.72		231.45	112.09		1.09	7.78		7.78	7.76		0.620
27-30				110.00	106.04		232.29	373.40		2.54	3.71		7.03	6.82		0.6352
PROM				100.83	127.75		228.58	599.47		34.87	1.79		7.22	7.42		0.5914
				100.83	127.75		228.58	34.87		1.79	7.22		7.42	7.19		0.6113

Fuente: P.T.A.P. Tabladita

En el Cuadro II-14 se evidencia un cumplimiento de normativa en los promedios mensuales de los cinco años, con excepción del valor de pH en varios meses, mostrando agua más acida de lo que debería y llegando a valores de hasta 6,08.

En el Cuadro II-15 se evidencia que para la fuente, se evalúan los mismos parámetros de la NB-512, incluyendo los de control complementario, algo que no está muy fuera de lugar porque de todas maneras son los parámetros que deben ser considerados a la salida de la planta, pero existe ausencia del análisis de otros parámetros clave que se deben considerar en la fuente como lo son el DBO y OD, parámetros complementarios de calidad para fuentes que ayudan a determinar el grado de contaminación de la misma.

También se evidencia que, por lo mencionado, los parámetros de la fuente no están en los rangos que se dan en la NB-512, lo cual es normal, porque el agua aún no ha pasado el tratamiento (Agua Potable y Saneamiento Basico, 2021, págs. 24 - 27) . Muestra un comportamiento de los Grupos IV y V según la NB689 (Servicios y Obras Publicas, 2004, págs. 102 -105) , lo cual menciona que **estas aguas no deben ser usadas como fuente de abastecimiento**, pero que, de no existir otras fuentes, podrán utilizarse después de un tratamiento adecuado.

En el Cuadro II-16 se evidencia al igual que en el cuadro inicial un cumplimiento de normativa en los promedios semanales y mensuales.

Debido a las observaciones previas, como se mencionó en el planteamiento de la metodología, a manera de comparación y verificación de valores, basándose en la contaminación en la fuente del Rio Guadaluquivir, se accedió a información de los análisis del monitoreo al Rio Guadaluquivir del *Programa Asistente de Gestión Unificada del Agua-SIHITA* de la Gobernación del Departamento de Tarija en la gestión 2022 y 2021 (*SIHITA – Sistema de Información Hídrica de Tarija*, s. f.). También se accedió a los análisis del seguimiento al Rio Guadaluquivir realizados por COSAALT en la gestión 2023.

A continuación, en los cuadros II-17 y II-18, se muestran dichos resultados.

Cuadro II-17. Resultados de monitoreo de SEDEGIA en 2022 y 2021.

PARAMETRO	UNIDAD	SEP-2022	NOV-2021
Conductividad	µs/cm	113	140,7
oxígeno disuelto	mg/l	8,38	8,1
pH		6,44	8,5
Turbiedad	NTU	1,63	30,8
Temperatura del agua	°C	19,48	21,5
cromo total	mg/l	0,035	
Cromo (VI)	mg/l		0,169
DQO	mg/l	45	52
dureza total	mg/l	63,17	55
fosforo(c/fosfato)	mg/l	0,73	1,7
hierro total	mg/l	0,51	0,25
Nitratos	mg/l	53,8	0,2
Nitritos	mg/l	1,32	0,003
Sulfatos	mg/l	10,21	12
coliformes totales	NMP/100ml	4.600,0	948
escherichia coli	NMP/100ml	20	348

Fuente: Elaborado a partir de Programa Asistente de Gestión Unificada del Agua-SIHITA e informe temporada seca 2022, SEDEGIA

Cuadro II-18. Resultados de los análisis del seguimiento al Rio Guadalquivir realizados por COSAALT en septiembre 2023.

LUGAR HORA	UNIDAD	San Martin	Obrajes
		Frente a UPDS	Unión de los 3 Ríos
		9:40 a. m.	10:40 a. m.
Temperatura	°C	18,8	18,8
pH		6,45	6,63
Conductividad	µs/cm	98	76
Oxígeno disuelto	mg/l	5,54	5,35
Turbidez	UNT	3,77	3,28
DBO5	mg/l	3,8	4,12
DQO	mg/l	7,76	12,95

Coliformes Totales	NMP/100ml	430	11.000,0
Coliformes Fecales	NMP/100ml	230	4600

Fuente: Dpto. control de calidad COSAALT.

Como se puede notar en los resultados del SEDEGIA en la gestión 2022 existe un **pH** acido en el agua, el **DQO** muestra un valor alto según la ley 1333 y están un poco en el límite de la NB 689 según el tratamiento de la planta en las dos gestiones, además de coincidir con la parte microbiológica según el Cuadro II-15. A su vez, se muestra valores de **fosforo** altos en las dos gestiones, comparado con lo que menciona la ley 1333 para evaluar la fuente de abastecimiento. (Ministerio d. M., 2021, págs. 328 - 332)

De igual manera se nota un valor de **Cromo** alto según la NB-512, ya que este si es un parámetro especial y complementario de la normativa. Por este comportamiento inusual, se procedió a investigar en el *Programa Asistente de Gestión Unificada del Agua-SIHITA*, si es que en años pasados se mantiene, a lo que se pudo comprobar que no, pero que los valores son muy diferentes y ni uno coincide con el de otra época o gestión, al igual que varios parámetros. Como ser el **Cadmio**, otro parámetro especial y complementario de la normativa, que se encuentra alto según la NB-512 en 2018 y 2019. (Agua Potable y Saneamiento Basico, 2021, págs. 26 - 28)

Por otro lado, en los resultados de COSAALT, se nota de igual manera la coincidencia en la parte microbiológica y un pH acido, pero se añade a analizar el valor de **DBO** que se encuentra un poco fuera del límite del grupo al que pertenece según normativa NB 689. (Ministerio d. S., 2004, págs. 102 - 105)

Por lo tanto, debido a variaciones en los parámetros mencionados que se desvían de la norma, según los datos mostrados e informes históricos de la gobernación y COSAALT, se añadió los mismos en los monitoreos de los parámetros estratégicos realizados para apoyo al presente proyecto, los cuales para fortificar el mismo, fueron llevados a dos laboratorios, el de COSAALT y el del CEANID.

Cuadro II-19. Resultados de COSAALT y CEANID en primer monitoreo de la estudiante.

PRIMER MONITOREO: 16 de octubre de 2023				
PARAMETRO	UNIDAD	ENTRADA A LA PLANTA		SALIDA DE LA PLANTA
DATOS IN SITU				
		TIPAS	VICTORIA	TRATADA
Caudal	l/s	110	123,38	
Turbiedad	UNT	1,87	0,56	0,2
pH		7,5	7,77	7,43
Conductividad	µS/cm	68,74	19,41	56,77
Temperatura	°C	18	17,5	17,7
Cloro residual	mg/l			0,75
DATOS DE LABORATORIOS				
		CEANID	COSAALT	CEANID
DBO5	mg/l	11	1,2	1,05
DQO	mg/l	18,6	2,6	2,6
Fosforo Total	mg/l	0,02	0,38	0,19
Cromo Total	mg/l	< 0,002	—	—
Cromo hexavalente	mg/l	—	0,02	0,01
Cadmio Disuelto	mg/l	< 0,002	—	< 0,002

Fuente: Elaborado a partir de CEANID / Dpto. control de calidad COSAALT.

Cabe mencionar que la intención era solo monitorear los valores marcados en celeste, porque las normativas dan rangos para ingreso a la planta de dichos parámetros, pero la estudiante debido a la preocupación y tomando en cuenta el apoyo del laboratorio de COSAALT, los realizo a la salida para respaldar a la interpretación de los resultados.

Cuadro II-20. Resultados de COSAALT y CEANID en segundo monitoreo de la estudiante.

SEGUNDO MONITOREO: 06 de noviembre de 2023				
PARAMETRO	UNIDAD	ENTRADA A LA PLANTA		SALIDA DE LA PLANTA
DATOS IN SITU				
		TIPAS	VICTORIA	TRATADA

Caudal	l/s	110	109,05		
Turbiedad	UNT	5,42	0,2	2,03	
pH		7,35	7,28	7,09	
Conductividad	µS/cm	82,52	20,71	65,39	
Temperatura	°C	18,5	19,2	18	
Cloro residual	mg/l			0,8	
DATOS DE LABORATORIOS					
		CEANID	COSAALT	CEANID	COSAALT
DBO5	mg/l	—	1,86	—	1,98
DQO	mg/l	—	5,18	—	7,76
Fosforo Total	mg/l	—	0,9	—	1,2
Cromo Total	mg/l	—	—	—	—
Cromo hexavalente	mg/l	—	0,01	—	0,07
Cadmio Disuelto	mg/l	< 0,002	—	< 0,002	—

Fuente: Elaborado a partir de CEANID / Dpto. control de calidad COSAALT.

Con respecto al **primer monitoreo**, como se puede observar en los parámetros solicitados, existe una variación considerable entre los resultados de los dos laboratorios. Otro aspecto a considerar es que según los resultados de COSAALT la salida de la planta no existe una disminución relevante de los valores de **DBO** y **DQO**, algo preocupante, solo **fosforo** y **cromo** disminuyen en una cantidad considerable y **cadmio** en realidad no es detectable.

Con respecto al **segundo monitoreo**, como se puede observar, por factor económico se vio por conveniente solo analizar en un laboratorio, el de COSAALT, ya que nuevamente se analizó la salida de la planta en el mismo, por la preocupación previa de ausencia de disminución de parámetros que determinan contaminación a la salida de la planta, y como se puede observar, los parámetros en esta ocasión no muestran ni si quiera disminución, sino un aumento, todos con excepción del cadmio muestran aumentar su concentración, resultados que generan preocupación en la tesis, ya que esto significa que no se está dando una **purificación** en el transcurso del tratamiento. Cabe recalcar que operarios mencionaron en ambos días, que no se estaba haciendo adición de coagulante por la **baja turbiedad** que muestra el agua, es decir, puede estar ocurriendo una contaminación en las unidades de tratamiento.

Considerando las variaciones entre estos dos laboratorios, y teniendo conocimiento de que la gobernación realizó su monitoreo en octubre, a continuación, se muestran los resultados de su monitoreo.

Cuadro II-21. Resultados del SEDEGIA en octubre de 2023

PARAMETRO	UNIDAD	RESULTADO
Temperatura	°C	23,35
pH		8,99
Oxígeno disuelto	mg/l	7,02
Oxígeno disuelto	%	102,5
Conductividad	µS/cm	91
Turbiedad	UNT	7,68
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)	mg/l	7
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	33
Nitritos	mg/l	0,07
Nitratos	mg/l	< 0,1
Nitrógeno amoniacal	mg/l	2,6
Cromo (VI)	mg/l	0,0563
Hierro total	mg/l	0,08
Sulfatos	mg/l	10
Cloro total	mg/l	0,06
Sodio total	mg/l	6,4
Potasio total	mg/l	< 0,1
Calcio total	mg/l	10
Magnesio total	mg/l	0
Alcalinidad total	mg/l	205
Dureza total	mg/l	20
Fosforo total (c/fosfato)	mg/l	0,15
Solidos Suspensidos Totales	mg/l	123,8004
Coliformes totales	NMP/100ml	4.600,0
Coliformes fecales	NMP/100ml	1.500,0

Fuente: Adaptado de SEDEGIA (GADT)

Lo cual confirma un comportamiento de **DBO, DQO y Cromo (VI)** alejados de las normativas, situación que ayuda a concluir que la fuente de Las Tipas está mostrando un comportamiento inadecuado para una fuente de abastecimiento de una PTAP, los análisis históricos lo respaldan.

Dicho comportamiento como ya se había mencionado es de **los Grupos IV y V según la NB689**, siendo necesarios otros tratamientos para que realmente esta fuente sea apta para su uso como tal y no este afectando el funcionamiento correcto de las unidades, generando mayores gastos en mantenimiento, adición de reactivos, entre otros.

2.1.2.3.1. Dosificación de Gas cloro

Teniendo como horario inicial las 5:50am del día 9 de octubre, se registró cada cuatro horas la dosificación del cloro en función al cloro residual, en el transcurso del día, En el Cuadro II-22 se presenta los resultados de las concentraciones mostradas en cada horario, además de otros aspectos importantes a considerar en la desinfección.

Cuadro II-22. Resultados concentraciones de cloro libre y cloro agregado-día 1

9/10/2023								
Hora	Caudal de agua en el sistema de inyección (l/s)	Cloro agregado (g/h)	Cloro agregado (mg/l)	Caudal de agua tratada (l/s)	Hora	Cloro libre (mg/l)	Ph	Temperatura (°C)
5:50	0,500	600	333,333	240,680	6:00	0,490	7,530	15,300
9:50	0,500	600	333,333	240,680	10:00	0,800	7,220	16,900
13:50	0,500	500	277,778	240,680	14:00	0,560	7,930	21,800
17:50	0,500	500	277,778	240,680	18:00	0,550	7,880	20,400
21:50	0,500	500	277,778	240,680	22:00	0,460	7,340	19,500
1:50	0,500	500	277,778	240,680	2:00	0,480	7,280	15,900

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que por la consideración de demora desde el sistema de inyección de gas cloro hasta llegar al tanque, se midió el cloro residual 10 minutos después de medir el cloro agregado.

Figura 2-22. Curva de comportamiento-día 1



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados, se ha observado que la demanda de cloro alcanza niveles superiores a 300 mg/L. Este valor es significativamente alto en comparación con los rangos establecidos por la American Water Works Association (AWWA). Según el "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" de la AWWA, la demanda de cloro para agua con alta cantidad de materia orgánica puede superar los 4 mg/l (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 2017). Aunque este estándar no especifica un valor máximo absoluto, la diferencia entre la demanda observada en la planta y el valor indicado por la AWWA sugiere de igual manera que en las caracterizaciones, que hay una carga orgánica mucho mayor de lo usual en el agua tratada.

Además, se evidencia valores de cloro residual menores a 0,5mg/l y se conoce que, según normativa local, como lo es la NB512 que dichos valores son riesgosos tenerlos a la salida de la planta, ya que la planta debe evitar valores menores a 0,2 mg/l en el punto más lejano, el cual es el valor límite en la norma.

Los operarios mencionan que 0,5 mg/l es su valor mínimo para aumentar la dosificación del gas, pero que, por el mismo comportamiento de la fuente, a veces baja bruscamente a valores menores a 0,5 mg/l, mencionando que es algo difícil de controlar, aún peor con la manera en la que se dosifica el gas cloro, ya que el dosificador posee una graduación muy grande y tiene un manejo más empírico.

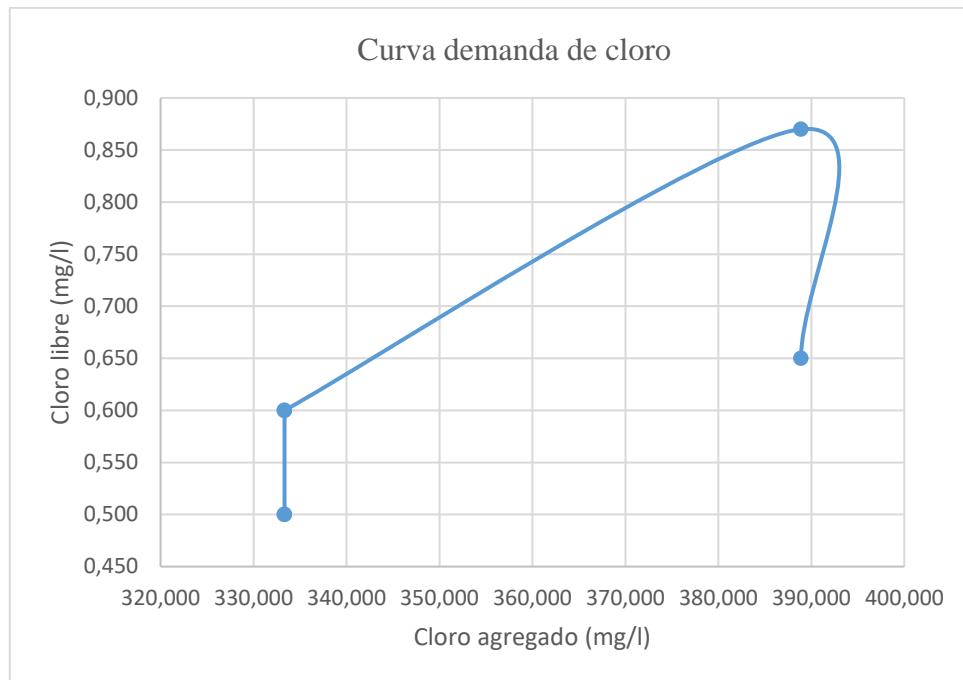
Debido a dichas preocupaciones y para comprobación de datos, se realizó otra curva de comportamiento el día 28 de octubre. En el Cuadro II-23 se presenta los resultados de las concentraciones mostradas en cada horario.

Cuadro II-23. Resultados concentraciones de cloro libre y cloro agregado-día 2

28/10/2023								
Hora	Caudal de agua en el sistema de inyección (l/s)	Cloro agregado (g/h)	Cloro agregado (mg/l)	Caudal de agua tratada (l/s)	Hora	Cloro libre (mg/l)	Ph	Temperatura (°C)
5:50	0,500	700	388,889	275,030	6:00	0,650	7,000	18,700
9:50	0,500	700	388,889	275,030	10:00	0,870	6,970	20,100
13:50	0,500	600	333,333	275,030	14:00	0,600	7,520	24,900
17:50	0,500	600	333,333	275,030	18:00	0,600	7,490	23,300
21:50	0,500	600	333,333	275,030	22:00	0,500	7,200	22,300
1:50	0,500	600	333,333	275,030	2:00	0,500	7,150	18,900

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-23. Curva de comportamiento-día 2



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados, se continúa observando cantidades de cloro agregado demasiado altas, lo cual mantiene una demanda de cloro alta y de igual manera que en las caracterizaciones, ayuda a confirmar **presencia alta de materia orgánica.**

Lo que ahora no se evidencia son valores de cloro residual menores a 0,5mg/l, pero si iguales a dicho valor y con lo dicho previamente según normativa, se comprueba que los valores de cloro residual salientes de la planta pueden ser riesgosos para mantener un residual en el punto más alejado, por lo que se procedió a analizar el residual de los puntos más alejados que reciben agua de la planta.

En el Cuadro II-24 se presenta los resultados de las concentraciones mostradas en época seca de la gestión 2023.

Cuadro II-24. Resultados concentraciones de cloro residual en puntos más alejados de la red de distribución

NOMBRE DEL PUNTO DE RED	CODIGO	CLORO RESIDUAL					
		JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE
Zona Central/mercado central	RPF02	0,500		0,400	0,900	0,440	0,710
Barrio el Molino/Mercado el Molino	RPV20	0,720	0,510	0,200		0,260	
Barrio las Panosas/parque tematico	RPF08	0,310	0,400	0,510	0,390	0,310	0,520
Barrio La Pampa/Hospital Obrero	RPF07	0,400	0,300	0,710	0,220	0,470	0,640

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, no existen valores menores a 0,2, es decir, se cumple con la normativa en los puntos más alejados, pero si hay valores iguales o cercanos y debido al comportamiento irregular de la fuente, mostrando cambios bruscos de cloro residual a la salida de la planta con la misma concentración de cloro agregado, se debe analizar una solución al respecto, ya que esto puede estar afectando en diversos horarios a las casas más lejanas.

2.1.2.4. Pruebas de tratabilidad

En fecha 19/11/2023 se estableció la dosis optima de coagulante, teniendo en cuenta el ensayo de jarras con ajuste simultaneo que se realizó con soluciones de sulfato de aluminio al 10% y cal al 1%, considerando intervalos de 0,5ml a 3ml de solución de sulfato de aluminio e intervalos de 1ml a 6ml de cal, como se puede ver en el Cuadro II-26.

Cuadro II-25. Condiciones iniciales de pruebas de tratabilidad-Prueba 1

19/11/2023	
Condiciones iniciales:	
Turbiedad inicial=	8.930 UNT
pH=	6,310
Conductividad=	168 μ S/cm
T($^{\circ}$ C)=	20,900
Csulfato=	100.000 mg/l
Ccal=	10.000 mg/l
Csulfato=	10 % en peso/volumen
Ccal=	1 % en peso/volumen

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que en planta el operario menciono que ese tipo de valores de turbiedad no es lo usual, es un valor que últimamente sucedió en algunas ocasiones y que claramente es de preocupación.

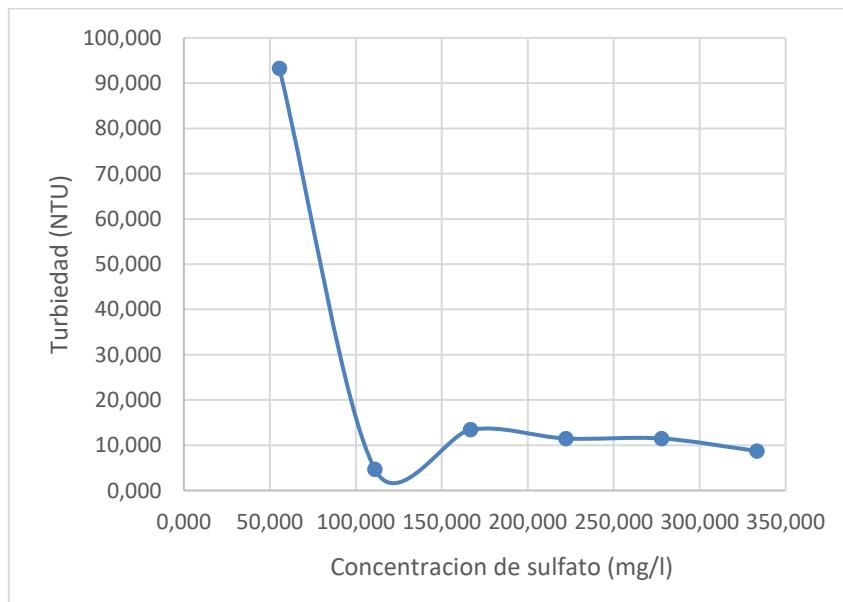
Cuadro II-26. Resultados pruebas de tratabilidad-Prueba 1

JARRA	1	2	3	4	5	6
SULFATO (ml)	0,500	1	1,500	2	2,500	3
SULFATO (mg/l)	55,556	111,111	166,667	222,222	277,778	333,333
CAL (ml)	1	4	3	4	5	6
CAL (mg/l)	11,111	44,444	33,333	44,444	55,556	66,667
TURBIEDAD FINAL (UNT)	93,300	4,690	13,440	11,500	11,500	8,750
PH FINAL	5,730	5,000	4,640	4,710	4,660	4,660
CONDUCTIVIDAD FINAL (µS/cm)	202,800	245,200	349,200	369,700	390,600	435,100
TEMPERATURA	21	21,200	21,200	21,500	21,500	21,500
%REMOCION	98,955	99,947	99,849	99,871	99,871	99,902

Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos por las pruebas de tratabilidad, establecen que la jarra 2 es la adecuada, pero el pH no coincide, por lo que para estos casos por tema tiempo en el tratamiento del agua, en planta proceden a considerar el doble de dosificación de cal como el adecuado, es decir, el de la jarra 4, dando un valor de pH aproximado a 7,5, después de una comprobación.

Figura 2-24. Dosis optima de ensayo de jarras con ajuste simultaneo.



Fuente: Elaboración propia

Se observa una dosis de sulfato de aluminio de 111,11 mg/L. Este valor es notablemente superior al rango típico recomendado por la American Water Works Association (AWWA). Según el manual *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*, la dosis típica de sulfato de aluminio en el tratamiento de agua oscila entre 10 y 50 mg/L (AWWA, 2020). La dosis observada de 111,11 mg/L excede este rango sugerido, lo que podría indicar una sobredosificación del coagulante. Esta sobredosificación podría llevar a problemas como la generación excesiva de lodos, alteraciones en el pH del agua tratada (algo que se está observando en resultados de las pruebas de jarras), o la necesidad de ajustes adicionales en el proceso de coagulación y floculación.

Respecto a la dosis de cal superior a 40 mg/L. Este valor está dentro del rango típico recomendado por la American Water Works Association (AWWA), que establece que las dosis de cal hidratada suelen variar entre 20 y 80 mg/L en el tratamiento del agua (AWWA, 2020). Según el manual *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies* (6^a edición), dosis superiores a 40 mg/L, aunque no exceden el rango recomendado, pueden indicar problemas como una alta dureza del agua o ineficiencias en el proceso de coagulación.

Para confirmar el tipo de problema que podría ser, se conversó con operarios y mencionan que el equipo de prueba de jarras es relativamente nuevo y que no debería haber inconvenientes con las condiciones en las pruebas, descartando así un problema de ineficiencia en el proceso y permitiendo confirmar que existe problemas con la calidad del agua cruda como se fue confirmando en los anteriores puntos.

De todas maneras, para confirmar dichas concentraciones, se decidió añadir una prueba de jarras analizando valores más bajos y los que son más usuales en planta, que por recomendación del operario del día se analizó en una sola prueba de jarras dos muestras de diferentes horarios del día.

Los detalles de la prueba realizada en fecha 22/11/2023 se mencionan en los cuadros II-27 y II-28.

Cuadro II-27. Condiciones iniciales de pruebas de tratabilidad-Prueba 2

22/11/2023		
Condiciones iniciales	MUESTRA 1 (mañana)	MUESTRA 2 (tarde)
Turbiedad=	31,700	347,000
Ph=	7,160	7,010
Conductividad=	80,400	116,600
Concentración sustancias		
Csulfato=	150000	mg/l
Ccal=	100000	mg/l
Csulfato=	15	% en peso/volumen
Ccal=	10	% en peso/volumen

Fuente: Elaboración propia

Cuadro II-28. Resultados pruebas de tratabilidad-Prueba 2

	MUESTRA 1		MUESTRA 2	
JARRA	1	2	3	4
SULFATO (ml)	0,300	0,500	1,500	2
SULFATO (mg/l)	50	83,333	642,857	857,143
CAL (ml)	1	2	3	4
CAL (mg/l)	111,111	222,222	857,143	1.142,857
TURBIEDAD FINAL	18,700	15,600	4,400	3,340
PH FINAL	5,690	5,280	4,860	4,980
CONDUCTIVIDAD FINAL	132,800	182,900	543,400	694,400
%REMOCION	41,009	50,789	98,732	99,037

Fuente: Elaboración propia

Como se puede notar, la muestra 1 no llegó a cumplir la norma a pesar de contar con dosis consideradas altas según lo mencionado previamente, y la muestra 2 si llegó, pero considerando dosis que incluso se exceden del triple considerado en la primera prueba, la cual mostraba mayor turbiedad a esta.

Dichas pruebas nos muestran un **comportamiento inusual e irregular** en el agua a tratar, pero nos ayuda a confirmar que efectivamente se están usando **dosis altas** en el proceso de coagulación.

2.1.2.5. Pruebas hidráulicas y operativas

2.1.2.5.1. Pruebas hidráulicas

En las pruebas hidráulicas se identificaron los parámetros de diseño para cada una de las unidades que conforman el sistema de tratamiento, y la comprobación con los rangos establecidos por la normativa NB 689-Instalaciones de agua- Diseño para sistemas de Agua Potable.

2.1.2.5.1.1. Análisis de parámetros básicos de diseño:

2.1.2.5.1.1.1. Población beneficiaria

Actualmente la planta, en época seca abastece los barrios:

1. Tabladita II
2. Tabladita I
3. San Antonio
4. Méndez Arcos
5. Carmen de Aranjuez
6. Aranjuez Sud
7. Catedral
8. Alto Catedral
9. Jaime Paz
10. Bartolomé
11. Andalucía
12. Senac
13. Luis de Fuentes
14. San Martin
15. German Busch
16. La Loma

- 17. El Molino
- 18. San Roque
- 19. 4 de julio
- 20. San José
- 21. Las panosas
- 22. Palmarcito
- 23. Narciso Campero (solo una zona)
- 24. Juan 23 (solo una zona)

Lo cual indica un total de 9007 conexiones según COSSALT y 57735 habitantes, debido a su relación de 6,410 habitantes por conexión.

Cantidad que no aumentara de momento debido a **saturación** en planta como ya se sabe, la planta ya no puede abastecer más conexiones, ya llegó al máximo de conexiones según su capacidad planteada.

2.1.2.5.1.1.2. Consumo de Agua

La dotación de agua per cápita en este caso particular, debe ser establecida mediante la dotación media diaria, que permita satisfacer los requerimientos de consumo doméstico, comercial, industrial y público, considerando las perdidas en la red de distribución.

Para este parámetro básico se calculará interpolando según valores de Dotación media diaria en función de la población y la zona. Dichos valores se muestran en el Reglamento Técnico de Estudios y Parámetros básicos de diseño para sistemas de agua potable (Viceministerio, 2004, pág. 20)

Siendo que:

$$X_0 = 20002 \text{ h}$$

$$Y_0 = 150 \text{ l/hab-d}$$

$$X_1 = 100000 \text{ h}$$

$$Y_1 = 200 \text{ l/hab-d}$$

X0= 57735 h

Yx=?

Conociendo que:

$$Yx = Yo + \frac{X - Xo}{X1 - Xo} (Y1 - Yo)$$

Reemplazando valores se tiene que:

$$Yx = 150 + \frac{57735 - 20001}{100000 - 20001} (200 - 150)$$

$$Yx = 173,580 \frac{l}{hab - d} = DMD$$

2.1.2.5.1.1.3. Caudales de diseño

Caudal Medio Diario (Qmd)

El caudal medio diario se puede calcular para este caso específico en base a:

$$Q_{md} = (P * D) / 86400$$

Dónde:

P = Población en Habitantes

D = Dotación en (l/hab*día)

Qmd = Caudal medio diario (l/s)

Reemplazando valores se tiene que:

$$Q_{md} = (57735 * 173,58) / 86400$$

$$Q_{md} = 115,990 l/s$$

Caudal Máximo Diario (Qmáx d)

El caudal máximo diario se calcula en base a:

$$Q_{máx d} = K_1 * Q_{md}$$

Donde:

Qmáx d = Caudal máximo diario (l/s)

K1 = Coeficiente de caudal máximo diario

Qmd = Caudal medio diario (l/s)

En este caso para el K1 se tomará el valor máximo por el turismo constante en el casco viejo y demás aspectos que generan mayor movimiento en el centro de la ciudad.

Reemplazando valores, tenemos que:

$$Q_{máx\ d} = 1,5 * 115,990$$

$$Q_{máx\ d1} = 173,990\ l/s$$

Caudal Máximo Horario (Qmáx h)

El caudal máximo horario se calcula en base a:

$$Q_{máx\ h} = K_2 * Q_{máx\ d}$$

Donde:

Qmáx h = Caudal máximo horario

Qmáx d = Caudal máximo diario

K2 = Coeficiente de caudal máximo horario

El K2 se calcula interpolando según valores de la población. Dichos valores se muestran en el Reglamento Técnico de Estudios y Parámetros básicos de diseño para sistemas de agua potable Tabla N°4 (Viceministerio, 2004, pág. 22). Dando como resultado un K2= 1,640

Reemplazando valores, tenemos que:

$$Q_{máx\ h} = 1,640 * 173,990$$

$$Q_{máx\ h} = 285,430\ l/s$$

Como se puede ver, el caudal máximo diario que es con el que se deberían dimensionar las unidades es de **174 l/s**, un caudal que, si es correspondido según el caudal anual

promedio en época seca que se muestra en los parámetros diarios, el cual es mayor a **260 l/s**.

Pero como se mencionó previamente, las unidades de la planta fueron diseñadas para tratar solo **160 l/s**, llegan a la cantidad de más de **260 l/s** debido al bypass que tiene la fuente de la Victoria, que en época seca se une con el agua de las tipas después de esta ser sedimentada y antes de pasar a la filtración. Por lo que en época seca el caudal que pasa por todas las unidades es solamente el de las tipas, que da un total de **110 l/s** con el funcionamiento de sus dos bombas, el cual será el caudal experimental considerado en dichas unidades. Ya desde la filtración, para el caudal experimental se tomará en cuenta el caudal máximo diario según informes y operarios, que es de **340 l/s**, el cual implica la unión de las dos fuentes de abastecimiento, Las Tipas y La Victoria.

2.1.2.5.1.2. Mezcla rápida

En época seca, la aducción de las Tipas llega como un sistema de caída libre a generar la coagulación, un sistema que no se encuentra en la normativa como tal, pero que según los ingenieros y operarios de la planta se puede usar como una unidad de mezcla rápida mientras cumpla los requerimientos básicos.

Y efectivamente, el Reglamento Técnico de Diseño para Plantas Potabilizadoras de Agua (Viceministerio, 2004, pág. 405) , menciona gradientes y tiempos óptimos para mezcla rápida por coagulación para los dos tipos de coagulación: la de adsorción – neutralización y la de barrido o por incorporación. Por lo tanto, se procedió a hacer los cálculos correspondientes de los parámetros de diseño para este sistema específico. Los cuales se muestran en el Cuadro II-29.

Primeramente, en este cuadro y en los de las siguientes unidades se mostrará el comportamiento teórico, es decir, según normativa y con el caudal de diseño el cómo debería estar funcionando la unidad, y también se mostrará el comportamiento experimental, es decir, el cómo está funcionando realmente esta unidad.

Cuadro II-29. Parámetros de diseño Mezcla rápida

Parametro	Simbologia	Formula	Unidades	Valor experimental 1	Valor experimental 2
Caudal	Q	—	m ³ /s	0,110	0,055
Altura de caida	h	—	m	1,400	1,300
Velocidad de caida	v ₂	$v_2 = \sqrt{2gh}$	m/s	5,244	5,053
Longitud zona de mezcla	L	—	m	2,100	2,100
Ancho de zona de mezcla	B	—	m	0,800	0,800
Alto de zona de mezcla	H	—	m	0,350	0,250
Volumen de zona de mezcla	V _m	$V_m = B \cdot H \cdot L$	m ³	0,588	0,420
Potencia disipada	P	$P = \frac{1}{2} \rho Q v^2$	W	1.512,280	702,130
Gradiente de velocidad	G	$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$	s ⁻¹	942,985	543,042
Tiempo de retencion	T _r	$t_r = \frac{V_{mix}}{Q}$	s	5,345	7,636
Numero de Froude	F	$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$		1,415	1,415

Fuente: Elaboración propia basada en (Viceministerio, 2004, pág. 405)

Como se puede observar, debido al uso de dos bombas en la toma de Tipas en época seca el sistema 2 tiene dos tipos de caudales, de 55 l/s cuando trabaja con una sola bomba y de 110 l/s cuando trabaja con las dos, valor más usual según la época seca.

El valor experimental 1 de 110 l/s según sus resultados de gradiente de velocidad y tiempo de retención, muestra un comportamiento similar al tipo de coagulación de adsorción – neutralización, siendo estos valores óptimos según este tipo de coagulación.

Por otro lado, el valor experimental 2 de 55 l/s según sus resultados de gradiente de velocidad, muestra un comportamiento del tipo de coagulación por barrido, pero según el tiempo de retención muestra un comportamiento inusual, que no llega a involucrarlo en ningún tipo de coagulación.

Pero, ambos valores de caudal muestran un número de Froude de 1,42, valor que en la etapa de mezcla rápida es indicativo de un flujo supercrítico y es beneficioso para la dispersión del coagulante y la neutralización de cargas coloidales.

Es decir, que a pesar del **comportamiento irregular** que no permite identificar qué tipo de coagulación se lleva a cabo con dicha fuente, las condiciones del sistema de caída libre son adecuadas para una mezcla rápida e incluso beneficiosas.

2.1.2.5.1.3. Floculación

En el Cuadro II-30 se pueden identificar los parámetros de diseño de uno de los dos floculadores de la planta, los cuales son iguales y se basan en el comportamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal, como lo menciona el Reglamento técnico de diseño para plantas potabilizadoras de agua de la NB689, donde se puede observar los valores y rangos básicos que debe cumplir la unidad (Viceministerio, 2004, págs. 415 - 418)

Cuadro II-30. Parámetros de diseño Floculación

Parametro	Simbologia	Formula	Unidades	Valor experimental	Valor teorico
Caudal	Q	—	m ³ /s	0,110	0,160
Volumen floculador	V	V=W*L*H	m ³	193,725	193,725
Ancho del floculador	W	—	m	10,500	10,500
Longitud del floculador	L	—	m	12,300	12,300
Altura de agua	H	—	m	1,500	1,500
Tiempo de retencion	T	T=V/Q	s	2,400	1.210,781
Ancho de cada compartimento	Wc	$W_c = \frac{W}{N}$	m	3,500	3,500
Numero de compartimentos	N	—		3	3
Numero de baffles compartimento 1	n ₁	$n_1 = \left\{ \left[(2\mu T_1) / \rho(1.44 + f) \right] * \left[H L G_1 / Q \right]^2 \right\}^{\frac{1}{3}}$		28	28
Numero de baffles compartimento 2	n ₂	$n_2 = \left\{ \left[(2\mu T_2) / \rho(1.44 + f) \right] * \left[H L G_2 / Q \right]^2 \right\}^{\frac{1}{3}}$		22	22
Numero de baffles compartimento 3	n ₃	$n_3 = \left\{ \left[(2\mu T_3) / \rho(1.44 + f) \right] * \left[H L G_3 / Q \right]^2 \right\}^{\frac{1}{3}}$		16	16
Tiempo de floculacion compartimento 1	T ₁	—	s	1.020	480
Tiempo de floculacion compartimento 2	T ₂	—	s	840	420
Tiempo de floculacion compartimento 3	T ₃	—	s	540	300
Gradiente compartimento 1	G ₁	—	s ⁻¹	25,737	54,571
Gradiente compartimento 2	G ₂	—	s ⁻¹	19,752	40,630
Gradiente compartimento 3	G ₃	—	s ⁻¹	15,279	29,817
Espacio entre baffles compartimento 1	S ₁	S ₁ =L/n ₁	m	0,400	0,439
Espacio entre baffles compartimento 2	S ₂	S ₂ =L/n ₂	m	0,500	0,559
Espacio entre baffles compartimento 3	S ₃	S ₃ =L/n ₃	m	0,700	0,769
Perdida de carga en compartimento 1	h _{p1}	$h_{p1} = \frac{\mu * T_1 * G_1^2}{\rho * g}$	m	6,706	14,188
Perdida de carga en compartimento 2	h _{p2}	$h_{p2} = \frac{\mu * T_2 * G_2^2}{\rho * g}$	m	3,253	6,882
Perdida de carga en compartimento 3	h _{p3}	$h_{p3} = \frac{\mu * T_3 * G_3^2}{\rho * g}$	m	1,251	2,647
Velocidad de flujo en compartimento 1	V ₁	V ₁ =Q/A ₁	m/s	0,183	0,243
Velocidad de flujo en compartimento 2	V ₂	V ₂ =Q/A ₂	m/s	0,147	0,191
Velocidad de flujo en compartimento 3	V ₃	V ₃ =Q/A ₃	m/s	0,105	0,139
Distancia de separacion entre el extremo de baffles(1)	d ₁	d ₁ =1,5*S ₁	m	0,580	0,659
Distancia de separacion entre el extremo de baffles(2)	d ₂	d ₂ =1,5*S ₂	m	0,770	0,839
Distancia de separacion entre el extremo de baffles(3)	d ₃	d ₃ =1,5*S ₃	m	0,990	1,153

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar según los resultados y rangos, un tiempo de retención de 40 min se va de lo normal en estos floculadores, esto puede estar provocando formación de flóculos demasiado grandes y causando problemas en otras etapas como taponamientos de filtros (Edzwald & American Water Works Association, 2011).

Un factor importante a considerar es que según operarios estos **tiempos mayores de retención** solo se dan con esta fuente, al igual que en sedimentación y filtración. Información que nos permite decir que la calidad de la fuente, está teniendo un impacto en los parámetros de operación de las unidades.

2.1.2.5.1.4. Sedimentación

En el Cuadro II-31 se pueden identificar los parámetros de diseño de uno de los cuatro sedimentadores de la planta, los cuales son iguales y se basan en el comportamiento de sedimentadores de alta tasa de flujo ascendente, como lo menciona el Reglamento técnico de diseño para plantas potabilizadoras de agua de la NB689, donde se puede observar los valores y rangos básicos que debe cumplir la unidad (Viceministerio, 2004, págs. 424 - 426)

Cuadro II-31. Parámetros de diseño Sedimentación

Parametro	Simbologia	Formula	Unidades	Valor teorico	Valor experimental
Caudal	Q	—	m ³ /s	0,160	0,110
Ancho del sedimentador	W	—	m	4,500	4,500
Longitud del sedimentador	L	—	m	7,850	7,850
Altura del sedimentador	H	—	m	4,500	4,500
Area superficial	As	—	m ²	157,100	157,100
Angulo de inclinacion	Θ	—	°	60	60
Velocidad promedio de flujo entre placas	v0	$v_0 = \frac{Q}{A_s * \text{Sen}\theta}$	m/s	0,001	0,001
Espaciamiento entre placas	d	—	m	0,058	0,058
Viscosidad cinematica	v	$v = \frac{497 * 10^{-6}}{(T + 42,5)^{1,5}}$	m ² /s	1,006E-06	1,083E-06
Temperatura promedio del agua	T	—	°C	20	17
Numero de Reynolds	Re	$Re = \frac{v_0 * d}{v}$		67,814	43,306
Longitud de la placa	l	—	m	1,220	1,220
Tiempo de retencion en min	t	$t = \frac{l}{v_0}$	min	17,290	30
Velocidad critica de sedimentacion	Vsc	$V_{sc} = \frac{S_c v_0}{\text{Sen}\theta + L_c \text{Cos}\theta}$	m/d	9,286	6,292
Parametro caracteristico para sedimentadores de placas paralelas	Sc	—		1	1
Longitud relativa del sedimentador	L	$L = \frac{l}{d}$		21,034	21,034
Longitud de transicion	L'	$L' = 0,013 * Re$		0,882	0,563
Longitud relativa del sedimentador de alta tasa en flujo laminar	Lc	$L_c = L - L'$		20,153	20,472
Carga superficial	CS	$CS = \frac{Q}{A_s}$	m ³ /m ² *h	3,666	2,521
Longitud de sedimentacion	Ls	$L_s = \frac{A}{b}$	m	34,911	34,911
Espesor de las placas	e	—	m	0,008	0,008
Numero de placas por modulo	N	$N = \frac{L_s \text{Sen}\theta + d}{d + e}$		458,955	458,955

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, el tiempo de retención es un poco más alto de lo que mencionan los rangos, un valor que puede ser normal, debido a que por la época se usa un caudal menor al esperado, el tiempo de retención será naturalmente más largo, pero no se debe dejar de lado el análisis de la calidad de la fuente mencionado en los floculadores.

Respecto al valor de V_{sc} tan bajo comparado a la norma, es probable que los flóculos formados en la etapa de floculación no sean adecuados para una sedimentación eficiente. Esto refuerza la idea de que los flóculos son demasiado grandes o demasiado frágiles, afectando negativamente la **eficiencia** de sedimentación. (*MWH's Water Treatment*, 2012)

Además, la baja carga superficial indica que el sedimentador está subutilizado. Sin embargo, la subutilización podría estar relacionada con la **calidad de los flóculos** formados en la etapa de floculación. Si los flóculos no son adecuados para sedimentar, aumentar el caudal no mejorará necesariamente la eficiencia del sedimentador. (Edzwald & American Water Works Association, 2011)

2.1.2.5.1.5. Filtración rápida

En el Cuadro II-32 se pueden identificar los parámetros de diseño de uno de los 4 filtros pequeños y uno de los 2 grandes de la planta, los cuales ambos son hidráulicos y se basan en el comportamiento de Filtros rápidos de control hidráulico y tasa declinante, como lo menciona el Reglamento técnico de diseño para plantas potabilizadoras de agua de la NB689, donde se puede observar los valores y rangos básicos que debe cumplir la unidad (Viceministerio, 2004, págs. 436 - 439)

Cuadro II-32. Parámetros de diseño Filtración rápida

Parametro	Simbologia	Formula	Unidades	Valor teorico 1	Valor teorico 2	Valor experimental 1	Valor experimental 2
Caudal	Q	—	m ³ /s	0,160	0,160	0,340	0,340
Ancho del filtro	Wf	—	m	2,500	3,750	2,500	3,750
Largo del filtro	Lf	—	m	3	3	3,290	3,290
Area superficial	As	—	m ²	70,550	90,675	74,929	95,779
Tasa de filtracion	Tf	Tf = Q/As	m ³ /m ² *d	195,946	152,457	392,051	306,706
Tiempo de lavado	T	—	min	6 a 9	6 a 9	10 min	10 min
Drenaje de fondo							
Base de viguetas	Bv	—	m	0,300	0,300	0,200	0,200
Altura de viguetas	Hv	—	m	0,200 a 0,250	0,200 a 0,250	0,150	0,150
Area que ocupan todas las viguetas	At	—	m ²	10,224	13,632	11,016	15,300
Cantidad total de niples de PVC	—	—		572,544	763,392	648	900
Niples por metro cuadrado	U	—		56	56	59	59
Capa soporte							
Altura de cada capa	hc	—	mm	75	75	80	80
Diametro	dc	—	mm	19,100-38	19,100-38	35	35
Capa filtrante-Arena							
Densidad	—	—	gr/m ³	3,800-4,000	3,800-4,000	4,500	4,500
Tamaño efectivo	—	—	mm	0,150-0,200	0,150-0,200	0,180	0,180
Coeficiente de uniformidad	—	—		1,350-1,400	1,350-1,400	1,360	1,360
Altura de agua							
Altura minima total del agua	—	—	m	3,900	3,900	3,800	3,800
Altura minima del vertedor de agua de lavado	—	—	m	1,300	1,300	1,200	1,200
Altura del filtro de tasa declinante							
Altura de fondo falso	—	—	m	0,500-0,500	0,500-0,500	0,500	0,500
Altura capa soporte (incluyendo viguetas)	—	—	m	0,500-0,500	0,500-0,500	0,850	0,850
Altura de arena	—	—	m	0,300-0,350	0,300-0,350	0,300	0,300
Altura minima de agua (sobre el nivel de arena)	—	—	m	1,250-1,350	1,250-1,350	1,300	1,300
Altura maxima de agua (sobre el nivel minimo)	—	—	m	1,600-1,700	1,600-1,700	1,700	1,700
Altura de seguridad	—	—	m	0,400-0,400	0,400-0,400	0,400	0,400
Altura total			m	5-5,300	5-5,300	5,050	5,050

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, los filtros de la planta presentan tasas de filtración significativamente por encima del rango recomendado, sobre todo en los filtros pequeños. Esta alta tasa de filtración puede llevar a una menor eficiencia en la retención de partículas y una mayor frecuencia de retrolavado debido a la rápida acumulación de pérdida de carga en el medio filtrante (Salud-OMS, 2018).

Además, la normativa recomienda dos medios filtrantes y solo se está usando uno de arena, que presenta una altura de 30cm, una altura muy baja comparado a los 75cm que menciona la norma como mínimo para el espacio de los medios filtrantes. Esta configuración puede resultar en una eficiencia reducida y una mayor frecuencia de retrolavado, aumentando los costos operativos y el uso de agua para retrolavado (*MWH's Water Treatment*, 2012). Situación que operarios confirman es cierta, ya que además de haber mayor frecuencia de lavado en la época, hay demasiado desperdicio de agua en el lavado de los filtros.

El tiempo de retrolavado de 10 minutos de igual manera tiene mucha relación con lo previo mencionado, ya que en comparación con la normativa este es un tiempo mayor a lo usual, lo cual puede ser un indicativo de problemas operativos asociados con las altas tasas de filtración y la profundidad limitada del lecho filtrante. (Salud-OMS, 2018)

Además, tomando en cuenta lo mencionado en las unidades previas, la **calidad del afluente** es un factor crucial que afecta la tasa de filtración y el tiempo de retrolavado en los filtros. Afluentes con alta carga de sólidos o turbidez pueden llevar a una acumulación más rápida de partículas en el medio filtrante, reduciendo la eficiencia de filtración y requiriendo retrolavados más frecuentes y prolongados (Salud-OMS, 2018). Situación que según los análisis previos coincide en ser verdadera.

2.1.2.5.1.6. Desinfección

El proceso de desinfección se lleva a cabo mediante un sistema de dosificación de gas cloro tipo vacío, que es dotado por la empresa Petrodrill, la cual se cerciora de que se

cumplan con los requerimientos de calidad, para luego dirigirse al tanque de almacenamiento, el cual no tiene un tiempo de contacto definido, sino que es variable con el tiempo, pero según operarios, el tiempo mínimo es de 30min.

Para el sistema de dosificación de gas cloro tipo vacío se utiliza los siguientes componentes:

Clorador

Se trabaja con una unidad de dosificación compacta VGB-103, la cual está dotada de reguladores de presión y vacío. Los reguladores de vacío y dosificación se integran en un único dispositivo compacto que puede montarse directamente en un contenedor de cloro. La dosificación de cloro gaseoso se realiza con el rotámetro integrado. El ajuste del caudal se efectúa manualmente.

En la Figura 2-25 se puede observar la descripción del dispositivo, mencionando los componentes que posee.

Figura 2-25. Descripción de unidad de dosificación compacta VGB-103

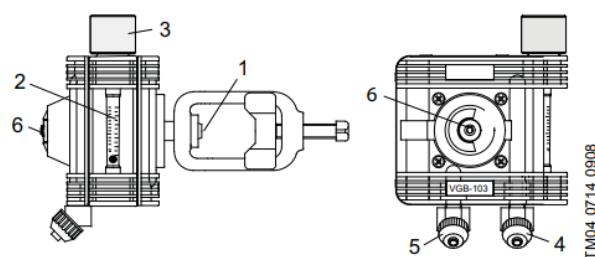


Fig. 9 Componentes de la unidad de dosificación compacta

Pos.	Descripción
1	Válvula de entrada con conexión de presión para unir la unidad de dosificación compacta VGB-103 a la bombona de cloro.
2	Vaso medidor para indicar el caudal de dosificación
3	Mando de regulación para configurar el caudal de dosificación
4	Conexión para la tubería de vacío (con el inyector)
5	Conexión para la tubería de sobrepresión (con el filtro de absorción)
6	Señal de vacío: marca roja

Fuente: Elaboración propia basada en (GRUNDFOS, pág. 9)

De los componentes mencionados, el único que no se utiliza es la conexión para la tubería de sobrepresión.

Injector o eyector

Consiste en un dispositivo tipo Venturi que permitirá el arrastre del cloro gaseoso dentro del flujo corriente de agua, formando una solución fuerte de cloro en agua.

El valor de agua dosificada por la bomba dosificadora de caudal constante es de 30 l/min, valor que según operarios es lo normal y constante en época seca.

Tomando en cuenta que, según el análisis de desinfección previo, la dosificación de cloro está en un promedio de 600g/h, se procede a analizar la relación típica de caudal de agua a cloro.

Para determinar la relación de caudal de agua a cloro se usa la relación:

$$\text{Relación} = \text{Caudal de Agua(l/min)} / \text{Flujo de Cloro(g/min)}$$

Usamos los valores para el caso:

$$\text{Relación} = \frac{30 \text{ l/min}}{10 \text{ g/min}} = 3 \text{ l/g}$$

La relación obtenida es de 3 l/g, lo que significa que, por cada gramo de cloro, se están utilizando 3 litros de agua en el inyector, dicha relación está significativamente por debajo del rango recomendado, ya que según el "AWWA Manual of Water Supply Practices - M12: Simplified Procedures for Water Examination", se recomienda mantener una relación de caudal de agua a flujo de cloro entre 10:1 y 20:1 para asegurar una mezcla eficiente y una desinfección efectiva, minimizando riesgos operacionales y optimizando el uso del cloro en sistemas de tratamiento de agua potable (AWWA, 2002).

Esto puede implicar una **mezcla insuficiente** de la solución y un riesgo de Liberación de Cloro Gaseoso, es decir, la relación actual de 3 L/g no es adecuada y puede llevar a problemas de seguridad y eficiencia en la planta de tratamiento de agua potable.

Dicha relación coincide con el análisis de desinfección dado en las caracterizaciones, en que el flujo de cloro y a su vez la concentración de cloro en la solución son muy altos comparados a lo que se considera adecuado.

Difusor

Consiste en tuberías perforadas que dispersan uniforme y rápidamente la solución de cloro dentro del caudal de agua a tratar.

La Figura 2-26 muestra el tipo de difusor que se usa en la planta, es un tipo de los difusores para tuberías de diámetros mayores a las 36", difusores para canales abiertos.

Figura 2-26. Difusor para tuberías de diámetros mayores a las 36"

REGLAMENTO TÉCNICO DE DISEÑO DE DESINFECCIÓN PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE

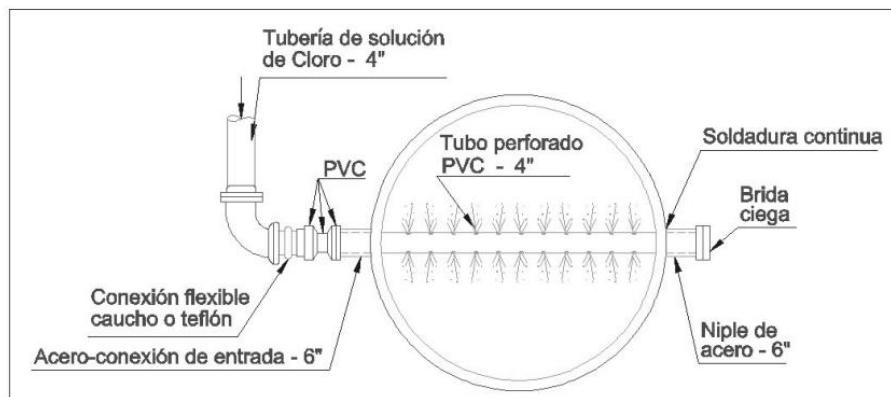


Figura 5 - Difusor perforado para tubería de diámetro mayor de 36"

Fuente: (Viceministerio, 2004, pág. 548)

Tuberías

Las tuberías son PVC dada la corrosividad de las soluciones de cloro. En el sistema de dosificación de cloro gaseoso de vacío, se utilizan una tubería de presión de cloro gaseoso y otra tubería de vacío de cloro gaseoso, para seleccionar el diámetro de la tubería de vacío, la empresa Petrodrill considera la longitud de la tubería y la cantidad de dosificación.

En lo que respecta al tema hidráulico de los componentes no se puede adentrar a mayor detalle debido a que todo es dotado por la empresa Petrodrill, los operarios no cuentan con las especificaciones detalladas de los componentes, la empresa Petrodrill se cerciora de que se cumplan con los requerimientos de calidad y a los operarios solamente les brindaron una capacitación para el uso del sistema.

2.1.2.5.1.7. Almacenamiento

Según el Reglamento técnico de diseño de tanques de almacenamiento para sistemas de agua potable (Viceministerio, 2004, pág. 255) establece que la capacidad del tanque de almacenamiento debe ser igual al volumen que resulte mayor de las siguientes consideraciones:

- a) Volumen de regulación.
- b) Volumen contra incendios.
- c) Volumen de reserva.

Por lo tanto, en el Cuadro II-33, se muestran los cálculos y consideraciones usadas para los mismos, según (Viceministerio, 2004, págs. 255 - 258)

Cuadro II-33. Cálculo de capacidad de almacenamiento

Parámetro	Simbología	Formula	Unidades	Valor teórico	Valor experimental
Caudal	Q	—	m ³ /s	0,160	0,340
Coeficiente de regulación para sistemas a gravedad	C	—		0,300	0,300
Tiempo de regulación	t _r	—	d	1	1
Volumen de regulación	V _r	$V_r = C * Q_{máx.d} * t$	m ³	4.147,200	8.812,800
Tiempo de duración de incendio	t _i	—	h	3	3
Volumen contra incendios	V _i	$V_i = 3.6 * Q_i * t$	m ³	6.220,800	13.219,200
Tiempo de reserva	t _{re}	—	h	4	4
Volumen de reserva	V _{re}	$V_{re} = 3,6 * Q_{máx.d} * t$	m ³	8.294,400	17.625,600

Fuente: Elaboración propia basada en (Viceministerio, 2004)

Por lo tanto, la capacidad del tanque de almacenamiento es igual al volumen de reserva, tomando en cuenta los valores considerables según la norma en cuanto a tiempos menciona. Dicha capacidad según el valor teórico de caudal de diseño de 160 l/s coincide con el hecho de que el volumen de los tanques de almacenamiento en la planta es de 9000 m³, y adecuadamente son dos debido a que la normativa menciona que “Cuando el volumen del tanque de almacenamiento sea superior a 50m³, se debe considerar el uso de dos o más tanques de manera que se faciliten las tareas de operación y mantenimiento”. (Viceministerio, 2004, pág. 261)

Pero, según el valor experimental actual de 340 l/s, que considera las dos fuentes de abastecimiento, la capacidad de los tanques está llegando a los 18000 m³, valor que es el doble del diseño considerado en la planta, es decir, experimentalmente la capacidad de los tanques no es adecuada para el volumen que se está tratando actualmente.

Valores que coinciden con el hecho de que, según operarios, en época húmeda se tiene la necesidad de votar agua tratada para que no rebalsen los tanques.

En cambio, en época seca no existe tal necesidad, debido al hecho de que el caudal promedio como se mencionó previamente, está por los 268 l/s, solo es en algunos horarios de junio, julio y noviembre que se suele llegar a 340 l/s.

2.1.2.5.2. Pruebas operativas

La PTAP cuenta con un manual de operación el cual debe seguir el operario para su funcionamiento en donde se encuentran una serie de procedimientos para el mantenimiento de cada unidad, medición de parámetros, entre otros.

Pero como se sabe en la realidad cambian diversos aspectos y sobre todo con la época, por ende, a continuación, se mencionan los procedimientos que se realizan en época seca, de los cuales varios previamente ya se mencionaron:

- Tomar muestras de los tanques de almacenamiento cada 4 horas y medir parámetros insitu, entre los cuales están pH, caudal, turbiedad, conductividad, temperatura y cloro residual.
- Se inspecciona la unidad de mezcla rápida, así como compuertas de distribución de caudal a las unidades siguientes cada mes aproximadamente, mientras que las válvulas de compuerta se inspeccionan solo cuando llega agua turbia.
- Todos los días se hace inspección de materiales flotantes que estuviesen retenidos contra las paredes, o de materiales sumergidos que pudieran obstaculizar el paso de agua.
- Diariamente el personal de la planta inspecciona las tuberías de descarga de las soluciones de sulfato de aluminio y cal en la unidad de mezcla rápida, garantizando que no exista taponamientos. El mantenimiento de dichas tuberías en caso de taponamientos se realiza una vez al año.
- La limpieza de las cámaras de floculación se realiza semanalmente, se limpia las pantallas de madera de las partículas adheridas por las características del agua de las tipas, la cual posee algas y demás.

- La limpieza de estas unidades se realiza dependiendo al operador, lo que es usual mensualmente, a veces trimestralmente, todo depende de la eficiencia de remoción y de la calidad del efluente a tratar, por ejemplo, en época seca es más frecuente por la calidad del agua de las Tipas.
- Se realiza la limpieza superficial de uno a tres filtros por día, dependiendo del operador cual es el filtro que se limpiara de acuerdo a la saturación en los mismos, cuando no existe movimiento del agua, todo dependiendo de la calidad del agua cruda entrante. En época seca se pierde mucho más debido a que por la calidad del agua se lava todos los filtros todos los días, para evitar saturación.
- La limpieza profunda de los filtros se realiza mensualmente, raspando las paredes por la generación de algas, bacterias y organismos presentes en el agua, como también el raspado de la capa denominada piel de filtro que se genera sobre la capa de arena.
- Se realiza la limpieza de la sala de cloración una vez cada 15 días y el pintado de la misma una vez al año.
- Se realiza la limpieza de los tanques una vez al año, en época seca, debido a que se trabaja con uno solo en dicha época. De igual manera, se realiza una vez al año el pintado del tanque.

2.1.2.6. Conclusiones del diagnostico

A partir de los resultados obtenidos en el diagnóstico del sistema de tratamiento se identificaron varias falencias en las unidades y el manejo operativo del proceso de potabilización que se describen a continuación mediante un cuadro junto a las **posibles causas**.

Cuadro II-34. Cuadro de análisis de falencias

Falencias técnicas	Posibles Causas
La fuente de las Tipas no cumple con la calidad para el uso que se le da, debido a que gracias a los valores de coliformes fecales y totales se	- No existen otras fuentes adecuadas.

<p>clasifica en el Grupo IV de la NB689 y gracias a la turbiedad se clasifica en el Grupo V.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - No existe un tratamiento previo al ingreso a la planta adecuado a la normativa. - La normativa NB689 no está siendo bien aplicada, solo la NB512.
<p>Aumento de parámetros DBO, DQO, fósforo y cromo hexavalente durante el tratamiento, cuando existe baja turbiedad y no se añade coagulante.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Contaminación de materia orgánica e inorgánica en las unidades de tratamiento, debido a la acumulación de la misma.
<p>Alta demanda de cloro, mayores a 350 mg/l fuera de lo usual según la AWWA.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Alta concentración de materia orgánica a tratar en el afluente que ingresa a la cámara de desinfección. - Presencia de compuestos inorgánicos que reaccionan con el cloro.
<p>Cambios bruscos de cloro residual con la misma dosis de cloro agregado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fluctuaciones en la calidad del agua cruda - Problemas en el sistema de dosificación de cloro
<p>Variaciones irregulares de los parámetros en la prueba de jarras para la fuente de las Tipas, además de que se añaden dosis de sulfato de aluminio y cal superiores a las recomendadas según la AWWA.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Calidad variable del agua cruda - Turbiedades muy inestables e irregulares, tal que se necesita usar mucha cantidad de reactivos para poder reducir está en varias ocasiones.
<p>El tiempo de retención en los floculadores cuando se trata el agua de las Tipas en época seca es de 40 min, el cual excede lo normal según la NB689, de igual manera pasa con la sedimentación y filtración.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Por la época, regularmente no está existiendo el proceso de coagulación-floculación como tal, ya que no se está añadiendo coagulante a esta agua por la baja turbiedad y cuando hay alta turbiedad es de golpe en varias ocasiones.

<p>Velocidad de sedimentación crítica y carga superficial bajas en sedimentadores comparado a la norma.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Por la época, regularmente no está existiendo el proceso de coagulación-flocculación como tal provocando un mal funcionamiento de los sedimentadores.
<p>Tasas de filtración altas y falta de medios filtrantes adecuados, solo se está usando uno de arena actualmente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Obturación de los filtros, es decir, acumulación de sólidos en los medios filtrantes. - Degradación de los medios filtrantes, es decir, pérdida de la capacidad de retención de sólidos en los filtros, provocando su descarte.
<p>Relación de caudal de agua a gas cloro en el sistema de desinfección de 3 l/g (debajo del rango recomendado de 10:1 a 20:1), es decir, la solución dosificadora de cloro esta con una concentración considerada alta del gas según la AWWA.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dosificación excesiva de cloro debido a la alta demanda de cloro mencionada. - Problemas en el sistema de dosificación de cloro
<p>No existe un monitoreo del caudal de salida.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ausencia de una unidad para monitorear el caudal de salida.
Falencias operativas	Posibles Causas
<p>Mayor frecuencia de limpieza en todas las unidades en época seca, una frecuencia inusual en plantas convencionales, provocando grandes pérdidas, sobre todo en el retrolavado de filtros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor carga de sólidos en época seca - Crecimiento de biopelículas.

Ausencia de pruebas de jarras consecutivas para la coagulación, esta solo se hace para el caso de las Tipas, cuando el agua excede los 300 a 400 UNT.	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de optimización del proceso de coagulación con el agua de las Tipas, debido a su comportamiento irregular. - Cantidad de reactivos para pruebas limitada por el requerimiento de estos en los casos específicos de turbiedades altas.
---	--

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro de información recolectada y tomando en cuenta las causas de las falencias encontradas. Se puede observar una causa común en casi todas las falencias, solamente con excepción de la ausencia de una unidad para monitorear el caudal de salida. Esa causa común es la **irregularidad de la fuente de abastecimiento “Las Tipas” en cuanto a su calidad**, la cual desglosa los problemas en las unidades posteriores, mediante este razonamiento, se concluye con el hecho de que las causas en celestes marcadas son las correctas para cada falencia, y tratando su causa común se puede diseñar alternativas de optimización que son más integradas y que solucionen de manera más adecuada las falencias ubicadas.

De igual manera, como se pudo observar en el Cuadro.II-31 las causas específicas y la causa común, nos permiten sintetizar aspectos específicos a mejorar en la fuente, los cuales son:

1. Regulación de turbiedad
2. Reducción de coliformes totales y fecales
3. Homogeneización del agua, permitiendo un comportamiento más regular de la misma, para ayudar a mejorar el control y tratamiento en los procesos convencionales siguientes.

Los cuáles serán la base para el planteamiento de las alternativas técnicas de solución.

2.1.2.7. Situación actual del pretratamiento en la PTAP de tabladita

Previo a describir las alternativas, se procede a verificar la situación actual del pretratamiento de la PTAP, ya que estas irán enfocadas en la fuente según las falencias encontradas.

Actualmente los técnicos de la planta mencionan que no se cuenta con planos o datos sobre el diseño de las unidades de pretratamiento de la PTAP, pero que se sabe que estas son dos: Rejillas para la retención de sólidos flotantes y una cámara de sedimentación. Por lo que la estudiante procedió a tomar los datos necesarios para evaluar el estado de las mismas y proceder a adecuar las mejoras a lo que existe actualmente.

Al observar el estado del pretratamiento se pudo notar que la cámara de sedimentación no está funcionando como tal, el agua en el cárcamo sobrepasa la misma, y no existe un tiempo de retención en ella, en si todo el cárcamo está funcionando como una cámara y los puntos de succión de las bombas se encuentran en una zona de lodos, lo cual puede ser la razón de que a la planta llegue tanto lodo en ciertos días.

Conversando con el jefe técnico de la PTAP de Tabladita, el comenta que efectivamente la estación ya no está funcionando como debería, inicialmente cumplía su función, pero desde que se construyó un azud aguas debajo de la estación, las condiciones iniciales cambiaron debido al aumento del tirante y no se hizo nada al respecto en la estación. Esto llevó a la estudiante a darse cuenta que si el pretratamiento está así, en realidad actualmente solo está funcionando el cribado y no está produciéndose una presedimentación en el agua, no hay una retención de lodos, esto lo podemos confirmar con los datos que se tomaron y por razonamiento propio que se mencionó previamente.

Es así que a continuación se muestra la información de cada unidad mediante las fichas técnicas que se usaron previamente en las unidades de la planta.

Cuadro II-35. Ficha Técnica de la Unidad de Cribado o Cernido

Unidad

Cribado o Cernido	
 	
Material de construcción	Acero al carbono
Dimensiones	Ancho: 0,500m Largo: 0,680m
Operación y proceso	<p>Mediante esta unidad se permite realizar el proceso de cribado o cernido al agua, es decir, con ella se protege a la planta de la llegada intempestiva de grandes objetos flotantes, capaces de provocar obstrucciones en las distintas unidades, además de separar y evacuar fácilmente materiales voluminosos arrastrados por el agua cruda.</p> <p>En esta unidad el agua ingresa luego de haber ingresado por una compuerta al primer cárcamo de la toma, ya para poder ingresar al segundo cárcamo, en la antigua cámara de sedimentación.</p>

Estado físico	Bueno		<ul style="list-style-type: none"> - Se puede observar en mal estado las barras, ya existe una ruptura en ellas, provocando un espacio sin barras. - Se encuentra oxidada la rejilla, ya debe verse un cambio de las mismas.
	Regular		
	Malo	X	
Estado operativo	El operario cada día limpia las rejillas por obstrucciones posibles		

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro II-36. Ficha Técnica de la Unidad de Cárcamo de sedimentación

Unidad	
Cárcamo de sedimentación	
 	
Material de construcción	Concreto

Dimensiones	Ancho: 3 m; Largo: 3,500 m; Alto: 6,500 m		
Operación y proceso	<p>Actualmente este opera como se mencionó previamente, como una cámara de sedimentación en la cual se separan las partículas sólidas de un líquido.</p> <p>En esta cámara, la zona de lodos también funciona como zona de salida del agua, ya que ahí se encuentran los puntos de succión de las bombas, un comportamiento muy inusual e inadecuado, es decir no se está succionando el agua clarificada, sino la parte con lodos.</p>		
Estado físico	Bueno		<ul style="list-style-type: none"> - La unidad en si no presenta filtraciones, grietas o fugas.
	Regular	X	<ul style="list-style-type: none"> - No se puede observar a buen detalle, solo cuando se hace mantenimiento se puede ver.
	Malo		
Estado operativo	<ul style="list-style-type: none"> - La extracción de lodos se realiza de 3 a 4 veces en los 5 meses que aproximadamente funciona la estación - Los electromecánicos van una vez al año o cuando es necesario para un mantenimiento eléctrico del sistema de bombeo. Por ejemplo, los engrases son una vez al mes - La limpieza de filtros de succión son cada una a dos semanas. 		

Fuente: Elaboración Propia

También se puede mostrar las pruebas hidráulicas y operativas correspondientes para evaluar el buen funcionamiento de las unidades, cabe mencionar que los valores de caudal están aproximados, ya que no se tiene medidor de caudal en el ingreso de los pretratamientos, pero se estimó que esos son los mínimos, ya que sino no funcionaría el sistema de bombeo:

Cuadro II-37. Parámetros de diseño Cribado o Cernido

Parametro	Simbologia	Formula	Unidades	Valor teorico	Valor experimental minimo1	Valor experimental minimo2
Caudal	Q	—	m ³ /s	variable	0,080	0,120
Ancho rejillas	W	—	m	variable	0,500	0,500
Longitud	L	—	m	variable	0,680	0,680
Area superficial	As	As = W*L	m ²	variable	0,340	0,340
Velocidad media de paso	Vm	Vm = (As-Ar)/Q	m/s	0,6 a 1 para caudal minimo y de 1,2 a 1,4 para caudal maximo	0,444	0,667
Perdida de carga	hf	hf = K * (V ² / 2g)	m	0,05 caudal minimo y 0,15 caudal maximo	0,026	0,058

Fuente: Elaboración propia basada en (Viceministerio, 2004, pág. 387)

Como se puede observar, ya que son valores estimados, el comportamiento de las rejillas es adecuado, las pruebas hidráulicas van de acuerdo a la norma, solo existe una ligera desviación del rango para el valor más mínimo, pero ese es poco usual, ya que casi toda la época están funcionando las 2 bombas de 60 l/s.

Ahora procediendo a las pruebas del cárcamo de sedimentación.

Cuadro II-38. Parámetros de diseño Cárcamo de sedimentación

Parametro	Simbologia	Formula	Unidades	Valor teorico	Valor experimental
Caudal	Q	—	m ³ /s	variable	0,120
Ancho	W	—	m	variable	3
Longitud	L	—	m	variable	3,500
Altura o profundidad	H	—	m	variable	7
Area superficial	As	As = W*L	m ²	variable	10,500
Velocidad de sedimentación	Vs	Vs = Vsc*f	m/s	≤ 0,021	0,015
Diametro particula	d	Tablas de reglamento	m	0,00001-0,0002	1,500E-04
Factor minorante	f	—		1,1 a 1,3	1,300
Velocidad de sedimentación critica	Vsc	$V_{sc} = \frac{Q}{B * L} = \frac{Q}{A_s} = q$	m/s	≤ 0,021/f	0,011
Densidad particula	ρ	—	kg/m ³	variable	2.650
Velocidad de escurrimiento horizontal	Vh	$V_h = \frac{Q}{B * H}$	m/s	< Va	0,006
Velocidad de resuspension o de arrastre de las particulas	Va	$V_a = \sqrt{40 * (\rho_s - \rho_w) * g * d / (3 * \rho_w)}$	m/s	> Vh	0,180

Fuente: Elaboración propia basada en (Viceministerio, 2004, pág. 391-392)

Como se puede observar se muestra un comportamiento adecuado de las velocidades, tanto la de escurrimiento horizontal como la de resuspensión o arrastre de partículas, pero como se mencionó previamente, la zona de lodos actualmente es donde se encuentran los puntos de succión de las bombas lo cual confirma que al haber una acumulación adecuada de lodos, estos están siendo succionados a la planta en vez de que el agua clarificada sea succionada, generando esos picos de turbiedad, sobre todo en los meses de Octubre y Noviembre, cuando inician las lluvias.

Ya con esta información podemos añadir los siguientes datos sobre pruebas operativas:

Pruebas operativas

Actualmente no se cuenta con un manual de operación del pretratamiento, pero como se mencionó previamente, si existen ciertos procedimientos que se realizan a las dos unidades de pretratamiento:

- El operario cada día limpia las rejillas de la unidad de cribado o cernido por obstrucciones posibles.
- Solo cuando esta sin agua se hace limpieza el cárcamo de sedimentación, es decir una vez al año se hace limpieza, cuando se encuentra concluyendo la época seca, se saca el agua y los sólidos que llegan hasta más de 2 metros según operarios, justo a la pared de lo que antes era una cámara de sedimentación.
- También una vez al año se limpia el cárcamo de ingreso, en esa misma ocasión, en si se hace una limpieza general.
- A su vez los electromecánicos van una vez al año o cuando es necesario para un mantenimiento eléctrico del sistema de bombeo.

2.2. DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

Conociendo la situación real del pretratamiento y según las falencias, procedemos a describir las alternativas técnicas de solución según Normativa Boliviana. En este caso,

primero se procederá a describirlas alternativas por falencia y finalmente las alternativas propuestas.

2.2.1. Alternativas de regulación de turbiedad

Se tomó en cuenta la norma NB689 (Ministerio d. S., 2004, págs. 103), la cual menciona que la turbiedad debe permanecer en un rango tratable por medios convencionales y que cuando existen turbiedades altas, las plantas deben ser diseñadas en base a **tanques presedimentadores, embalses o doble coagulación**. Por lo cual procedemos a describir estas alternativas a continuación.

1. TANQUES PRESEDIMENTADORES

DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Según el Reglamento Técnico de Diseño para Plantas Potabilizadoras de agua (Viceministerio, 2004), los tanques presedimentadores son unidades de pretratamiento diseñadas para separar las partículas sólidas de un líquido, especialmente aquellas que no son de origen coloidal. Estas partículas tienen diámetros comprendidos entre 0,01 mm y 0,20 mm.

Los tanques presedimentadores tienen varias zonas:

- 1. Zona de Entrada:** Aquí se introduce el agua cruda.
- 2. Zona de Sedimentación:** Es donde ocurre la sedimentación de las partículas.
- 3. Zona de Lodos:** Se acumulan los lodos sedimentados.
- 4. Zona de Salida:** El agua clarificada sale del tanque.

Parámetros de Diseño

- **Velocidad de Sedimentación Crítica:** Se calcula considerando un factor de seguridad que varía entre 1,1 y 1,3.
- **Velocidad de Escurrimiento Horizontal:** Debe ser menor a la velocidad de arrastre de las partículas.
- **Carga Superficial:** Se determina en función del caudal de diseño y el área superficial del tanque.
- **Tiempo de Retención:** Generalmente entre 1,5 y 3,0 horas.

- **Velocidad Horizontal:** Menor a 10 mm/s.

Dimensionamiento

- **Superficie del Presedimentador:** Se calcula en función del caudal y la carga superficial.
- **Profundidad del Presedimentador:** Depende de la velocidad de escurrimiento horizontal y el tiempo de retención.
- **Producción de Lodos:** Se evalúa en base a la concentración volumétrica de partículas por litro de agua.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA

En la operación de los tanques presedimentadores, el agua cruda ingresa a la zona de entrada, donde se distribuye uniformemente. A medida que el agua fluye a través de la zona de sedimentación, las partículas sólidas se asientan en el fondo del tanque debido a la gravedad. Los lodos acumulados en la zona de lodos se purgan periódicamente para evitar la acumulación excesiva y la posible re suspensión de partículas.

Procedimientos Operativos

- **Entrada de Agua:** Se controla para asegurar una distribución uniforme y evitar turbulencias que puedan afectar la sedimentación.
- **Extracción de Lodos:** Se realiza mediante válvulas de purga ubicadas en la zona de lodos. La frecuencia de purga depende de la tasa de acumulación de lodos.
- **Mantenimiento:** Incluye la limpieza de las estructuras de entrada y salida, así como la inspección y reparación de las válvulas de purga.

2. EMBALSES

Según el libro de ingeniería de las aguas residuales de Metcalf & Eddy (Tchobanoglous et al., 1991), los embalses son estructuras diseñadas para almacenar agua, generalmente construidas en terrenos excavados y dotadas de sistemas de canalización y control. Su

principal función es conservar la energía calorífica y mantener condiciones anaerobias para la estabilización de residuos orgánicos.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Los embalses son estructuras diseñadas para almacenar agua residual en el terreno. Estos embalses están equipados con sistemas de canalizaciones y salidas deseadas. Para conservar la energía calorífica y mantener las condiciones anaerobias, se construyen con profundidades de hasta 9,1 metros. La estabilización de los residuos orgánicos en los embalses se logra mediante una combinación de precipitación y conversión anaerobia. Durante este proceso, los residuos orgánicos se transforman en productos gaseosos finales como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), ácidos orgánicos y tejido celular. Este proceso permite alcanzar eficiencias de eliminación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) superiores al 70%, y en condiciones óptimas, hasta el 85%.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA

Operativamente, los embalses funcionan de la siguiente manera:

- 1. Entrada de Agua Residual:** El agua residual ingresa al embalse y los sólidos sedimentables se depositan en el fondo.
- 2. Proceso Anaerobio:** En el fondo del embalse, los residuos orgánicos se descomponen en condiciones anaerobias, produciendo gases como metano y dióxido de carbono.
- 3. Salida del Efluente:** El efluente tratado se extrae del embalse mediante bombas y se vierte en cuerpos de agua o se somete a tratamientos adicionales.
- 4. Mantenimiento de Condiciones Anaerobias:** Para mantener las condiciones anaerobias, se controla la profundidad del embalse y se minimiza la entrada de oxígeno.
- 5. Monitoreo y Control:** Se monitorean parámetros como la DBO_5 y la producción de gases para asegurar la eficiencia del proceso.

Este sistema es eficaz para la estabilización de residuos orgánicos y la reducción de la carga contaminante del agua residual antes de su vertido o reutilización.

3. DOBLE COAGULACIÓN

Según el libro de ingeniería de las aguas residuales de Metcalf & Eddy (Tchobanoglous et al., 1991), la doble coagulación es un proceso avanzado de tratamiento de aguas residuales que implica la adición de dos coagulantes diferentes en etapas sucesivas para mejorar la eliminación de contaminantes.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Este método se utiliza principalmente para tratar aguas con alta carga de materia orgánica y sólidos en suspensión que no pueden ser eliminados eficazmente mediante una sola etapa de coagulación.

1. Primera Etapa de Coagulación:

- **Coagulante Primario:** Se añade un coagulante, como sulfato de aluminio o cloruro férrico, al agua residual. Este coagulante neutraliza las cargas eléctricas de las partículas suspendidas, permitiendo que se aglomeren en flóculos más grandes.
- **Mezcla Rápida:** El agua y el coagulante se mezclan rápidamente para asegurar una distribución uniforme del coagulante y la formación inicial de flóculos.

2. Sedimentación Intermedia:

- **Decantación:** Los flóculos formados en la primera etapa se dejan sedimentar en un tanque de decantación, donde se separan del agua clarificada.

3. Segunda Etapa de Coagulación:

- **Coagulante Secundario:** Se añade un segundo coagulante, que puede ser el mismo que el primero o uno diferente, para tratar las partículas que no fueron eliminadas en la primera etapa.
- **Mezcla Lenta:** Se realiza una mezcla más lenta para permitir que los flóculos crezcan y se fortalezcan.

4. Flotación o Filtración Final:

- **Separación Final:** Los flóculos restantes se eliminan mediante flotación por aire disuelto (FAD) o filtración, dependiendo de la configuración del sistema de tratamiento.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA

En términos operativos, la doble coagulación se implementa de la siguiente manera:

1. Preparación de Coagulantes:

- Los coagulantes se preparan en soluciones concentradas y se almacenan en tanques de dosificación.

2. Dosificación y Mezcla:

- **Primera Dosificación:** El coagulante primario se dosifica en el flujo de entrada del agua residual y se mezcla rápidamente en un tanque de mezcla rápida.
- **Sedimentación:** El agua tratada se dirige a un tanque de sedimentación donde los flóculos se asientan y el agua clarificada se separa.

3. Segunda Dosificación:

- El agua clarificada se transfiere a un segundo tanque de mezcla donde se añade el coagulante secundario. La mezcla se realiza de manera más lenta para permitir la formación de flóculos más grandes y estables.

4. Separación Final:

- El agua tratada pasa a través de un sistema de flotación por aire disuelto o un filtro para eliminar los flóculos restantes. En el caso de la flotación, el aire se disuelve en el agua bajo presión y luego se libera, formando burbujas que arrastran los flóculos a la superficie para ser retirados.

5. Manejo de Residuos:

- Los flóculos y lodos recolectados en las etapas de sedimentación y flotación se manejan y disponen adecuadamente, generalmente mediante deshidratación y disposición en vertederos o su uso en aplicaciones agrícolas.

Este proceso de doble coagulación es eficaz para mejorar la calidad del agua tratada, reduciendo significativamente la turbidez, la materia orgánica y otros contaminantes presentes en el agua residual.

2.2.2. Alternativas de reducción de coliformes totales y fecales

Se tiene el conocimiento de que el proceso más usado y conocido como el más útil para la reducción de coliformes fecales y totales es la desinfección, sin embargo, existen varias opciones viables y factibles que reducen en cierto grado estos parámetros y ayudan al pretratamiento.

Según el Reglamento Técnico de Diseño de Desinfección para sistemas de agua potable de la NB689 (Viceministerio, 2004), el cloro y sus compuestos son los más empleados y recomendados para la desinfección no solo debido a su menor costo sino también por su efecto residual después de su aplicación. Por esta razón, se procede a mencionar sus descripciones técnicas y operativas según (MWH's Water Treatment, 2012)

DESCRIPCIÓN TECNICA

La cloración es un proceso de desinfección que implica la adición de cloro o compuestos de cloro al agua para eliminar microorganismos patógenos. El cloro puede estar en forma de gas (Cl_2), hipoclorito de sodio (NaOCl) o hipoclorito de calcio (Ca(OCl)_2). La reacción principal en la cloración es la formación de ácido hipocloroso (HOCl) cuando el cloro se disuelve en agua.

El ácido hipocloroso es un desinfectante potente que puede penetrar las paredes celulares de los microorganismos y destruirlos. La eficacia de la cloración depende del pH del agua, la temperatura, la concentración de cloro y el tiempo de contacto. A pH bajo, el ácido hipocloroso predomina, mientras que a pH alto, el ion hipoclorito (OCl^-) es más común, siendo menos efectivo como desinfectante.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA

Operativamente, la cloración se implementa en varias etapas del tratamiento del agua. Inicialmente, se puede aplicar cloro en la entrada de la planta de tratamiento para controlar el crecimiento de algas y bacterias en las etapas preliminares. Posteriormente,

se realiza una cloración más precisa después de la filtración para asegurar la eliminación de patógenos restantes. La dosificación de cloro se ajusta continuamente para mantener un residual de cloro libre en el agua tratada, lo que garantiza la desinfección continua hasta el punto de consumo.

El proceso de cloración también puede incluir la cloración de ruptura, donde se añade cloro en exceso para oxidar completamente el amoníaco y otros compuestos reductores presentes en el agua. Este método asegura que cualquier cloro añadido adicional permanezca como cloro libre, proporcionando una desinfección más efectiva.

2.2.3. Alternativas para homogeneización del agua

Para estas alternativas, existen varias opciones que se podrían adecuar al caso, y entre ellas están:

1. MEZCLADORES ESTÁTICOS

Según (RYR Fluidos, 2017), se pueden brindar las siguientes descripciones técnicas y operativas:

DESCRIPCIÓN TÉCNICA:

- **Funcionamiento:** Los mezcladores estáticos son dispositivos instalados en las tuberías que utilizan elementos internos (como placas o hélices) para mezclar el agua a medida que fluye. La mezcla se produce por la turbulencia generada por estos elementos
- **Materiales:** Generalmente están hechos de acero inoxidable o plástico resistente a la corrosión.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA:

- **Instalación:** Se instalan directamente en la línea de tuberías. No requieren energía externa ya que utilizan la energía del flujo del agua.
- **Mantenimiento:** Mantenimiento mínimo, principalmente limpieza periódica para evitar obstrucciones.

- **Aplicaciones:** Ideales para la mezcla de productos químicos y la homogeneización de flujos en tuberías.

2. TANQUES DE HOMOGENEIZACIÓN CON AGITACIÓN NATURAL

Según (Xylem, n.d.), se pueden brindar las siguientes descripciones técnicas y operativas:

DESCRIPCIÓN TÉCNICA:

- **Funcionamiento:** Los tanques de homogeneización utilizan el diseño del tanque y la energía hidráulica del flujo de entrada y salida para promover la mezcla natural del agua
- **Diseño:** Los tanques deben tener una forma y tamaño adecuados para permitir un tiempo de retención suficiente y una mezcla eficiente.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA:

- **Instalación:** Construcción de tanques de almacenamiento con entradas y salidas diseñadas para maximizar la mezcla natural.
- **Mantenimiento:** Limpieza regular para evitar la acumulación de sedimentos y biofilm.
- **Aplicaciones:** Adecuado para plantas con recursos limitados y donde se puede aprovechar la gravedad y el flujo natural.

3. AIREADORES DE BAJO COSTO

Según (López, 2016), se pueden brindar las siguientes descripciones técnicas y operativas:

DESCRIPCIÓN TÉCNICA:

- **Funcionamiento:** Los aireadores inyectan aire en el agua para promover la mezcla y aumentar el contenido de oxígeno. Pueden ser sistemas de burbujeo o difusores de aire

- **Tipos:** Aireadores de superficie, difusores de burbuja fina, y aireadores de chorro.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA:

- **Instalación:** Colocación de aireadores en tanques o lagunas. Requieren una fuente de aire comprimido o un compresor.
- **Mantenimiento:** Revisión y limpieza periódica de los difusores para asegurar un funcionamiento eficiente.
- **Aplicaciones:** Útiles en lagunas de estabilización y tanques de aireación.

4. RECIRCULACIÓN DE FLUJO CON BOMBAS DE BAJA ENERGÍA

Según (Cengel & Cimbala, 2017), se pueden brindar las siguientes descripciones técnicas y operativas:

DESCRIPCIÓN TÉCNICA:

- **Funcionamiento:** Utiliza bombas para recircular el agua dentro de un tanque o sistema de tratamiento, asegurando una mezcla continua (Cengel & Cimbala, 2017).
- **Componentes:** Bombas de baja energía, tuberías de recirculación, y válvulas de control.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA:

- **Instalación:** Configuración de un sistema de recirculación con bombas adecuadas para el volumen de agua a tratar.
- **Mantenimiento:** Inspección y mantenimiento regular de las bombas y tuberías para evitar fallos.
- **Aplicaciones:** Adecuado para tanques de almacenamiento y sistemas de tratamiento continuo.

5. SISTEMAS DE MEZCLA HIDRÁULICA

Según (González, 2018), se pueden brindar las siguientes descripciones técnicas y operativas:

DESCRIPCIÓN TÉCNICA:

- **Funcionamiento:** Utiliza la energía del flujo del agua para inducir la mezcla. Esto se logra mediante el diseño de entradas y salidas en los tanques que promuevan la circulación natural
- **Diseño:** Entradas y salidas estratégicamente ubicadas para maximizar la mezcla.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA:

- **Instalación:** Diseño y construcción de tanques con entradas y salidas optimizadas para la mezcla hidráulica.
- **Mantenimiento:** Mantenimiento mínimo, principalmente asegurarse de que las entradas y salidas no estén obstruidas.
- **Aplicaciones:** Ideal para tanques de almacenamiento y sistemas de tratamiento por gravedad.

6. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN SIMPLIFICADA

Según (Andia, 2014), se pueden brindar las siguientes descripciones técnicas y operativas:

DESCRIPCIÓN TÉCNICA:

- **Funcionamiento:** Añadir coagulantes y floculantes para aglutinar partículas finas y facilitar su remoción en etapas posteriores del tratamiento
- **Productos Químicos:** Coagulantes como sulfato de aluminio y floculantes como polímeros orgánicos.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA:

- **Instalación:** Sistemas de dosificación de productos químicos y tanques de mezcla para la coagulación y floculación.

- **Mantenimiento:** Monitoreo y ajuste regular de las dosis de productos químicos, limpieza de tanques de mezcla.
- **Aplicaciones:** Adecuado para plantas con alta carga de sólidos suspendidos y recursos limitados.

2.2.4. Diseño de alternativas propuestas

En función a la teoría, al pretratamiento actual y considerando la opinión técnica de los operarios y el jefe en planta, además de considerar los aspectos previamente mencionados, se decidió realizar tres propuestas confiables según normativa. Las cuales se pueden explicar a continuación mediante un cuadro considerando los tres aspectos a mejorar:

Cuadro II-39. Cuadro de aspectos a mejorar y Alternativas propuestas

ASPECTOS A MEJORAR	ALTERNATIVA I	ALTERNATIVA II	ALTERNATIVA III
Regulación de turbiedad	Construcción de un presedimentador que se adecue al cárcamo actual de la toma de las Tipas e Implementar un sistema semiautomático para dosificación de coagulante.	Construir un Embalse.	Construcción de un presedimentador que se adecue al cárcamo actual de la toma de las Tipas.
Reducción de coliformes totales y fecales		Implementar Precloración.	Implementar Precloración.

Homogeneización del agua	Como se pudo notar en la investigación previa de teoría, los mezcladores hidráulicos son capaces de provocar tal homogeneización y actualmente el vertedero de la planta está trabajando muy bien, solamente por la falta de control de la turbiedad, entre otros, al no existir un pretratamiento adecuado, existen irregularidades, ya con la existencia de un pretratamiento va a funcionar de manera más adecuada esta unidad.
--------------------------	--

Fuente: Elaboración propia

Es así que se procede a la especificación y diseño de estas alternativas de optimización del tratamiento.

2.2.4.1. Diseño Alternativa I

DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Esta alternativa propone la construcción de un presedimentador que se adecue al cárcamo actual de la toma de las Tipas, en conjunto con un sistema de dosificación semiautomática de coagulante, con el objetivo de mejorar las condiciones físico-químicas del agua cruda antes de su ingreso a las unidades de tratamiento de la Planta de Tabladita. Ambos componentes trabajan de forma complementaria para reducir significativamente la carga de sólidos suspendidos y materia orgánica, lo cual facilita el posterior tratamiento convencional.

Esta propuesta se basa en el hecho de que, según teoría, la desinfección siempre es más efectiva cuando el tratamiento precedido es adecuado, evitando de esta manera excesos de adición de cloro, formación de subproductos, entre otros. Además de que se tiene el conocimiento según el diagnóstico que, si hay un exceso de gas cloro que se está añadiendo, entonces por esto se prioriza mejorar las condiciones fisicoquímicas del agua cruda antes de su ingreso al tratamiento convencional.

Presedimentador:

Según el Reglamento Técnico de Diseño para Plantas Potabilizadoras de Agua (Viceministerio, 2004), los tanques presedimentadores son unidades de pretratamiento diseñadas para separar las partículas sólidas de un líquido, especialmente aquellas que no son de origen coloidal. Estas partículas tienen diámetros comprendidos entre 0,01 mm y 0,20 mm.

El presedimentador permite la remoción de sólidos gruesos, sedimentos y parte de la materia orgánica, lo que contribuye a una disminución inicial de la turbiedad y de la demanda de coagulante aguas abajo.

Sistema de dosificación semiautomática de coagulante:

Se propone la instalación de un sistema semiautomático basado en una bomba dosificadora mecánica Grundfos DMX, la cual permite la dosificación precisa y ajustable de sulfato de aluminio, dependiendo de las condiciones del agua cruda.

Esta tecnología contribuye a mejorar la eficiencia del proceso de coagulación, evitando sobredosificaciones o fallas en el tratamiento, y facilitando el control operacional del sistema.

DESCRIPCIÓN OPERATIVA

En la operación de la propuesta, el agua cruda es conducida primeramente hacia el presedimentador encontrado en la toma de agua, donde es distribuida uniformemente en la zona de entrada. Durante su paso por la zona de sedimentación, las partículas suspendidas de mayor tamaño se separan y se acumulan en el fondo en la denominada zona de lodos.

Seguidamente el agua parcialmente clarificada ingresa a la planta mediante la aducción y pasa por el sistema de dosificación de coagulante, donde la bomba Grundfos DMX inyecta sulfato de aluminio de manera controlada. La tasa de dosificación es ajustada manualmente según parámetros preestablecidos en las pruebas de jarras con las que cuenta la planta, permitiendo una mejor homogeneización del coagulante en el flujo de agua y una reducción más eficaz de turbiedad y microorganismos presentes.

Cuadro II-40. Costos Alternativa I

Nº	Descripción	Cantidad	COSTO TOTAL (Bs)
1	Construcción de unidad de presedimentación	1	30.000
2	Instalación del sistema semiautomático	1	35.000
TOTAL			65.000

Fuente: Elaboración propia basada en (REVISTA PyC marzo-agosto 2024.pdf, s. f.) y (Grundfos, 2024)

Nota: Los costos presentados en este cuadro corresponden a una estimación conceptual o preliminar para la etapa de prefactibilidad del presente estudio. Para una determinación de costos más exacta y vinculante, se requeriría la realización de estudios complementarios que incluyen, pero no se limitan a: levantamiento topográfico detallado del cárcamo y su entorno, estudio geotécnico específico para la cimentación del presedimentador, análisis hidráulico preciso del punto de captación y la aducción, especificaciones técnicas detalladas de la bomba dosificadora y sus accesorios, y cotizaciones actualizadas de proveedores y mano de obra local. Estos valores sirven como referencia para la comparación y selección de alternativas.

2.2.4.2. Diseño Alternativa II

DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Esta alternativa contempla la construcción de un embalse de regulación en la zona de captación, acompañado de un sistema de precloración ubicado después de la dosificación de coagulante, pero antes de los floculadores, en una zona hidráulicamente viable de la planta y que pueda ser monitoreada por el operador en planta.

Embalse de regulación: Diseñado para almacenar y regular temporalmente el caudal de agua cruda, el embalse permitirá una sedimentación natural de partículas gruesas, la homogeneización del agua y la atenuación de cargas orgánicas e inorgánicas. Esto

mejorará la estabilidad hidráulica y de calidad del agua que ingresa a la planta. Contará con canalización de entrada y salida, y monitoreo básico de parámetros físicos.

Sistema de precloración independiente: Consiste en una unidad de dosificación específica para hipoclorito de sodio (NaOCl), instalada de forma separada del sistema de cal y coagulante, para evitar reacciones cruzadas. El sistema básicamente incluirá:

- **Tanque de almacenamiento** para solución diluida de hipoclorito de sodio.
- **Bomba dosificadora mecánica ajustable**, marca recomendada: Grundfos DMX o similar, resistente a medios oxidantes.
- **Línea de impulsión en PVC** resistente al cloro, con válvula antirretorno y cabezal de inyección en un punto aguas abajo del canal de mezcla rápida.
- **Sistema de control proporcional al caudal**, para ajustar la dosis según la variación de ingreso, o dosificación fija en caso de caudal estable.

La precloración se concibe como una medida para cumplir con las exigencias normativas que limitan el nivel de coliformes en el agua que alimenta la planta, al tiempo que se busca un punto de dosificación que minimice la formación de subproductos de desinfección (SPD).

DESCRIPCIÓN OPERATIVA

El agua cruda se capta y almacena temporalmente en el embalse. Durante su permanencia, ocurren procesos de sedimentación de sólidos sedimentables, oxigenación natural y homogeneización del caudal. A continuación, el efluente del embalse se dirige hacia la planta bajo condiciones controladas.

Dentro de la planta, se dosifica primero el coagulante en el canal de mezcla rápida. A continuación, en un punto posterior y separado, se dosifica el hipoclorito de calcio mediante el nuevo sistema independiente. Seguidamente, el agua pre-clarificada y pre-desinfectada pasa a las demás unidades de tratamiento convencional de la Planta de Tabladita, que son: floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Este sistema integrado de pretratamiento optimiza la remoción inicial de turbiedad y coliformes,

reduciendo la carga contaminante que ingresa a las unidades siguientes. Pero, si bien la precloración aborda el requisito de coliformes a la entrada, es importante señalar que su implementación en esta etapa temprana debe ser monitoreada constantemente para minimizar la formación de subproductos de desinfección derivados de la reacción del cloro con la materia orgánica residual.

Se monitorean parámetros como cloro libre residual, pH y tiempo de contacto para verificar la efectividad del proceso.

COSTOS

Cuadro II-41. Costos Alternativa II

Nº	Descripción	Cantidad	COSTO TOTAL (Bs)
1	Construcción de Embalse.	1	10.000.000
4	Sistema de dosificación y monitoreo de hipoclorito de calcio	1	60.000
TOTAL			10.060.000

Fuente: Elaboración propia basada en GAMA Estructuras y (Grundfos, 2024)

Nota: Los costos presentados en este cuadro corresponden a una estimación conceptual o preliminar, dada la magnitud y complejidad de la obra. Para una determinación de costos exacta y vinculante, es indispensable la realización de estudios exhaustivos que comprenden: estudios topográficos y batimétricos detallados del sitio del embalse, estudios geológicos y geotécnicos profundos para la estabilidad de presas y estructuras asociadas, estudios hidrológicos completos de la cuenca, evaluaciones de impacto ambiental y social, diseño estructural de la presa y obras de toma/descarga, cotizaciones específicas de obras civiles de gran envergadura. Además de especificaciones técnicas detalladas para el sistema de dosificación de hipoclorito y cotizaciones actualizadas de proveedores y mano de obra local. Estos valores deben ser considerados como una referencia para la comparación y selección de alternativas.

2.2.4.3. Diseño Alternativa III

DESCRIPCIÓN TECNICA

Esta alternativa propone la construcción de un presedimentador que se aadecue al cárcamo actual de la toma de las Tipas, en conjunto con un sistema de precloración ubicado después de la dosificación de coagulante, pero antes de los floculadores, en una zona hidráulicamente viable de la planta y que pueda ser monitoreada por el operador en planta.

Presedimentador:

Según el Reglamento Técnico de Diseño para Plantas Potabilizadoras de Agua (Viceministerio, 2004), los tanques presedimentadores son unidades de pretratamiento diseñadas para separar las partículas sólidas de un líquido, especialmente aquellas que no son de origen coloidal. Estas partículas tienen diámetros comprendidos entre 0,01 mm y 0,20 mm.

El presedimentador permite la remoción de sólidos gruesos, sedimentos y parte de la materia orgánica, lo que contribuye a una disminución inicial de la turbiedad y de la demanda de coagulante aguas abajo.

Sistema de Precloración Estratégica:

Consiste en una unidad de dosificación específica para hipoclorito de sodio (NaOCl), instalada de forma separada del sistema de cal y coagulante, para evitar reacciones cruzadas. El sistema básicamente incluirá:

- Tanque de almacenamiento para solución diluida de hipoclorito de sodio.
- Bomba dosificadora mecánica ajustable, marca recomendada: Grundfos DMX o similar, resistente a medios oxidantes.
- Línea de impulsión en PVC resistente al cloro, con válvula antirretorno y cabezal de inyección en un punto aguas abajo del canal de mezcla rápida.
- Sistema de control proporcional al caudal, para ajustar la dosis según la variación de ingreso, o dosificación fija en caso de caudal estable.

La precloración se concibe como una medida para cumplir con las exigencias normativas que limitan el nivel de coliformes en el agua que alimenta la planta, al tiempo que se busca un punto de dosificación que minimice la formación de subproductos de desinfección (SPD).

DESCRIPCIÓN OPERATIVA

En la operación de la propuesta, el agua cruda es conducida primeramente hacia el presedimentador encontrado en la toma de agua, donde es distribuida uniformemente en la zona de entrada. Durante su paso por la zona de sedimentación, las partículas suspendidas de mayor tamaño se separan y se acumulan en el fondo en la denominada zona de lodos.

Seguidamente el agua parcialmente clarificada ingresa a la planta mediante la aducción y pasa por la coagulación manual, para proceder al sistema de precloración, el sistema de precloración inyecta la solución de hipoclorito de sodio.

A continuación, el agua pre-clarificada y pre-desinfectada pasa a las demás unidades de tratamiento convencional de la Planta de Tabladita, que son: floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Este sistema integrado de pretratamiento optimiza la remoción inicial de turbiedad y coliformes, reduciendo la carga contaminante que ingresa a las unidades siguientes. Pero, si bien la precloración aborda el requisito de coliformes a la entrada, es importante señalar que su implementación en esta etapa temprana debe ser monitoreada constantemente para minimizar la formación de subproductos de desinfección derivados de la reacción del cloro con la materia orgánica residual.

Se monitorean parámetros como cloro libre residual, pH y tiempo de contacto para verificar la efectividad del proceso.

COSTOS

Cuadro II-42. Costos Alternativa III

Nº	Descripción	Cantidad	COSTO TOTAL (Bs)
1	Construcción de unidad de presedimentación	1	30.000
2	Sistema de dosificación y monitoreo de hipoclorito de calcio	1	110.000
TOTAL			140.000

Fuente: Elaboración propia basada en (*REVISTA PyC marzo-agosto 2024.pdf*, s. f.) y (Grundfos, 2024)

Nota: Los costos presentados en este cuadro corresponden a una estimación conceptual o preliminar para la etapa de prefactibilidad del presente estudio. Para una determinación de costos más exacta y vinculante, se requeriría la realización de estudios complementarios que incluyen: levantamiento topográfico detallado del cárcamo para el presedimentador, estudio geotécnico para su cimentación, análisis hidráulico para la inyección de precloración, especificaciones técnicas detalladas para el sistema de dosificación de hipoclorito y cotizaciones actualizadas de proveedores y mano de obra local. Estos valores deben ser considerados como una referencia para la comparación y selección de alternativas.

2.3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN MÁS APROPIADA DE ACUERDO A CRITERIOS APROPIADOS

2.3.1. Evaluación de alternativas propuestas

Para la evaluación de las alternativas se estableció la matriz de decisión establecida por la empresa Ignacio Gómez (IHM) como citó (Fiquitiva, 2017) donde se considera los criterios técnicos, económicos y ambientales.

- **Aspectos técnicos:** se refieren al cumplimiento de los requisitos tales como la calidad del efluente establecido por las autoridades ambientales (seguridad y cumplimiento de la normativa), y por las condiciones en las cuales opera la planta, facilidad de implementación tecnológica (complejidad de construcción),

factibilidad de ajustarse a los cambios en el tiempo (vida útil) y respaldo técnico local por fallas en el funcionamiento (disponibilidad de repuestos). A cada uno de estos parámetros se les asignó un peso ponderado de 7% para tener un 35% del total. (Fiquitiva, 2017)

- **Aspectos Económicos:** para alcanzar los objetivos técnicos anteriores, es necesario incurrir en gastos, cuando se optimice la planta con esta mejora en el tratamiento, estos costos pueden afectar en forma sustancial a los gastos de la planta, considerando que la empresa COSSALT no se encuentra bien económica desde ya años, además de considerar la situación del país, entre otros. De tal forma que se constituye en un limitante para el cumplimiento de los objetivos, y se les asignó un peso ponderado del **50%** del total. El puntaje se basó en los costos consolidados de las alternativas. (Fiquitiva, 2017)
- **Aspectos ambientales:** las plantas de tratamiento de agua potable tienen la capacidad de afectar el entorno ambiental, en una magnitud que es función de las características de este entorno, de la tecnología utilizada, y de la operación y mantenimiento de las mismas. Por lo tanto, se plantea como objetivos de carácter ambiental la mitigación de estos impactos. A las variables que tienen que ver con la generación de residuos y control de ruido se les asignó un peso ponderado del **15%**. (Fiquitiva, 2017)

El proceso de evaluación, dado por la empresa IHM según (Fiquitiva, 2017), se desarrolló de la siguiente manera:

1. Se divide cada uno de los aspectos en que se van a evaluar las alternativas (técnico, económico, ambiental) teniendo en cuenta sus variables. A cada una de estas variables y componentes se les asigna un puntaje en función de la importancia que tienen dentro de la evaluación. Estos pesos varían entre 0 y 100%.

2. Para cada alternativa se le asigna un puntaje a cada una de las variables, en función del grado de cumplimiento que se logra. Los puntajes varían entre 0 y 5, siendo la calificación cero: 0 No cumplimiento y cinco: 5, cumplimiento total.
3. Para cada alternativa hace la sumatoria de los puntajes de cada variable por su respectivo peso. Este valor, que fluctúa entre 0 y 500 corresponde a la calificación.

Cuadro II-43. Matriz I de decisión para alternativas propuestas

Aspectos	Parámetro evaluado	Peso %
Técnicos y operativos (35%)	Seguridad y cumplimiento de la normativa	7
	Vida útil (componentes)	7
	Complejidad de construcción y equipamiento	7
	Complejidad de operación del proceso	7
	Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	7
Económicos (50%)	Costo de inversión inicial	20
	Costo de operación y mantenimiento	30
Ambientales (15%)	Generación de residuos	10
	Generación de ruido	5
Total		100

Fuente: Elaborado a partir de (Fiquitiva,2017)

Cuadro II-44. Matriz II de decisión para alternativas propuestas

Factor	Descripción	Calificación
Aspectos técnicos y operativos		
Seguridad y cumplimiento de la normativa	Este aspecto se refiere a la capacidad de cada sistema de mantener una eficiencia constante ante variaciones ambientales del flujo, de tal manera que en todo momento se garantice uniformidad en el funcionamiento del sistema y cumplimiento de la normatividad nacional vigente.	0 No hay cumplimiento 1 Cumplimiento bajo 2 Bajo Cumplimiento 3 Cumplimiento moderado 4 Cumplimiento alto 5 Cumplimiento total
Vida útil	Este concepto responde a el interrogante sobre cuánto tiempo durará operando la alternativa de tratamiento. Generalmente la vida útil de una unidad de tratamiento está relacionada con la infraestructura (obra civil, accesorios, tuberías, tableros de control, entre otros). Se desea que la alternativa de tratamiento posea una vida útil lo más larga posible pues será difícil contar con recursos para renovar la unidad de tratamiento en mediano plazo.	0 No hay cumplimiento 1 Cumplimiento Menor de 5 años 2 Cumplimiento entre 5 y 10 años 3 Cumplimiento entre 10 y 15 años 4 Cumplimiento entre 15 y 20 años 5 Cumplimiento entre 20 años o más
Complejidad de construcción y equipamiento	Un tratamiento complejo generará un gran número de equipos, requiriendo un mayor tiempo para su construcción, instalación y puesta en marcha. Algunas veces se requerirá de la importación de materiales y equipos. Todos estos factores impactarán directamente y de manera negativa la inversión inicial requerida, e incidirán en costos.	0 Complejidad total de construcción 1 Complejidad muy alta de construcción 2 Complejidad alta de construcción

		3 Complejidad moderada de construcción
		4 Complejidad baja de construcción
		5 No hay complejidad de construcción
Complejidad de operación del proceso	Este aspecto en varias ocasiones ha sido el motivo de que una planta se abandone y deje de operar. Se debe establecer el grado de complejidad de los procesos durante su operación en condiciones normales y adversas. Debido a que de esta manera se establecerá el perfil y número del personal requerido para la operación de la planta. Si el sistema tiene equipos motrices requerirá de operarios y personal calificado para su control, así como requerimientos de mantenimiento mayores.	0 Complejidad total 1 Complejidad muy alta 2 Complejidad alta 3 Complejidad moderada 4 Complejidad baja 5 No hay complejidad
Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	Este aspecto tiene que ver con el mantenimiento preventivo y correctivo del equipo utilizado en la PTAP. Garantizando una buena disponibilidad de repuestos y centros de servicio cercanos para así agilizar el mantenimiento y abaratar su costo.	0 No hay disponibilidad 1 Muy baja la disponibilidad 2 Baja disponibilidad 3 Moderada disponibilidad 4 Alta disponibilidad 5 Disponibilidad Total
Aspectos económicos		
Costo de inversión inicial	Se consideran los costos de obra civil y adquisición de equipos necesarios para la construcción y puesta en marcha de la PTAP . Este ítem es importante al seleccionar la alternativa de tratamiento, pero a su vez debe estar relacionado con los costos de operación y mantenimiento, en un horizonte de largo plazo correspondiente con la vida útil de la	0 Mayor a 1.000.000 1 Entre 720.000 y 1.000.000 2 Entre 510.000 y 720.000 3 Entre 370.000 y 510.000 4 Entre 230.000 y 370.000

	planta de tratamiento. Se deberá favorecer la alternativa que, cumpliendo con una calidad de agua exigida, posea el más bajo costo de inversión.	5 Menor de 230.000
Costo de operación y mantenimiento	Este es uno de los aspectos más importante y con mayor ponderación para seleccionar la alternativa de tratamiento. Para que la inversión perdure en el tiempo, se mantenga operando y realice la función para lo que fue diseñado, se debe tener en cuenta este factor.	0 No genera costo de O&M 1 Muy alto costo de O&M 2 Alto costo de O&M 3 Moderado costo de O&M 4 Bajo costo de O&M 5 No hay costo de O&M
Aspectos Ambientales		
Generación de residuos	Uno de los aspectos más importantes a considerar en la selección de un sistema de tratamiento es la generación de residuos. La generación de residuos en la PTAP requerirá de la contratación de terceros para el traslado, tratamiento y/o disposición de estos, lo cual resultaría costoso, por lo anterior se ha decidido favorecer aquel proceso que genere la menor cantidad de residuos.	0 No hay cumplimiento 1 Cumplimiento bajo 2 Bajo cumplimiento 3 Cumplimiento Moderado 4 Cumplimiento Alto 5 Cumplimiento total
Generación de ruido	Este aspecto hace referencia a los sonidos poco agradables o incluso dañinos que alteran las condiciones del lugar y pueden generar molestias y/o afectaciones en la salud.	0 No hay cumplimiento 1 Cumplimiento bajo 2 Bajo cumplimiento 3 Cumplimiento Moderado 4 Cumplimiento Alto 5 Cumplimiento total

Fuente: Elaborado a partir de (Fiquitiva,2017)

Cuadro II-45. Descripción y calificación

Factor	Descripción Alternativas		
	I	II	III
	Aspectos Técnicos y Operativos		
Seguridad y cumplimiento de la normativa	<p>Esta alternativa mejora significativamente la calidad del agua cruda antes de los procesos convencionales, reduciendo así la carga hidráulica y contaminante. Al hacerlo, mejora la estabilidad del proceso general, contribuye al cumplimiento de los límites establecidos para parámetros como la turbiedad y optimiza la eficiencia de la desinfección final con cloro gas, permitiendo que actúe de manera más efectiva sobre los microorganismos y minimizando la formación de Subproductos de Desinfección (SPD) al reducir la materia orgánica precursora. Si bien no aborda la reducción de coliformes en el pretratamiento de forma directa y explícita, su impacto en la calidad del</p>	<p>Esta alternativa cumple con la remoción inicial de turbiedad y coliformes, reduciendo la carga contaminante que ingresa a las unidades siguientes y priorizando el cumplimiento de la normativa. Pero, pone en riesgo la formación de subproductos de desinfección, ya que la precloración temprana de una fuente superficial con alta materia orgánica y un comportamiento irregular, como lo es el Rio Guadalquivir conlleva un riesgo significativo y alto de formación de Subproductos de Desinfección (SPD).</p> <p>Esto requeriría un monitoreo constante y riguroso para asegurar que la calidad del agua final sea segura.</p>	<p>Esta alternativa cumple con la remoción inicial de turbiedad y coliformes, reduciendo la carga contaminante que ingresa a las unidades siguientes y priorizando el cumplimiento de la normativa. Pero, pone en riesgo la formación de subproductos de desinfección, ya que la precloración temprana de una fuente superficial con alta materia orgánica y un comportamiento irregular, como lo es el Rio Guadalquivir conlleva un riesgo significativo y alto de formación de Subproductos de Desinfección (SPD).</p> <p>Esto requeriría un monitoreo constante y riguroso para asegurar que la calidad del agua final sea segura.</p>

	agua bruta facilita y hace más eficiente la desinfección posterior, cumpliendo indirectamente y de forma más segura con la reducción microbiana general. Va más allá de la normativa al priorizar la calidad del agua final y la salud pública.		
	4pts	3pts	3pts
<i>Vida útil</i>	La infraestructura civil del presedimentador tiene una vida útil muy prolongada (varias décadas). La bomba dosificadora (Grundfos DMX) es un equipo robusto con una vida útil esperada de 10-15 años con un mantenimiento adecuado y disponibilidad de repuestos.	Un embalse bien diseñado y construido tiene una vida útil de décadas a siglos. Los equipos de precloración tienen vida útil similar a la Alt. I de 10-15 años con buen mantenimiento.	Similar a la Alternativa I para el presedimentador y a la Alternativa II para los equipos de dosificación de cloro.
	4pts	5pts	4pts
<i>Complejidad de</i>	La construcción de un presedimentador es una obra civil estándar, bien conocida en ingeniería hidráulica y en esta ocasión es más sencilla, ya que solo se debe adecuar a la construcción ya existente en el pretratamiento.	La construcción de un embalse es una obra de ingeniería civil mayor, requiriendo extensos estudios (geológicos, hidrológicos), diseño estructural complejo y gran movimiento de tierras.	La construcción de un presedimentador como se dijo para la Alternativa I, es una obra de complejidad baja en este caso. La instalación de un sistema de precloración implica una complejidad media, ya que debe ser todo un nuevo

<i>construcción y equipamiento</i>	La instalación de una bomba dosificadora es relativamente sencilla y no requiere equipos especializados de alta complejidad.	La instalación de los equipos de precloración es de complejidad media.	sistema para que funcione adecuadamente.
	4pts	1pts	3pts
<i>Complejidad de operación del proceso</i>	<p>Requiere la purga periódica de lodos del presedimentador, algo que actualmente se hace en la cámara, simplemente no había una zona específica de lodos que ahora si habrá.</p> <p>La dosificación semiautomática exige la realización y el ajuste basado en pruebas de jarras, lo que implica una capacitación del operador para interpretar los resultados y ajustar la bomba, pero es un proceso estándar y manejable en la PTAP, ya que actualmente los operadores conocen sobre el funcionamiento de la prueba de jarras.</p>	<p>La operación del embalse es relativamente pasiva una vez construido, pero el control de niveles, desazolve periódico y monitoreo de la calidad del agua es importante. Situación que requerirá más personal, ya que en la toma no hay un operador constante, solo un cuidador que va cuando se requiere.</p> <p>La precloración exige monitoreo continuo de cloro residual, pH y tiempo de contacto para optimizar dosis y, críticamente, para intentar minimizar la formación de SPD. Situación que requerirá más personal, ya que solo hay un operador en planta en los turnos y los tiempos le son justos para la dosificación de coagulantes, el</p>	<p>Con el presedimentador no habrá complejidad como se menciona en la Alternativa I.</p> <p>La precloración en cambio como menciona la Alternativa II, requerirá mayor personal por la necesidad de monitoreo continuo.</p>

		control del gas cloro, limpiezas, entre otros.	
	5pts	2pts	3pts
<i>Disponibilidad de repuestos y centros de servicio</i>	Las bombas Grundfos DMX son de una marca reconocida globalmente, con buena disponibilidad de repuestos y centros de servicio en Bolivia y la región. El sulfato de aluminio es un coagulante de uso universal en PTAP.	Los equipos de dosificación de hipoclorito de sodio son estándar y de fácil acceso. La construcción del embalse no requiere repuestos específicos, pero sí experiencia en construcción civil y mantenimiento de estructuras hidráulicas.	Similar a la Alternativa I para el presedimentador y a la Alternativa II para el sistema de dosificación de hipoclorito.
	5pts	5pts	5pts
Factor	Aspectos Económicos		
<i>Costo de inversión inicial</i>	Con un monto estimado de 65.000 Bs aproximadamente, es la opción más económica entre las propuestas, lo que la hace muy atractiva para la implementación, especialmente en el contexto de un proyecto de grado con viabilidad de aplicación.	Con un monto estimado de 10.060.000 Bs, representa una inversión inicial significativamente mayor, lo cual puede ser un impedimento considerable para la viabilidad del proyecto.	Con un monto estimado de 140.000 Bs, es mayor que la Alternativa I, pero significativamente menor que la Alternativa II, lo que la hace viable económicamente.
	5pts	0pts	5pts
	Considerando que ya existe limpieza de lodos en el cárcamo actual que será	Incluye el mantenimiento del embalse (limpieza, desazolve), la energía para bombas dosificadoras, el costo del	Similar a Alt. I para el presedimentador y a Alt. II para el sistema de

<i>Costo de operación y mantenimiento</i>	<p>usado para el presedimentador, este no requerirá costo adicional.</p> <p>Para el sistema semiautomático si existe costo de energía para la bomba dosificadora y el costo del sulfato de aluminio, que se verá optimizado y potencialmente reducido gracias a la mejora del pretratamiento, al igual que el de gas cloro según teoría. Además, que colaborara en gran medida a la limpieza diaria de las unidades.</p> <p>Es así que tomando en cuenta los aspectos mencionados, la alternativa en vez de aumentar costos de operación y mantenimiento, reducirá en gran medida los mismos, ofreciendo un gran aporte en la época.</p>	<p>hipoclorito de sodio. El monitoreo continuo de SPD y la potencial necesidad de tratamientos complementarios (si los SPD son un problema) implicarían costos adicionales de análisis y operación.</p>	<p>precloración, con los costos asociados a hipoclorito y monitoreo de SPD</p>		
	5pts	1pts	2pts		
Factor			Aspectos Ambientales		

<i>Generación de residuos</i>	Los lodos en el presedimentador que ya existían en realidad ahora se gestionaran más adecuadamente, porque existirá una zona de lodos adecuada al caso. Además, al optimizar la coagulación, se espera una reducción global en la cantidad de lodos generados en la planta, al disminuir el exceso de coagulante y la carga de sólidos que llega a las unidades posteriores.	Genera lodos por sedimentación natural en el embalse que deben ser gestionados periódicamente. Además, los lodos generados por la coagulación/floculación en la PTAP seguirán siendo un subproducto. El potencial de formación de SPD también puede considerarse un "residuo" indeseable en el agua tratada.	Sucede la misma situación con los lodos del presedimentador de la Alternativa I. Adicionalmente, el potencial de formación de SPD por la precloración aumenta los "residuos" indeseables en el agua final, a pesar de la remoción previa de algunos sólidos por el presedimentador, al igual que la Alternativa II.
	5pts	1pts	2pts
<i>Generación de ruido</i>	El ruido proviene principalmente de la bomba dosificadora, que es muy bajo y no representa un impacto significativo.	La bomba dosificadora genera muy bajo ruido. La fase de construcción del embalse sí generaría ruido temporal significativo y prolongado.	El ruido se limita a la bomba dosificadora, con bajo impacto.
	5pts	3pts	5pts

Fuente: Elaborado a partir de (Fiquitiva,2017)

2.3.2. Selección de alternativa

De acuerdo con los criterios analizados para las tres alternativas, se procederá a realizar la matriz de selección de la alternativa para obtener la Alternativa con mayor puntuación:

Cuadro II-46. Selección de alternativa

Aspectos	Factor a Evaluar	Peso %	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III
Técnicos y operativos (35%)	Seguridad y cumplimiento de la normativa	7	28	21	21
	Vida útil (componentes)	7	28	35	28
	Complejidad de construcción y equipamiento	7	28	7	21
	Complejidad de operación del proceso	7	35	14	21
	Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	7	35	35	35
Económicos (50%)	Costo de inversión inicial	2	100	0	100
	Costo de operación y mantenimiento	30	150	30	60
Ambientales (15%)	Generación de residuos	10	50	10	20
	Generación de ruido	5	25	15	25
Total		100%	479	167	331

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, aquella que obtuvo una mejor puntuación con base a la matriz de selección es la Alternativa I, la cual corresponde a la construcción de un presedimentador que se adecue al cárcamo actual de la toma de las Tipas e Implementar un sistema semiautomático para dosificación de coagulante, la cual tuvo un puntaje final de **479**.

2.4. DEFINICIÓN DE CONDICIONES Y CAPACIDAD

Una vez seleccionada la Alternativa I como la solución óptima para la PTAP de Tabladita, compuesta por la construcción de un presedimentador y la implementación de un sistema semiautomático de dosificación de coagulante, es fundamental definir las condiciones generales bajo las cuales operarán estas mejoras y la capacidad que se espera de ellas. Esta sección sienta las bases conceptuales para el diseño detallado que se abordará en el Capítulo III.

2.4.1. Presedimentador: Condiciones Generales de Operación y Capacidad Funcional

El presedimentador se concebirá como la unidad diseñada para recibir directamente el agua cruda del río durante la época seca, periodo caracterizado por su elevada y fluctuante carga de turbiedad y sólidos en suspensión.

- **Capacidad Funcional:** La unidad será dimensionada para procesar el caudal de diseño de la PTAP de 116 l/s, garantizando la remoción efectiva de partículas sedimentables y una atenuación significativa de los picos de turbiedad. Su capacidad se definirá por un tiempo de retención hidráulico (TRH) adecuado y una baja velocidad de sedimentación superficial (VSS), parámetros que se especificarán detalladamente en el capítulo de diseño para asegurar una eficiencia óptima en la remoción de sólidos gruesos y parte de la materia orgánica.
- **Condiciones Operativas Clave:** El diseño priorizará una entrada de agua que minimice la turbulencia y favorezca el flujo laminar. Se incluirá una zona de

lodos optimizada para su acumulación y posterior purga periódica, fundamental para mantener la eficiencia del proceso.

- **Impacto Esperado:** Se espera que la implementación del presedimentador logre una reducción sustancial en la turbiedad del agua a la entrada de las unidades convencionales, descargando significativamente los procesos posteriores de coagulación, floculación y sedimentación. Esto es crucial para estabilizar la calidad del agua bruta y mejorar el rendimiento global de la planta.

2.4.2. Sistema Semiautomático de Dosificación de Coagulante: Parámetros de Control y Adaptabilidad

La implementación de un sistema de dosificación semiautomático para el sulfato de aluminio está diseñada para proporcionar un control preciso y adaptativo de la dosis de coagulante, respondiendo eficazmente a la variabilidad de la calidad del agua efluente del presedimentador.

- **Capacidad de Dosificación:** El sistema se seleccionará para cubrir un rango de dosificación de sulfato de aluminio (mg/l) amplio y adaptable, permitiendo ajustar la cantidad de químico según las condiciones de turbiedad y materia orgánica presentes en el agua post-presedimentador. La bomba dosificadora será de precisión, garantizando la inyección controlada del coagulante.
- **Condiciones de Control (Semiautomático):** La operación se basará en la realización periódica y sistemática de pruebas de jarras (jar test) sobre el agua a la entrada de la coagulación. Este enfoque permitirá determinar la dosis óptima que maximiza la remoción de turbiedad y, fundamentalmente, de Materia Orgánica Natural (MON), la cual es precursora de Subproductos de Desinfección (SPD). Los ajustes en la dosificación se realizarán en función de estos resultados y del monitoreo continuo de parámetros clave como la turbiedad y el pH.
- **Adaptabilidad:** La naturaleza semiautomática del sistema confiere la flexibilidad necesaria para que los operadores realicen los ajustes requeridos

ante las fluctuaciones de la fuente, optimizando el uso de químicos y asegurando la máxima eficiencia del proceso de coagulación-flocculación.

2.4.3. Interacción Sinérgica y Beneficios Globales

La integración de estas dos mejoras generará una sinergia operativa que redundará en múltiples beneficios para la PTAP de Tabladita, especialmente en época seca:

- **Optimización del Proceso Convencional:** Al recibir agua con menor turbiedad y una carga más estable de contaminantes, los procesos subsiguientes (coagulación, flocculación, sedimentación, filtración y desinfección) operarán con mayor eficiencia, reduciendo el consumo excesivo de químicos y prolongando la vida útil de los filtros.
- **Reducción Sostenida de Subproductos de Desinfección (SPD):** El aspecto más crítico de esta optimización es la minimización de la formación de SPD. Al remover eficazmente la turbiedad y, de manera crucial, una porción significativa de la materia orgánica precursora en las primeras etapas, la desinfección final con cloro gas se realizará sobre un agua de mayor calidad y con menor potencial de generar compuestos indeseables. Este enfoque no solo cumple con la normativa, sino que la supera al priorizar la salud pública a largo plazo.
- **Mejora de la Calidad Final del Agua:** La combinación de un pretratamiento robusto y una coagulación optimizada garantizará que el agua que ingrese a la desinfección final sea de una calidad superior, permitiendo que el cloro actúe de manera más eficiente en la inactivación microbiana, asegurando un agua potable segura y de alta calidad para el consumo humano.

CAPÍTULO III

ESPECIFICACIÓN Y DISEÑO DE LA

PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN

3.1. DISEÑO DE LA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN

3.1.1. Diseño de presedimentador

Cabe mencionar que el diseño del presedimentador se adecuara al cárcamo actual de la toma de las Tipas como se mencionó previamente, buscando una solución más económica y aplicable.

3.1.1.1. Descripción

- Objetivo: El objetivo del presedimentador como tal es separar las partículas sólidas de un líquido según el reglamento técnico de diseño para plantas potabilizadoras de agua. En este caso específico, el diseño adecuado del presedimentador en el cárcamo, ayudara a que exista remoción sobre todo de los lodos que se suelen acumular y generar picos sobre todo en los últimos meses de la época seca
- Componentes Principales: Las partes de un sedimentador como tal y que más sobresalen al momento de cumplir los parámetros de diseño son:
 - Estructura de entrada
 - Cámara de lodos
 - Estructura de salida

3.1.1.2. Especificaciones Técnicas

Para poder considerarse un presedimentador, el reglamento técnico de diseño para plantas potabilizadoras de agua considera ciertos parámetros de diseño como los adecuados, los cuales se pueden ver a continuación en el Cuadro III-1 para el caso de este presedimentador.

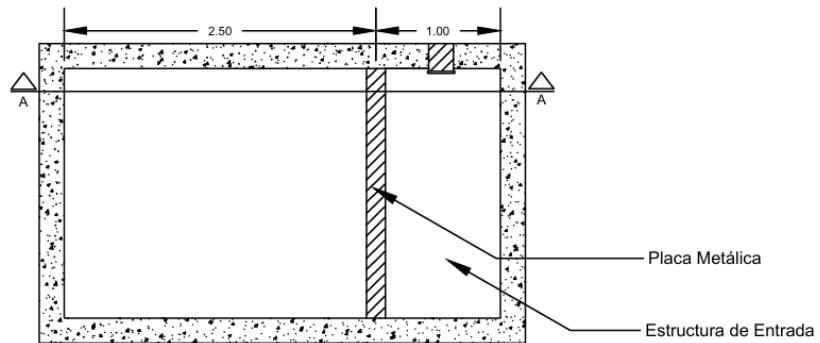
Cuadro III-1. Parámetros de diseño del presedimentador propuesto

Parametro	Simbologia	Formula	Unidades	Valor teorico	Valor experimental
Caudal	Q	—	m ³ /s	variable	0,120
Ancho	W	—	m	variable	2
Longitud	L	—	m	variable	3,500
Altura o profundidad	H	—	m	variable	6
Area superficial	As	As = W*L	m ²	variable	7
Velocidad de sedimentación	Vs	Vs = Vsc*f	m/s	≤ 0,021	0,021
Diametro particula	d	—	m	0,00001-0,0002	< 2E-04
Factor minorante	f	—	—	1,1 a 1,3	1,200
Velocidad de sedimentación critica	Vsc	$V_{sc} = \frac{Q}{B*L} = \frac{Q}{A_s} = q$	m/s	≤ 0,021/f	0,017
Densidad particula	ρ	—	kg/m ³	variable	2.650
Velocidad de escurrimiento horizontal	Vh	$V_h = \frac{Q}{B*H}$	m/s	< Va	0,010
Velocidad de resuspension o de arrastre de las particulas	Va	$V_a = \sqrt{40 * (\rho_s - \rho_w) * g * d / (3 * \rho_w)}$	m/s	> Vh	0,208

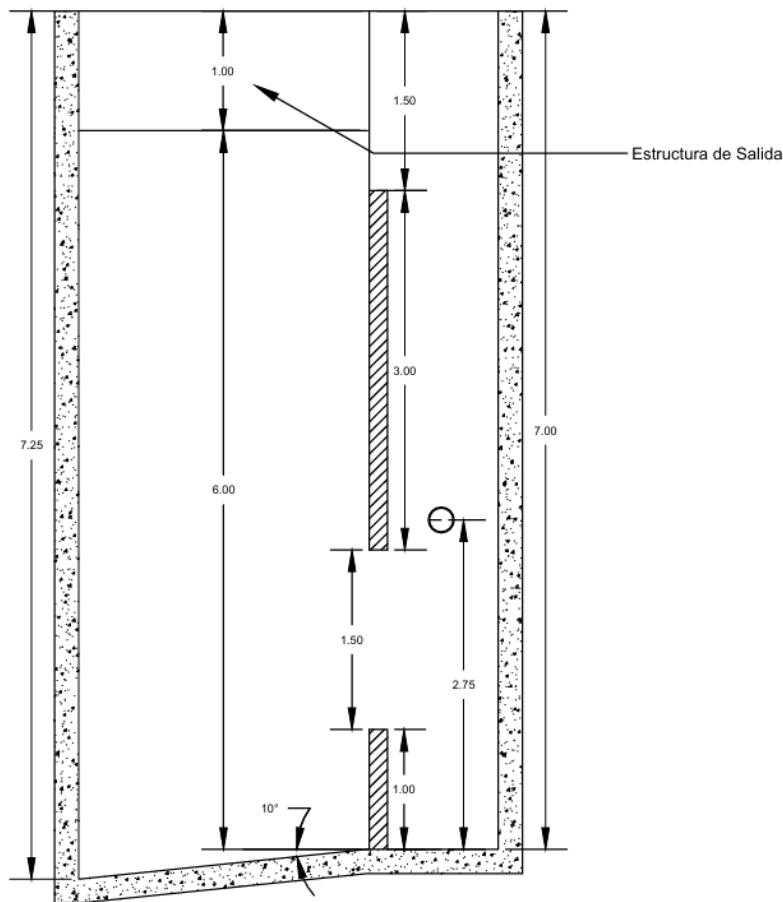
Fuente: Elaboración propia

A su vez se presenta el dibujo del diseño con sus dimensiones correspondientes:

Figura 3-1. Presedimentador



CORTE A - A



Fuente: Elaboración propia

3.1.1.3. Operación del sistema

- **Ubicación del sistema:** Como se mencionó previamente, el sistema se ubicará en el cárcamo actual, por eso se aadecua al mismo, que se puede ver en la siguiente imagen.

Figura 3-2. Ubicación presedimentador



Fuente: Elaboración propia

- **Procedimiento de operación:** El presedimentador funcionara como lo menciona su objetivo, gracias a sus parámetros de diseño y materiales, permitirá un tiempo de retención adecuado en el que ayudara a retener los lodos y evitar esos picos de turbiedad que se suelen generar en planta, sobre todo en las primeras lluvias.

3.1.1.4. Mantenimiento y Seguridad

Según el reglamento técnico de diseño para plantas potabilizadoras de agua, se recomienda no exceder el tiempo entre purga y purga de la cámara de lodos en una semana, así que se propone que en este caso el tiempo sea una semana, ya que actualmente se realiza casi cada mes, en el tiempo que suele funcionar la toma, y no es adecuado. Según el reglamento, tiempos mayores convierten los lodos en lodos anaerobios, deteriorando la calidad del agua que está en el proceso de tratamiento.

3.1.1.5. Beneficios

A continuación, se detallan algunos de los beneficios de tener un presedimentador en la toma:

1. Reducción de Cargas de Sólidos:

- **Disminución de Sedimentos:** El presedimentador permite la eliminación de una gran parte de los sólidos suspendidos y sedimentos antes de que el agua ingrese a la PTAP. Esto reduce la carga de trabajo en las etapas posteriores del tratamiento.
- **Menor Desgaste de Equipos:** Al reducir la cantidad de sólidos en el agua, se disminuye el desgaste y la abrasión en los equipos de tratamiento, prolongando su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento.

2. Optimización de Procesos de Tratamiento:

- **Eficiencia en la Coagulación y Floculación:** Con menos sólidos en el agua cruda, los procesos de coagulación y floculación pueden ser más eficientes, requiriendo menores dosis de productos químicos y mejorando la calidad del agua tratada.
- **Mejora en la Filtración:** La reducción de sólidos también facilita el trabajo de los filtros, disminuyendo la frecuencia de retrolavados y, por ende, el consumo de agua y energía.

3. Reducción de Costos Operativos:

- **Ahorro en Productos Químicos:** Al disminuir la cantidad de sólidos y materia orgánica en el agua cruda, se reduce la necesidad de productos químicos para el tratamiento, lo que se traduce en un ahorro significativo en costos operativos.
- **Menor Frecuencia de Limpieza:** Con menos sedimentos y sólidos en el sistema, las operaciones de limpieza y mantenimiento de la PTAP pueden realizarse con menor frecuencia, reduciendo los costos laborales y de insumos.

4. Mejora en la Calidad del Agua:

- **Reducción de Contaminantes:** El presedimentador ayuda a eliminar contaminantes físicos y algunos químicos, mejorando la calidad del agua desde el inicio del proceso de tratamiento.
- **Cumplimiento de Normativas:** Al mejorar la calidad del agua cruda, se facilita el cumplimiento de las normativas y estándares de calidad del agua potable, asegurando la protección de la salud pública.

En resumen, la incorporación de un presedimentador en la toma de agua cruda no solo optimiza los procesos de tratamiento y mejora la calidad del agua, sino que también contribuye significativamente a la reducción de costos operativos y de mantenimiento en la PTAP. Esta inversión inicial puede resultar en ahorros sustanciales a largo plazo y en una operación más eficiente y sostenible.

3.1.2. Propuesta de sistema semiautomático para dosificación de coagulante

Como se mencionó previo, el sistema para dosificación de coagulante actual, es manual y empírico, no se añade sulfato de manera exacta sino mediante la experiencia que tienen los operarios manejando los parámetros turbiedad de salida y tamaño de floculo. Por eso se propone una opción de sistema que se considera semiautomático según teoría como se ve a continuación:

3.1.2.1. Descripción del Sistema

- **Objetivo del Sistema:** Mejorar la precisión y eficiencia en la dosificación de sulfato de aluminio mediante el uso de una bomba dosificadora mecánica ajustable.

- **Componentes Principales:**

- Bomba dosificadora mecánica Grundfos DMX.

3.1.2.2. Especificaciones Técnicas

La Grundfos DMX posee diferentes variantes, por lo tanto, se procedió a dimensionar la del caso mediante la página de Grundfos y las herramientas accesibles que esta permite.

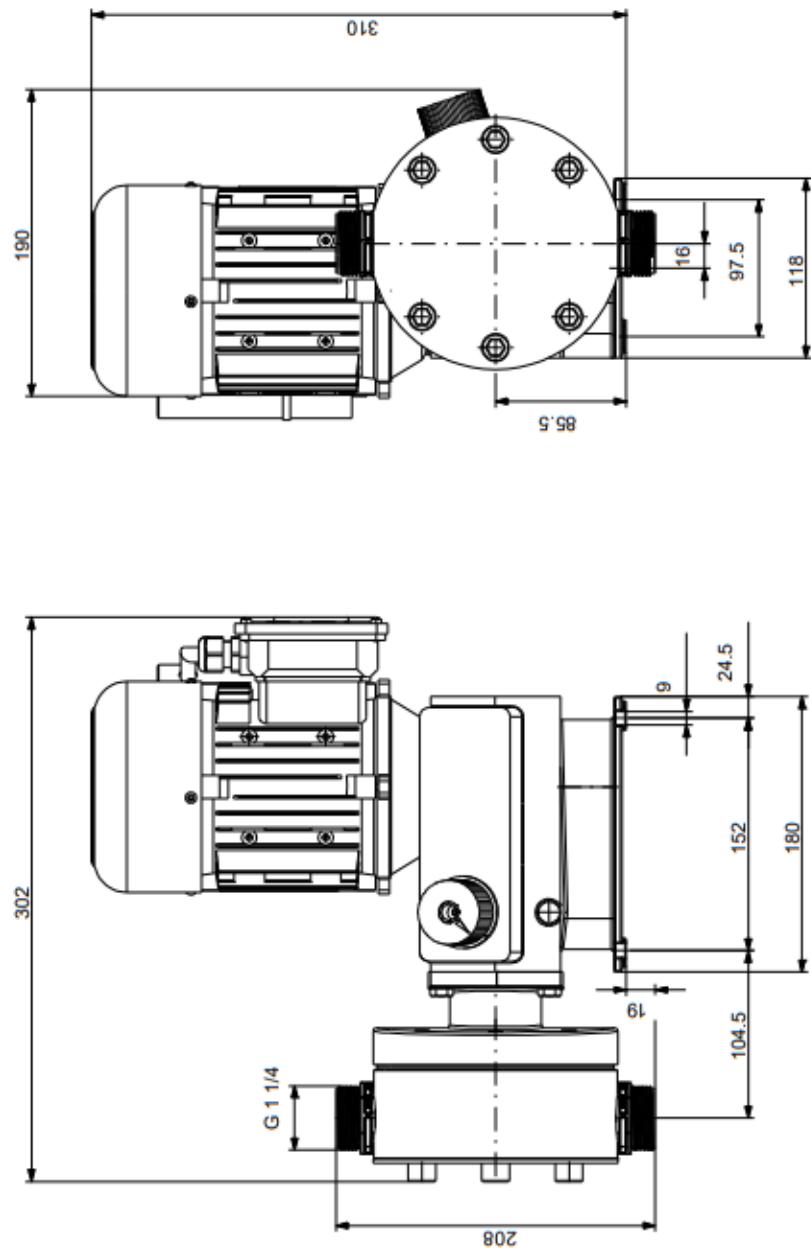
CUADRO III-2. Especificaciones Técnicas bomba Grundfos DMX

Bomba dosificadora mecánica Grundfos DMX	
	
Capacidad de Flujo:	380 l/h a 50 Hz
Presión Máxima:	3 bar
Rango de temperatura del líquido:	0 a 40 °C
Materiales:	
Cuerpo hidráulico:	Aluminio
Cabezal de dosificación:	Plástico
Altura de dosificación:	PVC
Bola de válvula:	Cerámica (Al ₂ O ₃)
Asiento de válvula:	PTFE (Politetrafluoroetileno)
Junta de estanqueidad de válvula:	FKM (Fluoroelastómero)
Funda de estanqueidad de válvula:	Goma

Fuente: (Grundfos,2024)

A su vez se presenta el dibujo del diseño con sus dimensiones correspondientes, según Grundfos:

Figura 3-3. Dibujo variante de Bomba Grundfos DMX propuesta



Nota: todas las unidades están en [mm] a menos que se indiquen otras. Exención de responsabilidad: este esquema simplificado no muestra todos los detalles.

Fuente: (Grundfos, 2024)

3.1.2.3. Operación del sistema

- **Ubicación del Sistema:** Primeramente, es bueno mencionar que dicho sistema se propone ponerlo en la posición en la que está uno de los actuales dosificadores manuales, es decir, la bomba se instalará en la línea de entrada de solución de coagulante actual, como se puede ver a continuación:

Figura 3-4. Ubicación de bomba dosificadora Grundfos DMX



Fuente: Elaboración propia

- **Procedimiento de operación:** La bomba operará mediante un ajuste manual, los operadores ajustarán manualmente las bombas dosificadoras según los datos correspondientes

3.1.2.4. Pruebas y Validación

- **Pruebas de Jarras:** Se debe realizar pruebas de jarras para diferentes tipos de turbiedades que se estén presentando por gestión, ya que el comportamiento del agua de las tipas tiene comportamientos muy variantes de gestión en gestión, las pruebas de jarras deben ser más regulares y aprovechar el equipo de prueba de jarras, no solo cuando existan casos irregulares, con estos datos se podrá elaborar una tabla estandarizada por año para la dosificación más adecuada con la bomba dosificadora.

Para realización de dicha tabla estandarizada se cuenta con los datos necesarios para poder hacer pruebas variando las dosificaciones actuales que se usan para diferentes turbiedades, solo se deben hacer variaciones de los mismos para llegar a una más exacta aprovechando el equipo de jarras con el que actualmente se cuenta, además de que el personal ya sabe usar el equipo de jarras, solo que por tema tiempos no lo hacen ya que al menos en época seca, dedican mucho tiempo a limpieza y mantenimiento de las unidades como se mencionó previamente, situación que cambiara con la propuesta de optimización.

3.1.2.5. Implementación del sistema

- **Pasos de Implementación:** Para implementar el sistema, se debe tener en cuenta las etapas necesarias para instalar y poner en marcha el mismo, los cuales se detallan en el ANEXO 3
- **Capacitación del Personal:** Se debe tener un plan de capacitación para los operadores del sistema, por ende, se propone uno y se puede ver en detalle en el ANEXO 3
- **Pruebas Iniciales:** Se debe establecer procedimientos para realizar pruebas iniciales y calibrar el sistema ya que estos no solo ayudan a evitar errores operativos, sino que también prolongan la vida útil de la bomba y aseguran su eficiencia, por ende, se proporciona una guía para estos procedimientos en el ANEXO 3

3.1.2.7. Mantenimiento y Seguridad

- **Plan de Mantenimiento:** Se debe tener un plan de mantenimiento regular para las bombas, esto con el objetivo de asegurar que las bombas Grundfos DMX operen de manera eficiente, segura y dentro de los parámetros de diseño, minimizando los tiempos de inactividad y costos asociados a reparaciones imprevistas, por ende, se propone el mismo en el ANEXO 4

- **Medidas de Seguridad:** Se debe aplicar las medidas de seguridad para el manejo de químicos, en este caso sulfato de aluminio, y para la operación del sistema, por ende, se las describe en el ANEXO 4

3.1.2.8. Beneficios

A continuación, se detallan algunos de estos beneficios:

1. Precisión y Consistencia en la Dosificación:

- **Dosificación Precisa:** Un sistema semiautomático permite una dosificación más precisa del coagulante, asegurando que se utilice la cantidad exacta necesaria para el tratamiento, lo que mejora la eficiencia del proceso.
- **Consistencia en el Tratamiento:** La automatización parcial garantiza que la dosificación sea constante y uniforme, reduciendo las variaciones en la calidad del agua tratada.

2. Reducción de Errores Humanos:

- **Minimización de Errores:** Al reducir la dependencia de la intervención manual, se disminuye la probabilidad de errores humanos en la dosificación, lo que puede llevar a una mejor calidad del agua y a un uso más eficiente de los productos químicos.
- **Seguridad Operativa:** Un sistema semiautomático puede incluir alarmas y controles que alertan sobre cualquier anomalía en el proceso de dosificación, mejorando la seguridad operativa.

3. Optimización de Recursos y Costos:

- **Ahorro en Productos Químicos:** La dosificación precisa y controlada reduce el desperdicio de coagulante, lo que se traduce en un ahorro significativo en costos de productos químicos.
- **Reducción de Costos Laborales:** Al automatizar parcialmente el proceso, se reduce la necesidad de supervisión constante y de intervención manual, lo que

puede disminuir los costos laborales y liberar al personal para otras tareas importantes.

4. Mejora en la Eficiencia del Proceso:

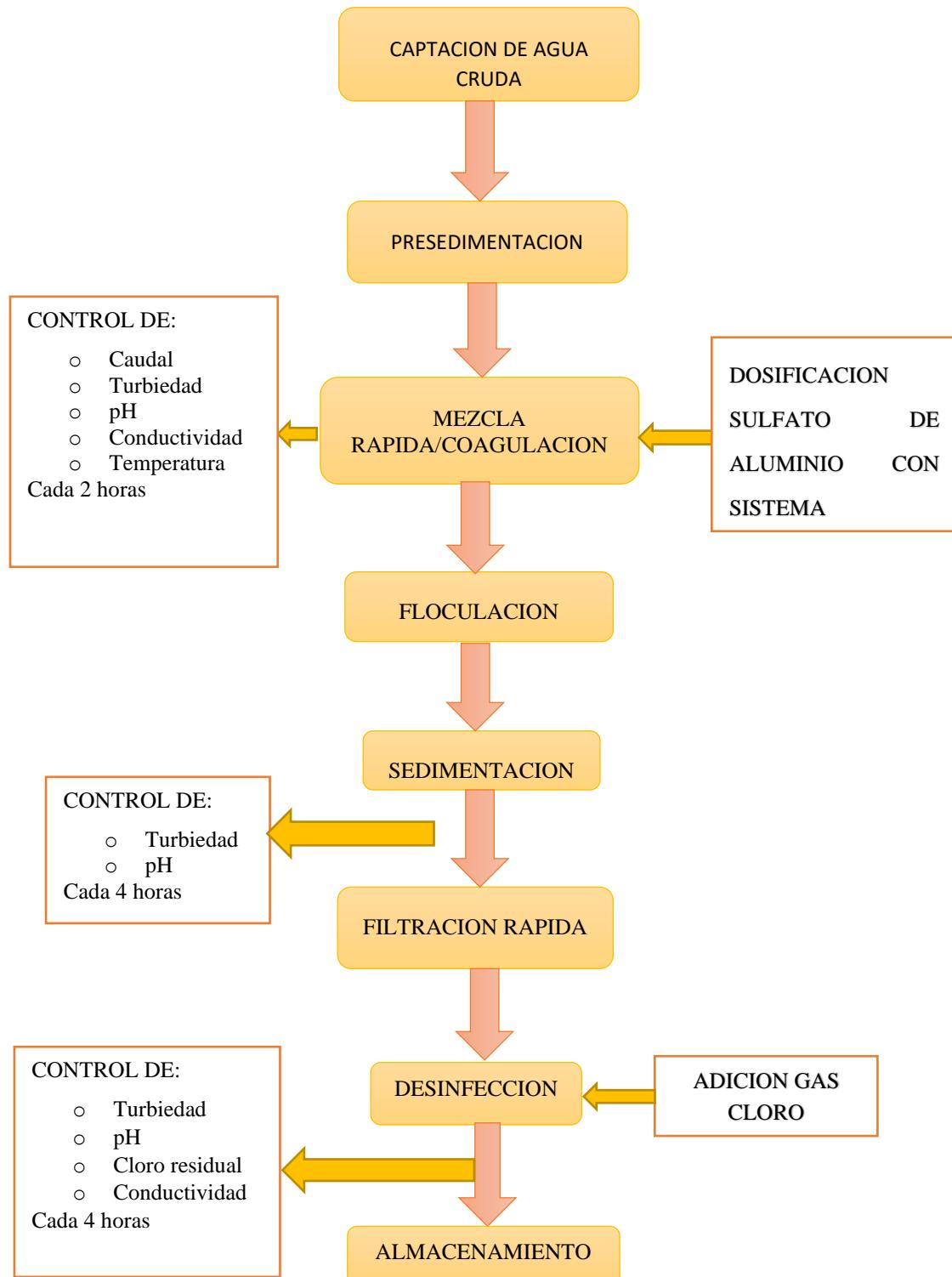
- **Eficiencia Operativa:** Un sistema semiautomático puede ajustar automáticamente la dosificación en respuesta a cambios en la calidad del agua cruda, optimizando el proceso de coagulación y mejorando la eficiencia general del tratamiento.
- **Mantenimiento Simplificado:** Estos sistemas suelen ser más fáciles de mantener y calibrar que los sistemas manuales, lo que puede reducir el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento.

5. Cumplimiento de Normativas y Estándares:

- **Mejora en la Calidad del Agua:** La dosificación precisa y consistente ayuda a cumplir con las normativas y estándares de calidad del agua potable, asegurando la protección de la salud pública.
- **Documentación y Trazabilidad:** Los sistemas semiautomáticos suelen incluir funciones de registro y monitoreo que facilitan la documentación y trazabilidad del proceso de dosificación, lo que es útil para auditorías y cumplimiento regulatorio.

En resumen, la implementación de un sistema semiautomático de dosificación de coagulante en una planta de tratamiento de agua no solo mejora la precisión y consistencia del proceso, sino que también contribuye a la reducción de costos operativos y laborales, optimiza el uso de recursos y asegura el cumplimiento de normativas de calidad del agua. Esta inversión puede resultar en una operación más eficiente, segura y sostenible a largo plazo.

3.2. DIAGRAMA DE FLUJO INCLUYENDO LA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN



Fuente: Elaboración propia

3.3. BALANCE DE MATERIA

En el presente trabajo se consideró un balance de materia para procesos no reactivos. Un sistema se considera abierto cuando se transfiere materia por la frontera del sistema; es decir, que entra materia del entorno al sistema o sale materia del sistema hacia el entorno o las dos cosas.

Un balance de materia es simplemente la aplicación de la Ley de conservación de la masa: “La materia no se crea ni se destruye, se transforma”.

En el proyecto se considerarán las pérdidas de agua por evaporación al ambiente, obviando las pérdidas por fugas o filtración.

Existen diversas fórmulas para el cálculo de la cantidad de agua evaporada en función de los factores tales como una elevada velocidad de aire sobre la lámina de agua favorecerán el fenómeno de la evaporación. La velocidad del aire es también otro punto a tener en cuenta.

A continuación, se exponen dos de las posibles fórmulas, una de ellas es la más usada (fórmula de Bernier), también elegida para este proyecto y la segunda (fórmula de Carreras) que es una de las más completas.

- La fórmula de Bernier, contempla la suma de dos términos: piscina sin agitación (coeficiente 16) y con agitación (coeficiente 133n)

$$Me = S [(16 + 133n) * We - (Ga * Was)]$$

Donde:

Me	Masa de agua evaporada, en Kg/h
S	Superficie de piscina, en m ²
We	Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura del agua, en Kgag/Kga
Was	Humedad del aire saturado a la temperatura del

aire, en Kgag/Kga

G Es el grado de saturación, en porcentaje.

En este caso se considera una piscina sin agitación, por lo que el coeficiente 133n será igual a cero.

3.3.1. Cálculos para realizar el balance de agua

Aplicando la fórmula de Bernier:

$$Me = S [16 * We - (Ga * Was)]$$

Se tienen las siguientes consideraciones y datos:

- La temperatura del agua en las piscinas es igual a la temperatura media del ambiente en Cercado, de 20°C.
- Grado de saturación en el ambiente de Cercado, 50% = 0,500.

De la carta psicométrica para la ciudad de Tarija:

- Para una temperatura media de 20°C, la humedad absoluta del aire saturado a la temperatura del agua es 0,019 Kgag/Kga.
- Humedad del aire saturado a la temperatura del aire, en Kgag/Kga.

3.3.2. Cálculos para realizar el Balance de sólidos en suspensión

- Para el balance se considera el agua que entra con mayor cantidad de sólidos en suspensión (1.500 NTU = 500 mg/l), según los resultados de los parámetros diarios en los meses de época seca del 2023 en la PTAP, a su vez considerando solo los picos regulares, no los irregulares que se deben a acumulación de sólidos debido a ausencia de pretratamiento como se mencionó previamente.
- Se ha considerado un porcentaje de remoción de sólidos para cada unidad en base a sus especificaciones de diseño, siendo las mismas: 60% para el presedimentador, 80% para la mezcla rápida/coagulación, 30% para los floculadores, 90% para los sedimentadores, y 90% para los filtros.

- A la corriente de entrada a la mezcla rápida se suma la cantidad de coagulante añadido, considerándolo como parte de los sólidos y a la corriente de entrada a la desinfección se suma la solución de gas cloro.

3.3.3. Balances para cada unidad de la PTAP

3.3.3.1. Balance para el Presedimentador

- **Balance de Agua**

Caudal de entrada: 160 l/s → Corriente 1

Superficie: 7m²

Humedad relativa: 50%

Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura del agua: 0,019 Kgag/Kga.

Humedad del aire saturado a la temperatura del aire: 0,019 Kgag/Kga.

Aplicando la Fórmula de Bernier:

$$Me = 7m^2 * [16 * 0,019Kgag/Kga. - (0,500 * 0,019Kgag/Kga.)] * (1.000/998,290 * 3.600)$$

$$Me = 2,960 * 10^{-4} \text{ l/s}$$

Caudal de Salida: $(160 - 2,960 * 10^{-4} \text{ l/s}) \text{ l/s} = 160 \text{ l/s} \rightarrow$ Corriente 3

- **Balance de sólidos**

Se ha considerado una turbiedad inicial de 1.500 NTU equivalente a 500 mg/l en la Corriente 1, entonces:

$$500 \text{ mg/l} * 160 \text{ l/s} = 80.000 \text{ mg/s} \rightarrow \text{Cantidad de sólidos que ingresan en 160 litros}$$

Se ha considerado una remoción del 60% de sólidos para el presedimentador, entonces:

$$80.000 \text{ mg/s} * (0,600) = 48.000 \text{ mg/s}$$

$$\text{Entonces, tendremos } 80.000 \text{ mg/s} - 48.000 \text{ mg/s} = 32.000 \text{ mg/s} \rightarrow \text{Corriente 3}$$

3.3.3.2. Balance para la Mezcla rápida/Coagulación

➤ **Balance de Agua**

Caudal de entrada: 160 l/s → Corriente 3

Superficie: 1,680m²

Humedad relativa: 50%

Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura del agua: 0,019 Kgag/Kga.

Humedad del aire saturado a la temperatura del aire: 0,019 Kgag/Kga.

Aplicando la Fórmula de Bernier:

$$Me = 1,680 \text{ m}^2 * [16 * 0,019 \text{ Kgag/Kga} - (0,500 * 0,019 \text{ Kgag/Kga})] * (1.000 / 998,290 * 3.600)$$

$$Me = 7,11 * 10^{-5} \text{ l/s}$$

Caudal de Salida: $(160 - 7,11 * 10^{-5}) \text{ l/s} = 160 \text{ l/s} \rightarrow$ Corriente 5

➤ **Balance de sólidos**

Entrada de sólidos = 32.000 mg/s → Corriente 3

En esta unidad se ha considerado una remoción de sólidos del 80%, entonces:

$$32.000 \text{ mg/s} * (0,800) = 25.600 \text{ mg/s}$$

Entonces, tendremos $32.000 \text{ mg/s} - 25.600 \text{ mg/s} = 6.400 \text{ mg/s} \rightarrow$ Corriente 5

Además, habrá un ingreso de solución de sulfato de aluminio que se espera reaccione para eliminar los sólidos, y según las pruebas hechas en el presente proyecto y la reducción gracias al sistema semiautomático, esta solución será de aproximadamente **40 mg/l**.

3.3.3.3. Balance para los Floculadores

➤ **Balance de Agua**

Caudal de entrada: 160 l/s → Corriente 5

Superficie: 129,150m²

Humedad relativa: 50%

Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura del agua: 0,019 Kgag/Kga.

Humedad del aire saturado a la temperatura del aire: 0,019 Kgag/Kga.

Aplicando la Fórmula de Bernier:

$$Me = 129,150 \text{ m}^2 * [16 * 0,019 \text{ Kgag/Kga} - (0,500 * 0,019 \text{ Kgag/Kga})] * (1.000 / 998,290 * 3.600)$$

$$Me = \mathbf{0,005 \text{ l/s}}$$

Caudal de Salida: $(160 - 0,005) \text{ l/s} = \mathbf{159,995 \text{ l/s}} \rightarrow$ Corriente 7

➤ **Balance de sólidos**

Entrada de sólidos = 6.400 mg/s → Corriente 5

En esta unidad se ha considerado una remoción de sólidos del 30%, entonces:

$$6.400 \text{ mg/s} * (0,300) = 1.920 \text{ mg/s}$$

Entonces, tendremos $6.400 \text{ mg/s} - 1.920 \text{ mg/s} = \mathbf{4.480 \text{ mg/s}} \rightarrow$ Corriente 7

3.3.3.4. Balance para los sedimentadores

➤ **Balance de Agua**

Caudal de entrada: 159,995 l/s → Corriente 7

Superficie: 35,330 m²

Humedad relativa: 50%

Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura del agua: 0,019 Kgag/Kga.

Humedad del aire saturado a la temperatura del aire: 0,019 Kgag/Kga.

Aplicando la Fórmula de Bernier:

$$Me = 35,330 \text{ m}^2 * [16 * 0,019 \text{ Kgag/Kga} - (0,500 * 0,019 \text{ Kgag/Kga})] * (1.000 / 998,290 * 3.600)$$

$$Me = \mathbf{1,49 * 10^{-3} \text{ l/s}}$$

Caudal de Salida: $(159,995 - 1,49 * 10^{-3}) \text{ l/s} = \mathbf{159,993 \text{ l/s}} \rightarrow$ Corriente 9

➤ **Balance de sólidos**

Entrada de sólidos = 4.480 mg/s → Corriente 7

En esta unidad se ha considerado una remoción de sólidos del 90%, entonces:

$$4.480 \text{ mg/s} * (0,900) = 4.032 \text{ mg/s}$$

Entonces, tendremos $4.480 \text{ mg/s} - 4.032 \text{ mg/s} = \mathbf{448 \text{ mg/s}}$ → Corriente 9

3.3.3.5. Balance para los filtros rápidos

➤ Balance de Agua

Caudal de entrada: 159,993 l/s → Corriente 9

Superficie: 12,340m²

Humedad relativa: 50%

Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura del agua: 0,019 Kgag/Kga.

Humedad del aire saturado a la temperatura del aire: 0,019 Kgag/Kga.

Aplicando la Fórmula de Bernier:

$$Me = 12,340 \text{ m}^2 * [16 * 0,019 \text{ Kgag/Kga} - (0,500 * 0,019 \text{ Kgag/Kga})] * (1.000 / 998,290 * 3.600)$$

$$Me = \mathbf{5,22 * 10^{-4} \text{ l/s}}$$

Caudal de Salida: $(159,993 - 5,22 * 10^{-4}) \text{ l/s} = \mathbf{159,993 \text{ l/s}}$ → Corriente 11

➤ Balance de sólidos

Entrada de sólidos = 448 mg/s → Corriente 9

En esta unidad se ha considerado una remoción de sólidos del 90%, entonces:

$$448 \text{ mg/s} * (0,900) = 403,200 \text{ mg/s}$$

Entonces, tendremos $448 \text{ mg/s} - 403,200 \text{ mg/s} = \mathbf{44,800 \text{ mg/s}}$ → Corriente 11

3.3.3.6. Balance para la Desinfección

La dosificación de la cloración corresponde a la Corriente 12 = 240 mg/l de gas cloro.

Por tanto, en la salida de la cloración se tiene:

Corriente 13 → 159,993 l/s de agua + 44,800 mg/s de sólidos + 240 mg/l de gas cloro

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS ECONÓMICO

Para todo proyecto de optimización este capítulo es indispensable y clave, ya que de la parte económica depende si el proyecto es aplicable o no, por ende, procedo a desarrollar el mismo, tomando en cuenta solamente un análisis económico de la época seca como debe ser en el caso. Además, de acuerdo al análisis, se presenta el costo de la optimización con capacidad de oferta hasta el año 2035, es decir este análisis se enfoca en 10 años.

4.1. CÁLCULO DE COSTO DE CAPITAL

En este punto se mostrará los costos de la propuesta de optimización, en este caso dos cuadros, en los que se podrá ver primero los costos de construcción de la unidad de Presedimentación y después los costos de instalación del sistema semiautomático de dosificación de coagulante.

Los precios unitarios de los costos que se mostrarán a continuación se encuentran en bolivianos, y pueden convertirse a dólares americanos utilizando el tipo de cambio oficial de 6,96 Bs. Por cada 1,00 \$us.

Cuadro IV-1. Costos de construcción de la Unidad de Presedimentación

Nº	Descripción	Und.	Cantidad	Precio Unitario	Parcial (Bs.)
1	Demolición de H° Simple	m ³	1,050	172,250	180,860
2	Replanteo	m ²	7	3,7200	26,040
3	Carpeta de H° simple para canales	m ³	0,370	403,350	149,240

4	Muro de H°A° para tanque	m ³	4,900	2.946,630	14.438,490
5	Pantalla difusora de plancha metálica	m ²	8,400	1.125	9.450
TOTAL					24.244,630

Fuente: Elaboración propia a partir de (*REVISTA PyC marzo-agosto 2024.pdf*, s. f.)

Cuadro IV-2. Costos de Instalar el sistema semiautomático

N°	Descripción	Und.	Cantidad	Precio Unitario	Parcial (Bs.)
1	Costo del equipo	Bs	1	13.920	13.920
2	Costos de instalación	Bs	1	6.960	6.960
3	Capacitacion del personal			3.828	3.828
TOTAL					24.708

Fuente: Elaboración propia a partir de (Grundfos, 2024)

Como se puede observar los dos costos son 24.244,63 Bs y 24.708 Bs, siendo un costo total de inversión de 48.952,629 Bs.

4.2. COSTO DE OPERACIÓN

Para este punto se realizó dos costos, los actuales de Operación y Mantenimiento y los estimados para la propuesta de optimización, que a manera de comparación nos ayudan a profundizar el análisis

Cuadro IV-3. Costos Actuales de Operación y Mantenimiento de la PTAP en época seca

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Parcial (Bs)
Costo total de insumos				549948,36
Hipoclorito de Calcio Solido	Kgs	60	26,500	1.590
Hipoclorito de Calcio Liquido	Lts	600	3	1.800
Sulfato de Aluminio	Kgs	20700	4,400	91.080
Gas Cloro	Kgs	2448	36	88.128
Cal (Hidróxido de Calcio)	Kgs	900	1,900	1.710
Consumo de Energía Eléctrica	Kwh	7518	1,220	9.171,960
Consumo de Energía Eléctrica -Tipas	Kwh	429480	0,830	356.468,400
Costo total de sueldos				303.768
TOTAL				853.716,360

Fuente: Elaboración propia a partir de P.T.A.P. Tabladita

Cuadro IV-4. Costos estimados de O y M de la PTAP con las soluciones propuestas

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Parcial (Bs)
Costo total de insumos				478.472,760
Hipoclorito de Calcio Solido	Kgs	60	26,500	1590
Hipoclorito de Calcio Liquido	Lts	600	3	1.800
Sulfato de Aluminio	Kgs	8.280	4,400	36432
Gas Cloro	Kgs	1.958,400	36	70.502,400
Consumo de Energía Eléctrica	Kwh	7.518	1,220	9.171,960
Consumo de Energía Eléctrica - Tipas	Kwh	429.480	0,830	356.468,400

Mantenimiento regular del sistema (época seca)	Bs	1	1.04	1.044
Consumo de energía eléctrica(mensual)	Kwh	1200	1,220	1.464
Costo total de sueldos				303.768
TOTAL				782.240,760

Fuente: Elaboración propia a partir de P.T.A.P. Tabladita

Como se puede observar, los costos Operación y Mantenimiento de la propuesta son menores que los actuales, es decir, la propuesta ayudara a reducir tanto reactivos, como ciertos mantenimientos específicos.

4.3. OPTIMIZACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

La implementación de un presedimentador y un sistema semiautomático de dosificación de coagulante en una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) representa una mejora significativa en la eficiencia técnica y económica del proceso de tratamiento de agua. Estas mejoras no solo optimizan el rendimiento operativo, sino que también generan importantes ahorros económicos a largo plazo.

Optimización Técnica

1. Mejora en la Calidad del Agua Cruda:

- **Presedimentador:** Al eliminar una gran cantidad de sólidos suspendidos y sedimentos antes de que el agua ingrese a la PTAP, se reduce la carga de trabajo en las etapas posteriores del tratamiento. Esto mejora la eficiencia de los procesos de coagulación, floculación y filtración, resultando en una mayor calidad del agua tratada.

2. Dosificación Precisa y Consistente:

- **Sistema Semiautomático de Dosificación de Coagulante:** Este sistema permite una dosificación más precisa y uniforme del coagulante, optimizando el proceso de coagulación y reduciendo la variabilidad en la calidad del agua

tratada. La automatización parcial asegura que se utilice la cantidad exacta de coagulante necesario, mejorando la eficiencia del tratamiento.

Beneficios Económicos

1. Reducción de Costos Operativos:

- **Ahorro en Productos Químicos:** La dosificación precisa y controlada del coagulante reduce el desperdicio de productos químicos, lo que se traduce en un ahorro significativo en costos operativos. Menos coagulante desperdiciado significa menores gastos recurrentes.
- **Menor Consumo de Energía:** La optimización de los procesos de coagulación y floculación reduce la necesidad de retrolavados frecuentes en los filtros, disminuyendo el consumo de agua y energía.

2. Disminución de Costos de Mantenimiento:

- **Menor Desgaste de Equipos:** Al reducir la cantidad de sólidos y sedimentos en el agua cruda, se disminuye el desgaste y la abrasión en los equipos de tratamiento, prolongando su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento y reemplazo de equipos.
- **Mantenimiento Simplificado:** Los sistemas semiautomáticos suelen ser más fáciles de mantener y calibrar que los sistemas manuales, lo que puede reducir el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento.

3. Optimización de Recursos Humanos:

- **Reducción de Costos Laborales:** La automatización parcial del proceso de dosificación reduce la necesidad de supervisión constante y de intervención manual, lo que puede disminuir los costos laborales y liberar al personal para otras tareas importantes.

4. Ahorro en el Uso de Cloro:

- **Reducción de la Demanda de Cloro:** Con una menor cantidad de sólidos y materia orgánica en el agua tratada, la demanda de cloro para la desinfección se reduce. Esto no solo disminuye los costos de compra de cloro, sino que también reduce la formación de subproductos de desinfección, mejorando la seguridad y calidad del agua.

4.4. ANALISIS DE RENTABILIDAD

Con lo mencionado previamente en los puntos pasados, procedemos a hacer el análisis correspondiente, primeramente, mostrando un resumen de los datos a ser usados para los posteriores cálculos, como lo es el costo total de inversión inicial y el costo total de operación y mantenimiento de la propuesta.

Cuadro IV-5. Costo total de inversión inicial

Costos	Monto Bs/época
Costos de construcción de la Unidad de Presedimentación	24.244,629
Costos de instalar el sistema	24.708
TOTAL	48.952,629

Fuente: Elaboración propia

A su vez, los costos de operación y mantenimiento son en su totalidad 782.240,76 Bs.

4.4.1. VALOR ANUAL EQUIVALENTE

El valor anual equivalente (VAE) provee una base para medir el valor de una inversión determinada por pagos iguales en la base de un año.

$$minVAE = \left(\frac{\left| \sum_{t=0}^K \frac{I_t}{(1+r)^t} \right| + \left| \sum_{t=K}^n \frac{COYM}{(1+r)^t} \right|}{\sum_{t=K}^n \frac{Variable\ de\ Eficacia}{(1+r)^t}} \right) * \frac{(1+r)^n * r}{(1+r)^n - 1}$$

Donde:

VAE Valor Anual Equivalente

It Inversión inicial, en Bs.

COYM	Costos de operación y mantenimiento, en Bs.
r	Tasa de descuento
Variable de eficacia	En este caso se considera el caudal en m ³ /época en el período de diseño de 10 años.

El indicador de eficacia se puede exponer en términos de m³ manejados en el proyecto.

Con r = 5% en el período de 10 años:

Cuadro IV-6. Inversión inicial y costos por época anuales de operación y mantenimiento

TIPO $\left[\sum_{t=0}^K \frac{I_t}{(1+r)^t} \right] + \left[\sum_{t=K}^n \frac{COYM}{(1+r)^t} \right]$	Año	Costos (Bs.)
INVERSION	0	48.952,629
COSTOS DE OyM	1	782.240,760
COSTOS DE OyM	2	744.991,200
COSTOS DE OyM	3	709.515,429
COSTOS DE OyM	4	675.728,980
COSTOS DE OyM	5	643.551,409
COSTOS DE OyM	6	612.906,104
COSTOS DE OyM	7	583.720,099
COSTOS DE OyM	8	555.923,904
COSTOS DE OyM	9	529.451,337
COSTOS DE OyM	10	504.239,369
Caudales época (m³/época)	Variable de Eficacia (1+r)^t	
3.930.456,96	3.930.456,960	
3.930.456,96	3.743.292,343	
3.930.456,96	3.565.040,327	
3.930.456,96	3.395.276,501	
3.930.456,96	3.233.596,668	
3.930.456,96	3.079.615,874	
3.930.456,96	2.932.967,499	
	Total	6.391.221,220

3.930.456,96	2.793.302,380		
3.930.456,96	2.660.287,981		
3.930.456,96	2.533.607,601		
3.930.456,96	2.412.959,620		
Sumatoria Variable de Eficiencia	34.280.403,760		
Sumatoria Inversión + OyM			

Fuente: Elaboración propia

Cuadro IV-7. Variable de eficacia

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en la ecuación:

$$\min VAE = \frac{6.391.221,219}{34.280.403,760} * \frac{0,081}{0,629} = 0,024$$

$$\min VAE = 0,024 \text{ Bs/m}^3$$

$$\text{Tarifa en \%} = \frac{0,024 \text{ Bs/m}^3}{0,220 \text{ Bs/m}^3}$$

$$\text{Tarifa en \%} = 0,110 \%$$

Esto significa que el costo actual de producción en la P.T.A.P. deberá incrementar en un 0,11% por efecto de las inversiones y costos de operación y mantenimiento del nuevo proyecto.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- ✓ El diagnóstico de la PTAP identificó las falencias técnicas y operativas objeto de optimización, de las cuales se pudo observar una causa común, la cual es la irregularidad de la fuente de abastecimiento “Las Tipas” en cuanto a su calidad, siendo los aspectos específicos a mejorar: Regulación de turbiedad, Reducción de coliformes totales y fecales y Homogeneización del agua.
- ✓ La causa común permitió examinar alternativas de optimización más integradas y que solucionen de manera más adecuada las falencias ubicadas, además, gracias a los aspectos específicos a mejorar en la fuente, se pudo proponer alternativas más específicas y factibles según normativa nacional.
- ✓ Se estableció una propuesta de optimización que implica la implementación de un presedimentador y un sistema semiautomático de dosificación de coagulante.
- ✓ La propuesta de optimización contribuye a una operación más sostenible de la planta, ya que, habrá un ahorro considerable en los gastos de operación y mantenimiento. Además, la combinación de un pretratamiento robusto y una coagulación optimizada garantizará que el agua que ingrese a la desinfección final sea de una calidad superior, permitiendo que el gas cloro actúe de manera más eficiente en la inactivación microbiana, asegurando un agua potable segura y de alta calidad para el consumo humano.
- ✓ El costo actual de producción en la P.T.A.P. deberá incrementar en un 0,11% por efecto de las inversiones y costos de operación y mantenimiento del nuevo proyecto. Pero este incremento puede ser considerablemente contrarrestado con el hecho de que se reducirán gastos de operación y mantenimiento del POA gracias a esta optimización, dichos costos no fueron considerados en el análisis económico debido a que, según operarios, al ser un gasto anual no se lo considera en el costo actual de producción, ya que este cálculo es mensual.

5.2.RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el mantenimiento o cambio de las rejillas en el pretratamiento, ya que estas ya se encuentran en mal estado actualmente. A su vez todos los materiales mencionados en mal estado o estado regular dentro de las fichas técnicas del presente trabajo, también se recomienda hacer su revisión correspondiente.
- Se recomienda hacer la gestión correspondiente para que exista una unidad para monitorear el caudal de salida de la PTAP.
- Se recomienda la implementación inmediata de la propuesta de optimización mencionada, ya que no posee complejidad y generará una mejora que traerá muchos beneficios no solo económicos, sino de calidad del agua potable que consumimos los tarijeños.
- Se recomienda realizar un monitoreo continuo y más riguroso de la causa común de las falencias técnicas y operativas encontradas, la fuente de abastecimiento “Las Tipas”, considerando sobre todo los parámetros más irregulares mencionados en el diagnóstico, los cuales pueden ser objeto de futuras investigaciones