

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1.Introducción

El agua es un compuesto con características únicas, de gran significado para la vida, el más abundante en la naturaleza y determinante en los procesos físicos, químicos y biológicos que gobiernan nuestro medio natural, siendo fundamental el cuidado y tratamiento específico a los efluentes residuales. El hombre ha alterado su disponibilidad con el afán de satisfacer sus crecientes necesidades, principalmente por las actividades agrícolas, industriales y domésticas. Situación que ha provocado la contaminación con aguas residuales de los acuíferos someros y cuerpos de aguas superficiales.

Los contaminantes de las aguas servidas de uso doméstico e industriales, representan un grave problema para la salud pública, por lo que los proyectos de aguas residuales deben ser ejecutados a fin de evitar o aliviar los efectos de los contaminantes al ambiente humano y natural, pues, cuando son ejecutados correctamente, su impacto total sobre el medio ambiente es positivo, siendo de relevante e igual importancia el tratamiento legislativo de cada país para la sanción y prevención de la contaminación del agua.

Por otra parte, la legislación sobre el tratamiento de las aguas residuales producto del uso doméstico e industrial en nuestro país, se encuentra dispersa e inmersa en varios instrumentos jurídicos referidos al aprovechamiento, manejo, conservación y preservación de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente, enmarcadas en la Ley del medio ambiente N° 1333. No obstante a la existencia de leyes, Decretos Supremos y Reglamentos y otras disposiciones legales sobre el medio ambiente en general, se tiene una degradación notoria de los recursos naturales renovables como el agua, el suelo, bosques y biodiversidad, debido principalmente a que el Estado no hace cumplir las disposiciones al respecto y, por otra parte, se evidencia la falta de concientización de la mayor parte de la población en relación a la necesidad de preservación de estos recursos entre ellos el agua a través de su uso racional y adecuado y de su reúso con fines de preservación de este líquido elemento en un ámbito de desarrollo sostenible.

De acuerdo con el Plan de Desarrollo Sectorial de Saneamiento Básico de Bolivia 2008 - 2015, el 70% de las aguas residuales recogidas por los sistemas de saneamiento existentes en el país se descarga en ríos o arroyos sin tratamiento previo con el consecuente riesgo de contaminación de los cauces de agua superficiales, suelo y aguas subterráneas.

Actualmente hay que resaltar que la reutilización del agua es un factor indispensable para la sociedad, especialmente en tiempos de variabilidad y cambio climático, ya que, al ser un recurso renovable, se lo debería tratar como tal, favoreciendo la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) tecnológicamente aptas para generar un reúso, de manera que se cuente con mayores beneficios productivos y réditos económicos.

Para disminuir estos índices de contaminación, es indispensable brindar un tratamiento adecuado a las aguas residuales por medio de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) minimizando el impacto del vertimiento de aguas residuales a las fuentes de agua.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Descripción del problema

En la actualidad en nuestro país especialmente en zonas urbanas, encontramos una serie de infraestructuras de sistemas de tratamiento de aguas residuales totalmente colapsadas, esto debido a diferentes razones como, por ejemplo: cumplieron con su siglo de vida, incremento de población, mal diseño hidráulico, deficiencia en la operación y mantenimiento, etc.

La utilización de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas es una respuesta acertada para mitigar el efecto de contaminación de los cuerpos de agua, pero lamentablemente en nuestro país las pocas plantas que existen no están generando los resultados esperados de mitigación.

Los ríos son un claro ejemplo de aguas superficiales que constituyen una importante fuente de suministro de agua tanto para usos agrícolas como domésticos. Pero, en los últimos años, los ríos, se han visto afectados por los efectos negativos de la contaminación.

En el departamento de Tarija aún existen zonas que depositadas de manera directa sus aguas residuales sin tratamiento o solo con tratamiento primario directamente a los ríos. Situación

que es alarmante por el peligro de focos de contaminación causando el desequilibrio ambiental y la muerte de muchos ecosistemas acuáticos.

Los municipios del departamento de Tarija en los últimos años han tenido un gran desarrollo urbanístico e industrial lo que genera que el crecimiento poblacional sea mayor, y un aumento de la demanda de saneamiento básico y por ende crece la necesidad de diseñar y construir plantas de tratamiento eficaces.

Para la selección y diseño de nuevas plantas de tratamiento, se cuenta con datos de investigaciones de otros países, tendiendo carencia de investigaciones locales, los cuales pueden dar valores de diseño más acordes a la realidad local.

1.2.2. Formulación del problema

La presente investigación busca responder a la siguiente pregunta:

¿Cuáles son las características de funcionamiento de la PTAR del B. Catedral de la ciudad de Tarija, determinada a partir de registros de caudal y calidad del agua residual entrante y saliente?

1.3. Objetivos Generales y Específicos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar y analizar las características de funcionamiento de la PTAR del B. Catedral de la ciudad de Tarija, determinada a partir de registros de caudal y calidad del agua residual entrante y saliente, para aportar datos locales que ayuden a la selección y diseño de este tipo de tecnología de tratamiento.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Describir en detalle las estructuras y procesos de la PTAR del barrio Catedral, incluyendo un análisis del estado actual de la infraestructura.
- Recopilar y sistematizar los datos históricos de caudal y calidad del agua residual para establecer un perfil de la carga afluente de la PTAR.
- Determinar la Eficiencia de remoción:(%) de la PTAR para los parámetros de control, como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), la demanda química de oxígeno

(DQO), los sólidos suspendidos totales (SST), el nitrógeno total (N-Total) y el fósforo total (P-Total) utilizando los datos de calidad del agua a la entrada y a la salida.

- Comparar la eficiencia de remoción de contaminación (Nitrógeno Total y Fósforo) comprando los resultados obtenidos de laboratorio con los límites Máximos admisibles (LMA)
- Analizar si la calidad del efluente final de la PTAR cumple con las exigencias de la Ley de Medio Ambiente N° 1333 y otras normativas nacionales e internacionales relevantes.
- Evaluar la Calidad del Efluente para Reúso (si aplica). Si el destino es el reúso (riego), evaluar el cumplimiento del efluente con los estándares de calidad específicos para ese uso (límites de coliformes y nutrientes para riego agrícola).
- Determinar el costo de operación y consumo de energía eléctrica.

1.4. Alcances y limitaciones

1.4.1. Alcances

Obtener un documento mediante el cual se analice y evalúe el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del B. Catedral en base a los datos de caudal y calidad del agua residual tratada, registrados en el periodo 2019 a 2023.

Resultados que indicarán el funcionamiento y eficacia de purificación, de los componentes de la actual PTAR en base a su cumplimiento o no de las exigencias del reglamento en materia de contaminación hídrica de la Ley de Medio Ambiente.

1.4.2. Limitaciones

El presente trabajo es válido solamente para aguas residuales domésticas y para el barrio Catedral de la ciudad de Tarija, para otros lugares sirve como referencia, siendo lo ideal ajustarlo de acuerdo a los parámetros del lugar donde se desea emplear, dado que las condiciones son diferentes.

No se cuenta con datos actuales de registro de población urbana del barrio Catedral, donde la población es proyectada para cualquier año a partir de los datos de registro del censo 2012.

No se analiza el comportamiento de la planta referida a los nutrientes que tiene el agua residual, ya que no se contaba con datos registrados de fósforo y nitrógeno para lo cual se tuvo que hacer un laboratorio específicamente de esos nutrientes de nitrógeno y fósforo.

1.5. Justificación

El tratamiento adecuado de las aguas residuales es un pilar fundamental para la protección del medio ambiente y la salud humana. La descarga de efluentes sin tratar o con un tratamiento deficiente contamina los cuerpos de agua receptores, agotando el oxígeno disuelto, alterando los ecosistemas y comprometiendo la disponibilidad de agua limpia, un recurso cada vez más escaso. Además, un mal funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) representa un riesgo directo para la salud pública, ya que los agentes patógenos presentes en el efluente pueden causar enfermedades en las poblaciones que entran en contacto con estas aguas. Por lo tanto, el estudio y optimización de estos sistemas son esenciales para mitigar los impactos negativos y preservar la calidad de vida.

En el ámbito de la ingeniería, es común que los diseños de PTAR se basen en parámetros teóricos y guías de diseño internacionales. Estos manuales, si bien son valiosos, se fundamentan en experiencias y condiciones socioeconómicas, climáticas y de hábitos de consumo de agua que difieren significativamente de las características locales. Esto incrementa el riesgo de un desempeño subóptimo o fallas operativas en la etapa de funcionamiento. La obtención de datos y parámetros empíricos a partir de esta investigación proporcionará una base más sólida y precisa para el diseño de futuros sistemas de tratamiento.

En el marco de la economía circular, el reúso del agua residual tratada ha emergido como una estrategia para la gestión sostenible del agua. Este enfoque no solo alivia la presión sobre las fuentes de agua dulce, sino que también permite la recuperación de recursos valiosos como nutrientes (nitrógeno, fósforo) y energía. La justificación de este estudio se refuerza al considerar el potencial de los efluentes tratados para usos no potables, como la agricultura, investigar los parámetros de tratamiento para el reúso con garantías sanitarias.

1.6. Hipótesis

La evaluación y análisis de las características de funcionamiento de la PTAR del B. Catedral de la ciudad de Tarija, determinados a partir de registros de caudal y calidad del agua residual (afluente y efluente), permitirá aportar datos locales que ayuden a la selección y diseño de este tipo de tecnología de tratamiento.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aguas residuales

Se consideran aguas residuales a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad y son transportadas mediante un sistema de alcantarillado sanitario.

Podemos definir al agua residual como la combinación de los desechos líquidos procedentes de viviendas, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, junto con las aguas subterráneas, superficiales y pluviales que puedan agregarse a las anteriores.

2.2. Tipos de aguas residuales

La composición de las aguas residuales resulta de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua, que proviene de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de recreo, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual.

Las aguas residuales pueden clasificarse como:

- Aguas residuales de origen doméstico
- Aguas residuales de origen industrial
- Aguas residuales de origen agrícola

Aguas residuales de origen domestico:

Son aquellas aguas utilizadas con fines higiénicos (sanitarios, cocinas, lavando, etc.)

Consistentes básicamente en residuos descargados por los humanos, que llegan a las redes de alcantarillado por medio de las descargas de las instalaciones hidráulicas de los hogares, establecimientos comerciales, públicos y similares.

- **Aguas negras.** - A las aguas residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coniformes fecales.

- **Aguas grises.** - A las Aguas Residuales provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras, que aportan sólidos suspendidos, fosfatos, grasas y coliformes fecales, esto es, aguas residuales domésticas, excluyendo las de los inodoros

Aguas residuales de origen industrial

Son residuos líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas del tipo de la industria. La gran variedad y cantidad de productos vertidos por este tipo de actividad obliga a una investigación propia para cada tipo de industria, pues no existe similitud alguna entre los vertidos procedentes de industrias de alimentación, química, agrícola, metalúrgica, etc.

Aguas residuales de origen agrícola

Son aguas procedentes de actividades agrícolas y ganaderas. El tratamiento de este tipo de aguas no debe pasar por desapercibido debido al grado de contaminación que pueden originar. Además de contener sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden contener productos característicos de la actividad agropecuaria, tales como fertilizantes, biácidos, estiércol, etc.

En cuanto a los fertilizantes es importante resaltar que antes eran de origen orgánico y en la actualidad son casi sustituidos por abonos de origen inorgánico, tales como sulfato, nitratos, fosfatos, etc., de especial incidencia en la contaminación de aguas.

2.3. Caracterización de las aguas residuales

Las Aguas residuales pueden caracterizarse de la siguiente manera:

- Características Físicas.
- Características Químicas.
- Características Biológicas.

2.3.1. Características físicas

La característica física más importante del agua residual es su Contenido Total de Sólidos, los cuales comúnmente se clasifican en: suspendidos, disueltos y sedimentables. Otras características físicas son la temperatura, turbidez, color, sólidos y olor.

Temperatura

La temperatura de las aguas residuales es un parámetro importante que afecta tanto a la calidad del agua como a los procesos de tratamiento. La temperatura ideal para un tratamiento eficiente de agua residual suele estar entre 20 y 40 °C este rango, conocido como mesófilo favorece la actividad de los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica.

Turbidez

Se debe a la cantidad de materias en suspensión que hay en las aguas residuales (limo, materia orgánica y microorganismos. Esta turbidez, en las masas de aguas receptoras, afecta a la penetración de la luz, lo que redundaría en una menor productividad primaria.

Color

Suele ser gris o pardo, pero debido a los procesos biológicos anóxicos el color puede pasar a ser negro

Sólidos

Se pueden clasificar en:

Totales: residuos que quedan tras la evaporación y secado de la muestra a 130°C durante 60 mm.

Fijos: residuos remanentes después de la evaporación y carbonización a 600 °C, durante minutos.

Volátiles: es la diferencia entre sólidos totales y fijos.

2.3.2. Características químicas

Las características químicas de las aguas residuales son principalmente el contenido de materia orgánica e inorgánica, y los gases presentes en el agua residual. La medición del contenido de la materia orgánica se realiza por separado por su importancia en la gestión de la calidad del agua y en el diseño de las instalaciones de tratamiento de aguas.

La materia orgánica de las aguas residuales es una combinación de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, de las sustancias que están presentes en las aguas residuales, los compuestos orgánicos son los de mayor importancia. Para medir de forma general el contenido de materia orgánica presente en un agua residual se utilizan los siguientes parámetros habitualmente: la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO₅) “que indica la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua residual y la demanda química de oxígeno (DQO) “que representa la cantidad de oxígeno consumido al oxidar químicamente las sustancias orgánicas y algunas inorgánicas (biodegradables y no biodegradables) que están presentes en el agua residual, sin intervención de los microorganismos.

Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO): La DBO se define como la cantidad de oxígeno (mg/l) necesaria para la degradación u oxidación de la materia orgánica del agua residual o servida en un período de 5 días a 20°C (DBO₅). Se puede describir la DBO como la solución orgánica, que es degradable debido a la acción de las bacterias. En Bolivia, se puede constatar un rango de la DBO por habitante de 30 hasta 60g DBO/ (hab. día), dependiendo de la región. Considerando caudales de 50 l/ (hab. día) hasta 150 l/ (hab. día) esto significará concentraciones Entre 200 hasta 700mg DBO/l en las entradas de las plantas de tratamiento de aguas.

La DBO del efluente es un indicador del buen funcionamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales y este parámetro es más usado para definir la calidad del agua residual con fines de tratamiento.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): La demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno consumido por las materias existentes en el agua y oxidables en condiciones operatorias definidas. La medida corresponde a una estimación de las materias

oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen orgánico o mineral (incluye la materia orgánica degradable por bacterias).

La DQO es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente dicromato potásico en medio ácido). Considerando el agua residual doméstica, la DQO es siempre más grande, y en situaciones extremas igual que la DBO.

En Bolivia se puede constatar un rango de la DQO por habitante de 60 hasta 120g DQO/(hab.día). Considerando caudales de 50 hasta 150 l/(hab. día) esto significará concentraciones entre 400 hasta 1.400mg DQO/l en las entradas de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1. Biodegradabilidad del agua residual urbana según la relación DBO₅/DQO

DBO₅/DQO	Biodegradabilidad del agua residual
0,4	Alta
0,2-0,4	Normal
0,2	Baja

Fuente: CENTA, Fundación. Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población.

La relación DBO₅/DQO indica la biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas:

- Mayor o igual a 0,4 Aguas muy biodegradables: El vertido es orgánico (probablemente aguas residuales urbanas, resto de ganado o industria alimentaria) se recomienda solo tratamiento biológico para su depuración.
- Entre 0,2 - 0,4 Aguas biodegradables: Se puede recomendar tratamiento mediante lechos bacterianos o lodos activos
- Menor o igual 0,2 Aguas poco biodegradables: Nos indica un vertido de tipo inorgánico (probablemente aguas residuales industriales) se recomienda tratamientos químicos para su depuración.

En la materia inorgánica los parámetros de mayor importancia a tener en cuenta en depuración de aguas residuales son: pH, nutrientes (nitrógeno y fósforo), y gases.

El pH “es la medida de concentración del ion hidrogeno en el agua.

El nitrógeno y el fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas.

2.3.3. Las características Biológicas de las aguas residuales

Las características biológicas de las aguas residuales son de fundamental importancia en el control de enfermedades causadas por organismos patógenos de origen humano, y por el papel activo y fundamental de las bacterias y otros microorganismos dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica, bien sea en el medio natural o en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Debido a la importancia de las características biológicas de un agua residual, se hace necesario conocer los principales grupos de microorganismos que originan dichas características, estos grupos están conformados por bacterias, hongos, algas, protozoos, y virus.

Coliformes

Los coliformes fecales son un grupo de bacterias que habitan predominantemente en el intestino del hombre, sangre caliente, incluyendo los seres humanos. Su presencia en el agua es un indicador clave de contaminación fecal, lo que significa que el agua ha estado en contacto con heces y, por lo tanto, podría contener otros patógenos más peligrosos (virus, bacterias, protozoos) que causan enfermedades como cólera, fiebre tifoidea, giardiasis y disentería.

En Bolivia, la normativa para el control de la calidad del agua para consumo humano (NB 512) establece que el valor máximo aceptable de coliformes termorresistentes (un subgrupo de coliformes fecales, a menudo usado como sinónimo de *E. coli*) es de 0 UFC/100 mL (Unidades Formadoras de Colonias por 100 mililitros). Para la descarga de efluentes tratados a cuerpos receptores, el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (Ley 1333) establece límites que varían según la clase del cuerpo de agua receptor, pero generalmente se busca una reducción significativa.

Tratamiento de Coliformes Fecales

El tratamiento de coliformes fecales se centra principalmente en la desinfección del agua, que generalmente se realiza al final de un proceso de tratamiento de aguas residuales o potables. Para que la desinfección sea efectiva, es crucial que el agua haya pasado por etapas previas que eliminen la mayor parte de la materia orgánica y sólidos en suspensión, ya que estos pueden proteger a los microorganismos y reducir la eficacia del desinfectante.

2.4. Parámetros de control para el tratamiento de aguas residuales

Dentro de los parámetros fundamentales para el control de la operación en los sistemas de tratamiento de las aguas residuales están:

Parámetros fundamentales	{	Sólidos totales Grasas y aceites DQO DBO
-----------------------------	---	---

Sólidos totales en las aguas residuales

Los sólidos totales (ST) en las aguas residuales son la cantidad total de material disuelto y suspendido en una muestra de agua. Esta medición es un indicador clave de la calidad del agua residual y se utiliza para evaluar la carga contaminante y la eficiencia de los procesos de tratamiento en particular que facilite su remoción o eliminación.

Cuando se habla de sólidos contenidos en un agua residual se está haciendo referencia a aquello que permanece como residuo después de la evaporación y secado de la muestra a 103 °C. Los sólidos en las aguas residuales pueden estar en forma suspendida, coloidal y disuelta. Todos ellos a su vez son de naturaleza inorgánica u orgánica. La fracción orgánica de los sólidos se determina mediante la pérdida por ignición a 600 °C. Los sólidos se pueden clasificar como:

Grasas y aceites

El contenido de grasas y aceites en los residuos domésticos, en algunos residuos industriales y en los lodos se debe considerar para su manipulación y tratamiento hasta la disposición final. Al aceite y la grasa se les concede especial atención por su escasa solubilidad en el agua y su tendencia a separarse de la fase acuosa.

Donde muy pocas plantas depuradoras tienen la posibilidad de separar estos materiales para su disposición en los sistemas de recolección de grasa o en los incineradores; en consecuencia, el residuo que se separa en forma de nata en los tanques de sedimentación primaria, normalmente es transferido a las unidades de disposición junto con los sólidos sedimentados.

En los tanques de digestión de lodos, los aceites y grasas tienden a separarse y a flotar en la superficie, para formar densas capas de natas debido a su escasa solubilidad en el agua y a su bajo peso específico. Los problemas de estas capas son especialmente graves cuando los residuos de alto contenido en grasa llegan al alcantarillado público.

Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO mide el oxígeno equivalente de sustancias orgánicas e inorgánicas en una muestra acuosa que, es susceptible a la oxidación por dicromato de potasio en una solución de ácido sulfúrico. Este parámetro ha sido usado por más de un cuarto de siglo para estimar el contenido de orgánicos en aguas y aguas residuales. Sin embargo, la correcta interpretación de los valores de DQO puede presentar problemas por lo cual se debe entender las variables que afectan los resultados de este parámetro. El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO₅ porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente.

Generalmente, se podría esperar que la DBO₅ última del agua residual se aproximara a la DQO. Sin embargo, existen muchos factores que afectan estos resultados especialmente en desechos industriales complejos. Estos factores son los siguientes:

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La DBO₅ es la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos a lo largo de un período de cinco días, para descomponer la materia orgánica de las aguas residuales a una temperatura de 20 °C.

La DBO₅ suele emplearse para comprobar la carga orgánica de las aguas residuales municipales e industriales biodegradables, sin tratar y tratadas. La DBO₅, la cual es un estimativo de la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar los materiales orgánicos biodegradables por una población heterogénea de microorganismos, es un parámetro no bien

definido que ha sido utilizado por muchos años, al asignar una demanda de oxígeno a las aguas residuales.

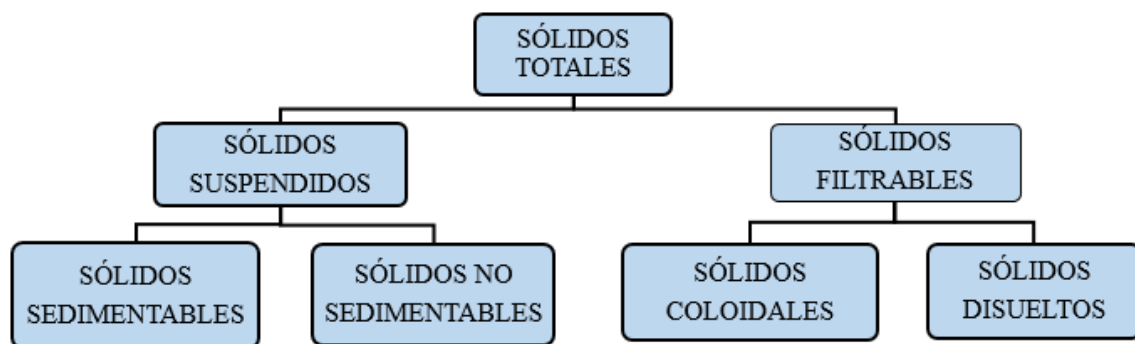
Caracterización de los sólidos según la sedimentabilidad

Dentro de las características fundamentales para la clasificación de los sólidos están:

- | | | |
|---------------------------------|---|-------------------------|
| Clasificación
de los sólidos | { | 1.Sólidos totales (ST) |
| | | 2.Sólidos totales (SS) |
| | | 3.Sólidos totales (SD) |
| | | 4.Sólidos Sedimentables |

El contenido de sólidos presentes en el agua afecta directamente la cantidad de lodos que se produce en el sistema de tratamiento o disposición.

Figura 1. Clasificación de los sólidos presentes en un agua.



a) Sólidos totales (ST)

Se considera como sólidos totales de un agua el residuo de la evaporación y secado a 103 – 105 °C.

b) Sólidos suspendidos (SS)

Los sólidos suspendidos o no disueltos constituyen la diferencia entre los sólidos totales de la muestra no filtrada y los sólidos de la muestra filtrada. En la práctica los sólidos disueltos son aquellos con tamaño menor a 1.2 mm, tamaño nominal de poros correspondiente a los filtros de fibra de vidrio usados para hacer la separación.

c) Sólidos disueltos (SD)

Los sólidos disueltos representan el material soluble y coloidal, el cual requiere usualmente para su remoción, una oxidación biológica o coagulación y una sedimentación.

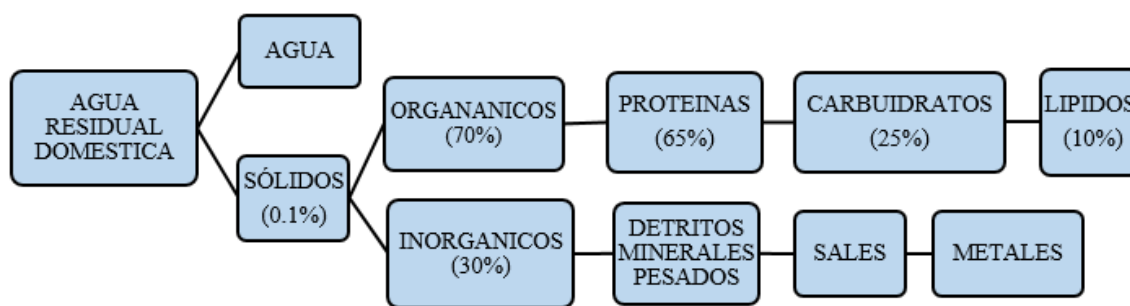
d) Sólidos sedimentables

La determinación de los sólidos sedimentables es de importancia en el análisis de las aguas residuales para determinar si es necesaria una sedimentación primaria en el tratamiento de las aguas residuales que se están estudiando, antes de ser sometidas a otro tipo de tratamiento. Una prueba similar se usa en la operación de las plantas de tratamiento para determinar la eficiencia de las unidades de sedimentación. Los sólidos volátiles son, básicamente, la fracción orgánica de los sólidos o porción de los sólidos. Su determinación es muy importante en lodos activados.

2.5. Características cuantitativas y cualitativas

Las aguas residuales domesticas están constituidas en un elevado porcentaje (en peso) por agua, cerca del 99,9 %, y apenas el 0,1 % de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos. Lo cual se representa en el siguiente Diagrama.

Figura 2. Diagrama de la constitución del agua residual domestico



Fuente: Metcalf & Eddy (1985).

2.6. Tratamiento de las aguas residuales

La concentración de los residuos líquidos de una comunidad, llamadas aguas negras o residuales, crea el subsecuente problema de su evacuación, problema que es necesario resolver para la salud y bienestar de los habitantes. Para esto es necesario darles un tratamiento adecuado a las aguas residuales. El tratamiento de las aguas residuales puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos. Todos estos métodos se basan en fenómenos

físicos, químicos y biológicos. Su objetivo es producir un líquido derivado, que se pueda eliminar sin causar ningún perjuicio al medio ambiente.

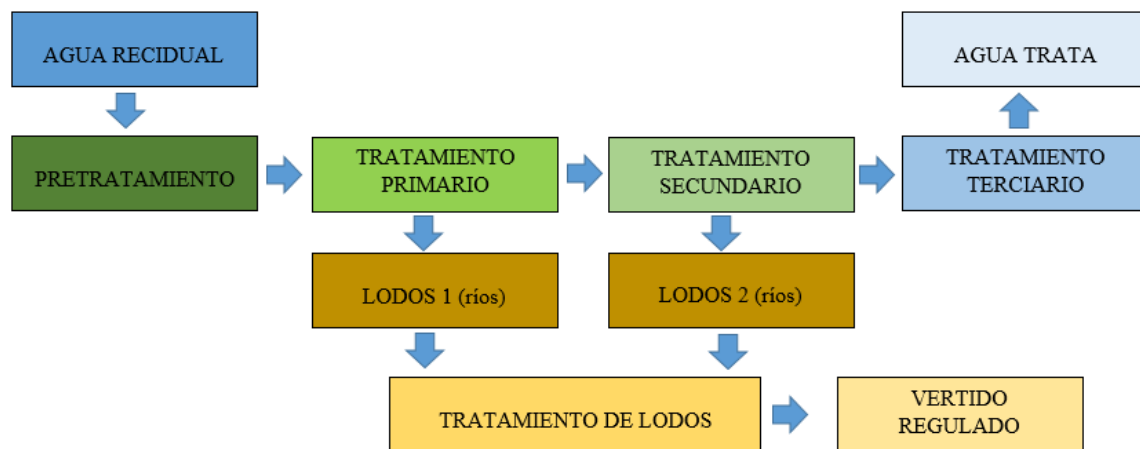
Después de evacuar el afluente de una planta de tratamiento de aguas negras, también quedan los sólidos y el agua contenida en los sólidos, que han sido separados de las aguas negras y los cuales, también deben ser tratados de una manera adecuada antes de su disposición final.

2.7. Métodos de tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de las aguas negras, es el conjunto de los recursos por medio de los cuales se realiza el proceso de auto purificación de una corriente, dentro de un área delimitada y bajo condiciones controladas.

Aunque hay muchos métodos de tratamiento de aguas residuales, todos se pueden incluir dentro de los procesos siguientes

Figura 3. Secuencia de tratamientos de aguas residuales domésticas



Fuente: Fonam (2010)

- Tratamiento Preliminar
- Tratamiento Primario
- Tratamiento Secundario
- Tratamiento Terciario
- Tratamiento de Lodos

El siguiente diagrama muestra los distintos tratamientos englobados en la línea de agua, el objeto de estos tratamientos y la naturaleza de los procesos que en ellos tienen.

Figura 4. Tratamiento de aguas residuales



Fuente: Aguirre, P. (2004). Manual de depuración de aguas residuales urbanas

Etapas de la línea de agua, ordenadas secuencialmente de izquierda a derecha, en el tratamiento de las aguas residuales.

2.7.1. Tratamiento preliminar o pretratamiento

Tienen como objetivo eliminar de forma física o mecánica las aguas residuales, todos aquellos elementos que por su naturaleza o tamaño pueden afectar el correcto funcionamiento de los tratamientos posteriores, principalmente por su acción mecánica, formación de sedimentos, abrasión o atascos. Entre las técnicas más usadas en las plantas de Bolivia están el desarenador y la rejilla, ya sea de limpieza manual o de limpieza mecanizada en las plantas.

Principales elementos usados en pretratamientos son:

- Tanque de ecualización.
- Rejas o cribas de barras.
- Desarenadores.
- Trampa de grasas y aceites.

Figura 5. Tratamiento preliminar



Fuente: Terán, 2004

Tanque de ecualización

Un tanque de ecualización (o tanque de nivelación) en el tratamiento de aguas residuales tiene la función principal de amortiguar las variaciones de caudal y concentración que recibe una planta de tratamiento.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales suelen recibir flujos fluctuantes a lo largo del día, con picos en las mañanas y tardes y caudales bajos durante la noche. Estas variaciones pueden causar problemas en los procesos de tratamiento posteriores, como la aireación, la sedimentación y los tratamientos biológicos, ya que estos procesos operan de manera más eficiente con un flujo constante.

El tanque de ecualización actúa como un pulmón regulador, almacenando el exceso de caudal durante los períodos de pico y liberándolo gradualmente a una tasa constante. Esto permite que el resto de la planta de tratamiento opere de manera más estable y eficiente, mejorando el rendimiento y reduciendo los costos operativos.

Características de los Tanques de Ecualización

Las características del tanque de ecualización son:

- **Capacidad de Almacenamiento:** El tamaño del tanque debe ser suficiente para almacenar las variaciones de caudal durante un período de tiempo determinado (usualmente 24 horas). El volumen se calcula en función de la hidrografía de la afluencia y los patrones de flujo.

- **Sistema de Mezcla:** Es crucial que el contenido del tanque se mantenga homogéneo. Los sistemas de mezcla, como los agitadores sumergibles o la aireación difusa, evitan que los sólidos se sedimenten en el fondo y mantienen la concentración de contaminantes uniforme.
- **Bombas de Transferencia:** Estas bombas son las encargadas de bombear el agua almacenada del tanque hacia los procesos de tratamiento posteriores a una tasa de flujo controlada y constante.
- **Aireación:** En algunos casos, se añade aireación para pre-tratar el agua dentro del tanque. Esto puede ayudar a reducir los olores, eliminar compuestos volátiles y mantener el agua en condiciones aeróbicas, lo que beneficia los procesos biológicos posteriores

Figura 6. Esquema del tanque ecualizador



Fuente: Master Builder Solutions

Rejillas o cribas de barras

Las rejillas o cribas de barras son estructuras de pretratamiento compuestas por un conjunto de barras metálicas paralelas y uniformemente espaciadas, instaladas en un canal de flujo. Su función principal es la separación y retención de sólidos gruesos presentes en el agua residual, tales como trapos, plásticos, ramas, escombros y otros materiales que podrían dañar o obstruir equipos posteriores como bombas, tuberías y válvulas en la planta de tratamiento.

Características de las Rejillas de Barras

- Espaciamiento entre Barras es de 1.0 a 5.0 cm, y se utilizan para capturar sólidos más pequeños.
- Están construidas de acero inoxidable para garantizar una alta resistencia a la corrosión.
- Su ángulo de instalación con respecto a la horizontal (entre 30° y 60°) influye en la eficiencia de retención y la facilidad de limpieza.

Figura 7. Cámara de rejillas



Fuente: propia

2.7.2. Tratamientos primarios

Este tipo de tratamiento se refiere a la remoción parcial de sólidos suspendidos, material orgánico y organismos patógenos, generalmente mediante sedimentación, dando al agua condiciones favorables para el tratamiento secundario.

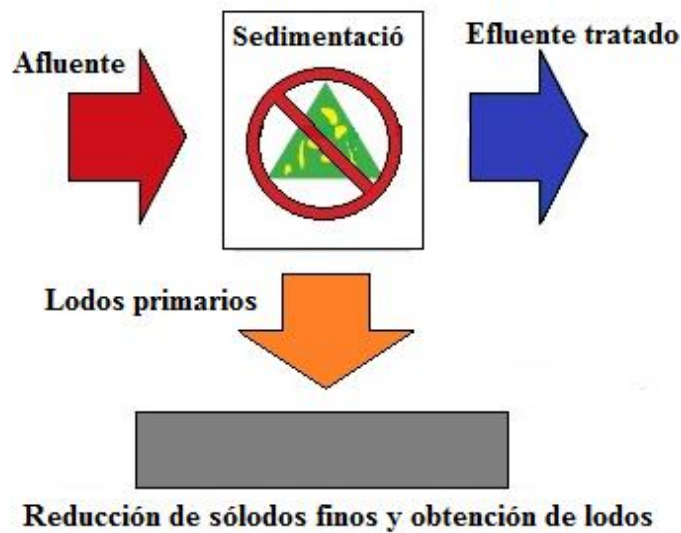
El tratamiento primario constituye el primero, y a veces el único tratamiento de las aguas residuales. Este proceso elimina los sólidos flotantes y los sólidos sedimentables tanto finos como gruesos. Si la planta provee solamente un tratamiento primario, se considera que el efluente sólo ha sido parcialmente tratado. Es un simple tratamiento físico que consiste en la separación de elementos sólidos que contiene el agua.

El tratamiento primario persigue retener una buena parte de los sólidos en suspensión que lleva el agua residual (entre un 90 y 95% de los sólidos sedimentables). A fin de lograr lo anterior se emplea el efecto de la gravedad, para que se depositen los sólidos sedimentables en los sedimentadores. Los parámetros de diseño apuntan a un tiempo de retención y velocidad del líquido lo más constante posible, impidiendo las variaciones de caudal, con la finalidad de que los lodos y la espuma recogida en el fondo y la superficie no se vuelvan a mezclar con el líquido y prepararse para ser enviados a tratamiento posteriores.

Entre algunos de los elementos más empleados en el tratamiento primario están:

- Tanque Anóxico
- Tanque Anaeróbico
- Tanque Aeróbico

Figura 8. Diagrama General del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales.



Fuente: Chaves Vera 200

Sedimentadores primarios

El objetivo principal del tratamiento es la remoción de sólidos suspendidos y DBO de las aguas residuales, por un proceso físico de asentamiento en tanques, cuyo tiempo de retención mínimo aconsejable es de una hora, profundidades entre 2,5 a 4m y una velocidad de entrada

Tanque Anóxico

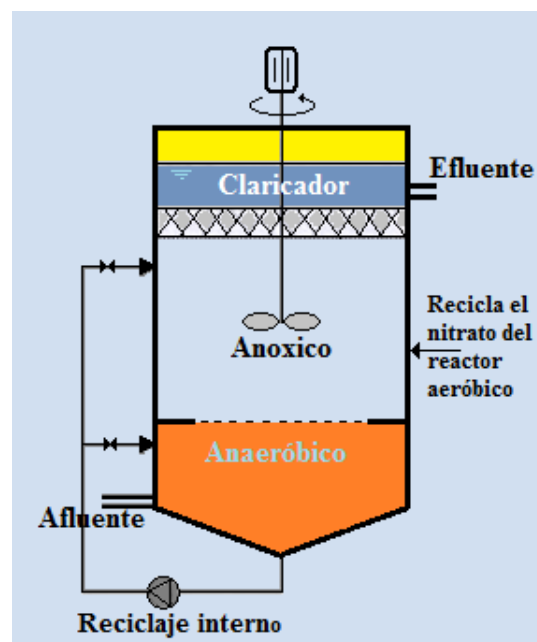
Un tanque anóxico es un reactor biológico que forma parte de los de tratamiento secundario de las aguas residuales. Su función principal es la eliminación de nitratos (NO_3^-) a través de un proceso llamado desnitrificación.

Este proceso se lleva a cabo en un ambiente sin oxígeno disuelto (O_2), pero con presencia de nitratos. Los microorganismos heterótrofos, como las bacterias, utilizan el nitrato como aceptor final de electrones para oxidar la materia orgánica (carbono), liberando nitrógeno gaseoso (N_2) que se disuelve en la atmósfera. La desnitrificación es crucial para prevenir la eutrofización de los cuerpos de agua receptores (ríos), ya que el exceso de nitrógeno es un nutriente que causa el crecimiento descontrolado de algas.

Características de un Tanque Anóxico

- **Ausencia de Oxígeno Disuelto (O_2):** A diferencia de un tanque de aireación, en el tanque anóxico no se inyecta aire. Es fundamental mantener un ambiente anóxico para que las bacterias cambien su metabolismo y utilicen el nitrato en lugar del oxígeno.
- **Presencia de Nitratos (NO_3^-):** Los nitratos provienen de la nitrificación, que es la conversión de amonio (NH_4^+) a nitrato y se realiza en un tanque de aireación anterior al tanque anóxico. Es común que el tanque anóxico y el tanque de aireación se integren en un mismo sistema de lodos activados.
- **Presencia de Materia Orgánica:** Las bacterias necesitan una fuente de carbono (alimentos) para llevar a cabo la desnitrificación. La materia orgánica presente en el agua residual sirve como fuente de carbono para este proceso. En casos de deficiencia, se puede añadir una fuente externa, como metanol.
- **Agitación:** El tanque está equipado con agitadores sumergibles que mantienen los sólidos en suspensión (biomasa bacteriana) y garantizan que el agua residual y los nitratos estén en contacto constante con los microorganismos, sin introducir oxígeno.

Figura 9. Reactor anóxico

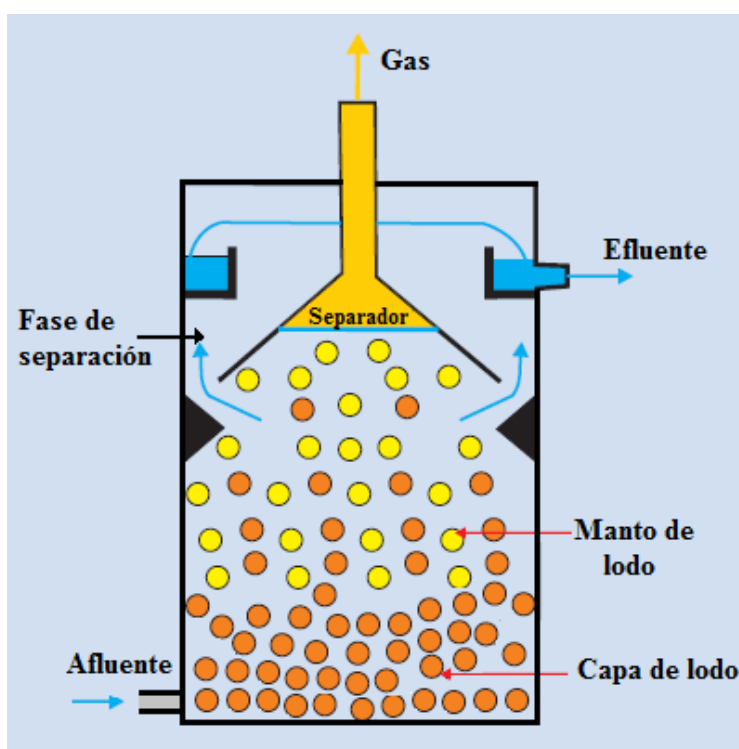


Fuente: Ricardo Blanco Aguilera Julio de 2016

Tanque Anaeróbico

Un tanque anaeróbico es un sistema de tratamiento de agua que elimina la materia orgánica biodegradable en ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica se transforma a biomasa y compuestos orgánicos, la mayoría de ellos volátiles. Aunque es un proceso natural, sólo en los últimos años ha llegado a ser una tecnología competitiva en comparación con otras alternativas. Esto ha sido posible gracias a la implementación de sistemas que separan el tiempo de retención hidráulico (TRH), del tiempo de retención celular (TRC) los cuales han sido denominados reactores de alta tasa. Durante este proceso también se obtiene un gas combustible (Biogás) y lodos con propiedades adecuadas para ser usados como bioabonos.

Figura 10. Reactor anaeróbico



Fuente: Reactores ascendente antología Anaerobios de Flujo

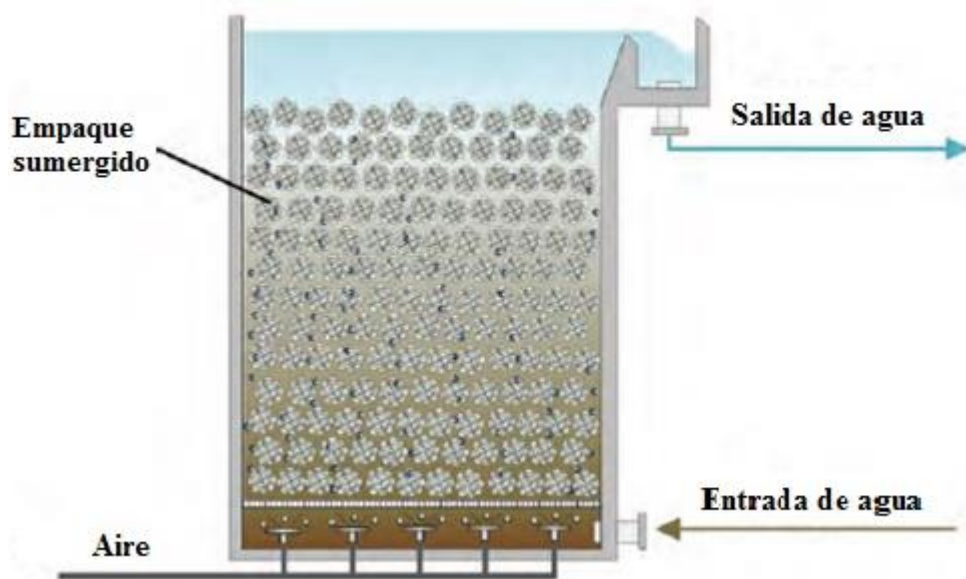
Reactor aeróbico

Un reactor aeróbico es un sistema que utiliza oxígeno para tratar aguas residuales y otros efluentes. Se basa en la capacidad de los microorganismos para degradar la materia orgánica y los nutrientes.

El reactor aeróbico biológico de membrana es un sistema compacto que se acopla a un tanque de aireación completamente mezclado con módulo de membranas (medios) de micro o ultrafiltración. Las primeras retienen partículas hasta 0.1 micras y las segundas hasta 0.01 micras. Estos módulos pueden ser externos al reactor o bien sumergidos en el mismo tanque. Las ventajas de este tipo de sistemas es la muy alta calidad de agua obtenida (libre de sólidos suspendidos y de microorganismos patógenos).

Sus desventajas son el costo de las membranas y el taponamiento que sufren, lo que implica procesos de limpieza frecuentes y una vida útil de dos o tres años en el mejor de los casos. La tecnología, los reactores son adecuados para los requerimientos de los sistemas de agua y saneamiento, salvo si se requiere producir un agua de reúso de alta calidad.

Figura 11. Reactor aeróbico



Fuente: selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales

Medios filtrantes

Los medios filtrantes de estanques son adecuados a sistemas de tanques de lecho o móvil. Estos también se denominan sistemas de "Reactor de Biopelícula" y se utilizan para el tratamiento de agua y aguas residuales.

Característica

Medio físico de plástico que alberga los microorganismos en el tanque aeróbico propagando su reproducción y mejorando sus condiciones de supervivencia.

Debido al movimiento turbulento de los medios biofiltro en suspensión, el medio filtrante es auto limpiante. Esto permite que el filtro alcance una eficiencia óptima sin la perturbación del mantenimiento periódico, evitando la pérdida innecesaria de bacterias dentro del filtro. Esto permite niveles estables y bajos de amoníaco y nitrito. Dentro del agua.

Ventaja

- Fórmula especial y tecnología de producción para acelerar la formación de biopelículas;
- Mayor superficie efectiva para obtener más microorganismos;
- Adoptar la tecnología de descomposición de biopelículas para salvar el proceso de retorno de lodos;
- Reduzca el consumo de energía, ahorre espacio y acorte el flujo del proceso.
- Desnitración y desfosforización eficientes para mejorar la calidad del agua;

Figura 12. Medios



Fuente:(<https://es.yfenvironment.com/mbbr-bio-media/k1-pond-filter-media.html>)

2.8. Tratamientos secundarios

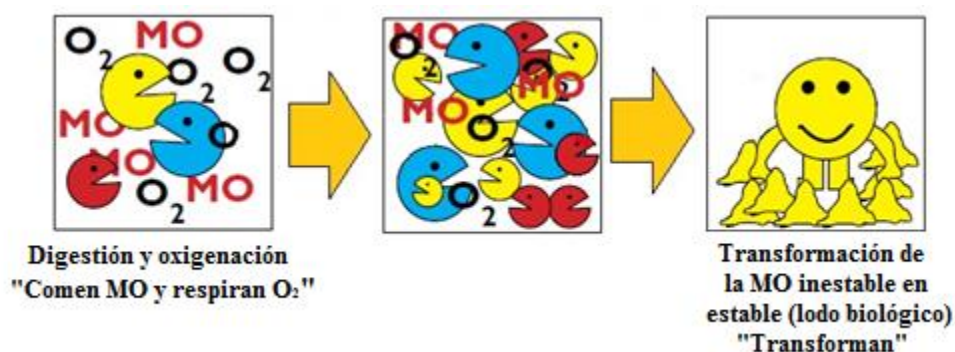
El tratamiento secundario es un tratamiento biológico que persigue transformar la materia orgánica (remoción del DBO) del agua residual en materia celular, gases, energía y agua.

A su vez se retienen también sólidos en suspensión y sólidos coloidales.

En la zona de tratamiento secundario algunas veces se añaden reactivos para favorecer la eliminación de fósforo, o de sólidos coloidales. A este tratamiento químico no se le debe considerar un tratamiento secundario.

- Tanques SBR
- Tanque RAS

Figura 13. Biodegradación microbiana



Fuente: Terán, 2004

Reactor biológico secuencial SBR

Un reactor biológico secuencial SBR (Secuencial Biológico Reactor) es un tipo de tratamiento biológico cuya característica principal es que utiliza un único depósito para realizar las operaciones habituales de una planta de lodos activados, aunque generalmente se suelen poner casi siempre dos depósitos en paralelo para alternar algunas fases del proceso de tratamiento.

Funcionamiento del sistema SBR

El reactor está conformado por dos compartimentos, de menor y mayor volumen, divididos entre ellos mediante una pared deflectora.

Las aguas residuales llegan al primer compartimento denominado "reactor preliminar", que actúa como selector biológico. El agua entra de forma continua, y se alcanza una alta relación entre la concentración de DBO de entrada y la concentración de biomasa existente, lo que provoca una carga másica más alta en este compartimento. En esta zona se potencia la

proliferación de la biomasa útil (flóculos de bacterias) y minimiza el crecimiento de las bacterias filamentosas (bulking).

A continuación, el agua residual pasa al segundo compartimento, por mediación de unos orificios en la zona inferior de la pared. El efecto que se consigue es que el flujo de entrada de agua cruda no afecte a la calidad del efluente en la fase de sedimentación.

En esta zona del reactor biológico, denominado “reactor principal”, se produce la degradación de la materia orgánica y la eliminación del nitrógeno y fósforo.

La aireación se realiza con nuestros exclusivos soplantes de bajo consumo y una parrilla de difusores de membrana de burbujas finas.

El proceso de decantación se ejecuta en el mismo reactor principal en una situación de máxima tranquilidad y la extracción del agua tratada se lleva a efecto con un dispositivo móvil con flotador, para evitar la salida de sustancias flotantes y espumas.

También se realiza, de forma cíclica programada, la purga automática de los lodos del reactor biológico principal, para mantener la edad de fango deseada.

Para el mando y control de todas las fases del proceso de nuestras plantas de tratamiento con reactor secuencial SBR, utilizamos un tablero con PLC y un SCADA. Esto permite modificar los ciclos de trabajo para optimizar el rendimiento

Ventajas de los sistemas SBR

Por sus características, los reactores secuenciales SBR presentan las siguientes ventajas:

- Necesitan menores tiempos de control y mantenimiento
- Admiten fluctuaciones de caudal y de carga orgánica
- No crean lodos filamentosos y permiten un óptimo proceso de sedimentación
- Permiten eliminación de nitrógeno y fósforo con más facilidad respecto a los tratamientos convencionales
- Tienen una gran flexibilidad de funcionamiento en función de la duración de los ciclos y del modo de operar
- Permiten reconocer y corregir rápidamente cualquier problema de decantación
- Los microorganismos que se crean en los reactores SBR tienen una gran capacidad para adaptarse a efluentes con gran contenido en sales.

Inconvenientes del sistema SBR

- Para evitar cualquier problema se necesita un mínimo de dos tanques
- Existen desequilibrios de la carga hidráulica y a carga contaminante entre ambos depósitos, porque el tiempo de llenado depende del caudal de entrada
- La eliminación biológica de nutrientes requiere un aporte continuo de carga orgánica
- Llenado: el agua residual cruda entra, después del pretratamiento, en el primer compartimento más pequeño del reactor (reactor preliminar)
- Reacción: el agua residual en esta fase se alternan periodos aeróbicos y anaeróbicos, cuyos tiempos dependen de las características de las aguas residuales que estamos tratando

Figura 14. Reactor SBR



Fuente: (<https://ecodena.com.gt/wp-content/uploads/2022/07/>)

Tanque RAS

El Tanque de Lodos Activados de Retorno (RAS) es el sistema de bombeo y tuberías encargado de transportar los sólidos sedimentados en el clarificador o sedimentador secundario nuevamente al reactor biológico (tanque de aireación). Estos sólidos, denominados lodos activados, están compuestos por una alta concentración de microorganismos saludables y activos que son responsables de la depuración de la materia orgánica y los nutrientes en el agua residual.

El proceso RAS es esencial para mantener una concentración adecuada y una población activa de microorganismos en el reactor, lo cual se mide típicamente como la Concentración de Sólidos Suspendidos del Licor Mezclado (MLSS). Sin la recirculación de los lodos, la biomasa sería arrastrada fuera del sistema con el efluente final, comprometiendo la eficiencia del tratamiento biológico.

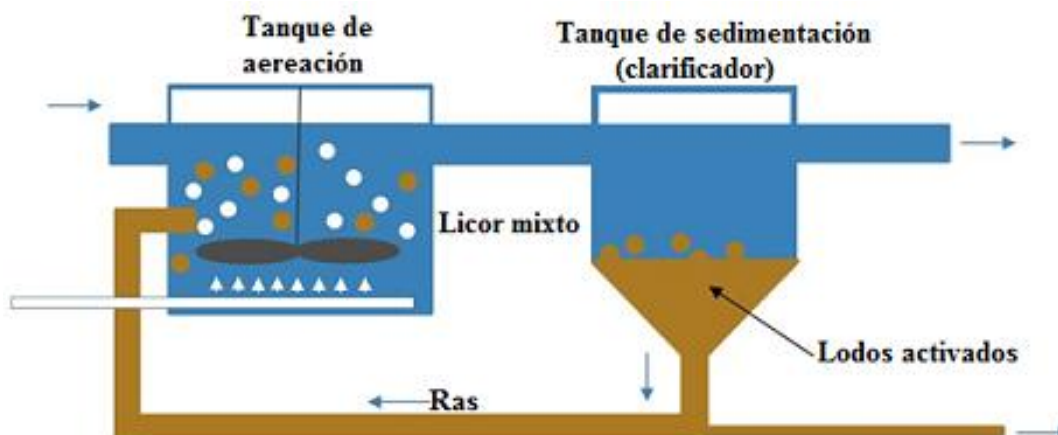
Características de Funcionamiento

Las características de un sistema RAS

- **Mantenimiento de la Biomasa Activa:** El objetivo principal es recircular los microorganismos que se han sedimentado en el clarificador. Esto asegura que haya una alta concentración de biomasa viable en el reactor biológico para degradar la nueva carga contaminante que ingresa.
- **Control de la Edad del Lodo:** La cantidad de lodo que se recircula y la que se purga son parámetros cruciales de operación. Controlar la tasa de retorno de lodos permite a los operadores gestionar la "edad" de la población microbiana. Una mayor edad de lodo favorece el crecimiento de bacterias de crecimiento lento, como las nitrificantes, que son esenciales para la remoción de nitrógeno.
- **Sistema de Bombeo y Tuberías:** El "tanque" RAS es, en realidad, un pozo o una cámara de recolección en la base del sedimentador secundario, de donde las bombas de retorno de lodos (bombas RAS) impulsan el lodo de nuevo al inicio del reactor de aireación. El caudal de estas bombas es un parámetro de control directo.
- **Impacto en la Clarificación:** La calidad de la recirculación del lodo activado está directamente ligada a la capacidad de sedimentación de los flóculos microbianos. Una

buena sedimentabilidad es crucial; de lo contrario, el lodo no se asentará en el clarificador y será arrastrado al efluente final, resultando en una pérdida de biomasa y un efluente de mala calidad.

Figura 15. Tanque Ras



Fuente: <https://croipaia.com/wp-content/uploads/Lodos-activados->

2.9. Tratamientos terciarios

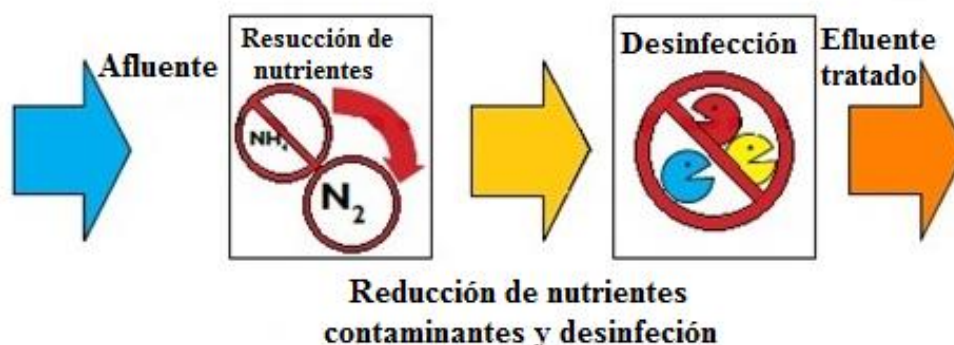
Se define como el tratamiento adicional necesario para la eliminación de los sólidos suspendidos no tratados en las etapas anteriores y de las sustancias disueltas que permanecen en el agua residual después del tratamiento secundario convencional. Estas sustancias pueden ser materia orgánica o inorgánica, en forma de sólidos suspendidos, y su naturaleza puede variar desde iones inorgánicos relativamente simples, como el calcio, el potasio, el sulfato, el nitrato y el fosfato, hasta un número cada vez mayor de compuestos orgánicos sintéticos muy complejos.

El propósito del tratamiento terciario es reducir el número de organismos vivos a niveles aceptables que permitan el posterior reúso de las aguas, o simplemente para alcanzar los niveles de concentración establecidos por norma cuando se realizan las descargas a los cuerpos de agua. También sirve para la reducir la carga de nutrientes causantes de la eutrofización de los cuerpos de agua.

Algunos de los elementos más empleados en el tratamiento están:

- Tanque de Almacenamiento de lodos
- Tanque de Almacenamiento de Efluente
- Humedales con flujo subsuperficial

Figura 16. Tratamiento terciario



Fuente: Terán, 2004

Tanque de Almacenamiento de lodos

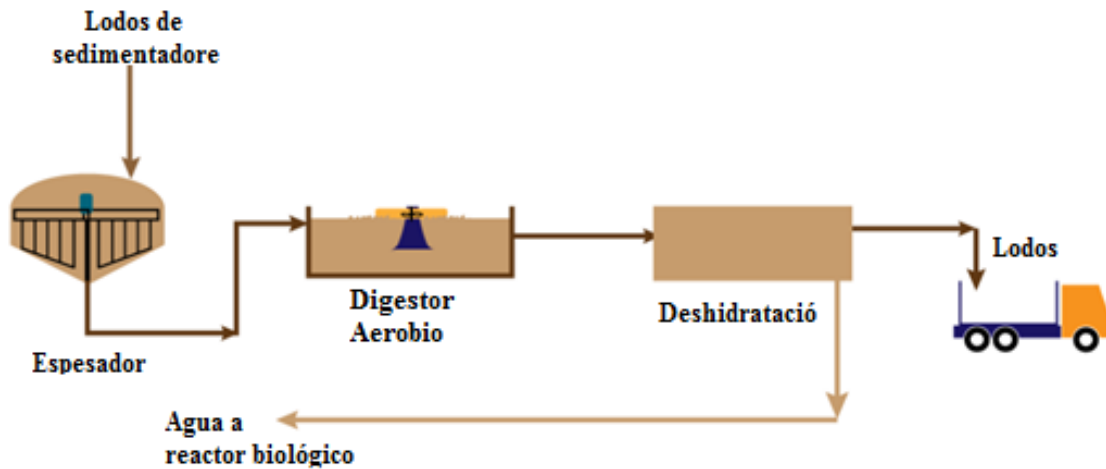
Los lodos son una mezcla de materiales líquidos y sólidos que se han eliminado del sistema de tratamiento. Esencialmente, es el desperdicio del proceso de tratamiento de aguas residuales. Los lodos se componen de materia orgánica e inorgánica. Después de dejar el clarificador, los lodos se transfieren a los tanques designados, que en consecuencia se llaman tanques de lodo. Estos tanques también pueden ser referidos como espesante de lodos, la balsa, decantador o digestor (no debe confundirse con un digestor aeróbico). Después de que los lodos finalmente salen del tanque, se deshidratan a través de una prensa de lodos y se retira. Los tanques de lodos también se utilizan porque permiten a las instalaciones de tratamiento de agua eliminar y almacenar grandes cantidades de residuos líquidos y sólidos, para que puedan seguir tratando las aguas residuales de una manera más eficiente.

Los objetivos principales de los tanques de lodos son:

- Aumente la digestión. Al aumentar el tiempo de contacto, la biología puede digerir aún más los componentes orgánicos de los lodos.

- Espesar el lodo separando el líquido de los componentes sólidos. Utilizando la gravedad, el lodo se asienta en la parte inferior del tanque y el agua se puede decantarse, o quitarse, de la parte superior.
- Actuar como un contenedor de almacenamiento antes de ser enviado para eliminación.

Figura 17. Tratamiento terciario

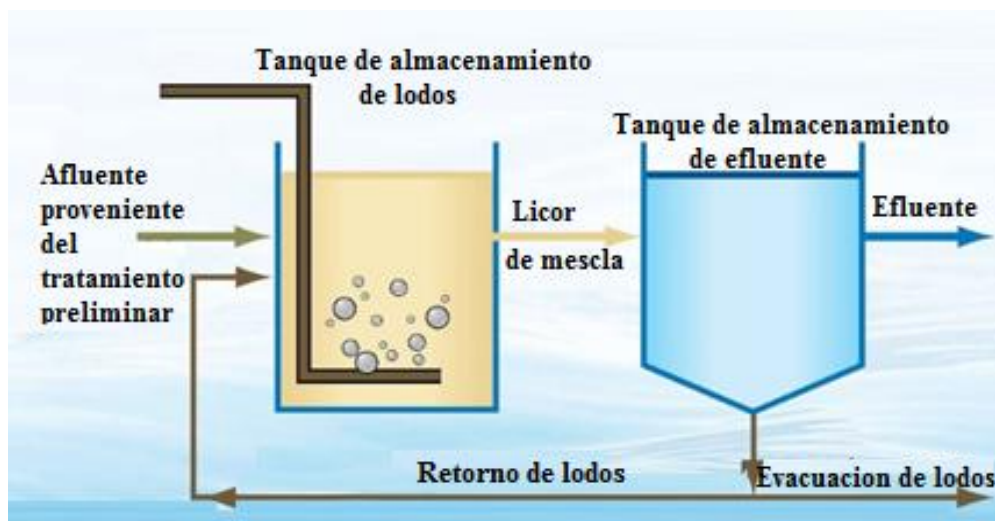


Fuente: <https://www.mdgbio.com/uncategorized/4746/>

Tanque de Almacenamiento de Efluente

Este tanque almacena el agua tratada proveniente del proceso de decantación del tanque SBR. Posteriormente esta agua tratada se puede descargar fuera del sistema por gravedad o por bombeo hacia su destino final porque ya está tratada.

Figura 18. Tratamiento terciario



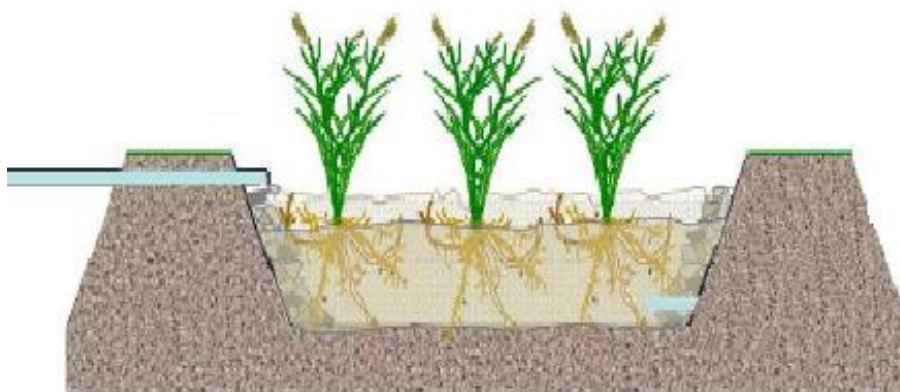
Fuente: <https://spenagroup.com/digestion-de-lodos-y-sistemas-de-digestion-de-residuos>

Humedales de Flujo libre o superficial

Los humedales de flujo libre o superficial con espejo de agua libre son balsas, una ciénaga, pantano o canales con la superficie del agua expuesta a la atmósfera.

Es un sistema parecido a las lagunas con vegetación, donde solo las plantas se encargan de tratar las impurezas y absorber la materia orgánica.

Figura 19. Humedal artificial de flujo libre o superficial (HFL)



Fuente: García y Corzo, 2008.

2.12. Situación actual de PTAR en Bolivia (mayo 2010-octubre 2013)

El tratamiento de aguas residuales se puede clasificar en cuatro tipos, de acuerdo a los procesos y operaciones que se llevan a cabo. Éstos son el pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

Para poder realizar una mejor evaluación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, las siguientes tablas nos muestran las ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento de aguas residuales detallados anteriormente.

Tabla2. Ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento

Tratamiento preliminar – acondicionamiento del agua		
TRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
REJAS MANUALES	Eficiencia en la separación de sólidos Flotantes, especialmente plásticos. No requiere mano de obra especializada Fácil de construir con materiales locales.	Material se corroe rápido si no se protege. Requiere mantenimiento diario para la relación de material flotante atrapado.
REJAS AUTOMÁTICAS	Se puede separar material flotante más fino. No requiere intervención en la recolección de flotantes. La recolección es automática con tiempo programado.	Utiliza energía eléctrica. Requiere operación y mantenimiento constante. Usan motores y partes mecánicas no producidos en el país.
DESARENADORES	Son fáciles de construir y usan material local. Pueden ser usados en conjunción con medidores de caudal. Operación manual que no requiere personal capacitado.	Requieren al menos dos estructuras en paralelo por mantenimiento. Requieren que una vez colmatada la tolva se saque el material sedimentado. Requiere tratamiento de lodo acumulado

Tratamientos de bajo producción – sistemas biológicos		
TRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CÁMARAS SÉPTICAS	» Tecnología empleada ampliamente en poblaciones rurales y áreas periurbanas. » Construcción con elementos locales » No requiere especialización en personal para el manejo y operación. » Baja la carga de DBO hasta un 40%. » Se puede mejorar rendimiento con adición de químicos. » Ocupan poco terreno. » Construcción por lo general subterránea, que ayuda con generación de olores.	» Muy poca o ninguna remoción de patógenos. » Requiere mantenimiento periódico. » Los lodos producidos deben ser tratados. » Muy peligroso cuando se hace mantenimiento por los gases tóxicos y producidos. » Requiere de mantenimientos posteriores para su uso para agua de riego. » Con químicos se produce más lodos y se necesita personal especializado. » Solo para pequeñas poblaciones.
TANQUES IMHOFF	» Tecnología conocida y empleada mayormente en poblaciones rurales » Construcción con elementos locales » Tiene cámara de sedimentación y biodigestores en un solo reactor » Baja la carga DBO hasta en un 40% » Ocupan poco terreno » Producen un lodo estable.	» Muy poca o ninguna remoción de patógenos. » Requiere mantenimiento periódico. » Los lodos producidos deben ser extraídos con periodicidad y tratados. » La cama de sedimentación tiende a obstruirse fácilmente. » Requiere de tratamientos posteriores para su uso como agua de riego. » Construcción profunda no recomendable cuando el nivel freático está alto. » genera malos olores » Requiere de personal entrenado.
FILTRO ANAEROBIO	» Tecnología empleada ampliamente en poblaciones rurales. » Construcción con elementos locales. » No requiere especialización de personal para el manejo y operación. » Baja la carga del DBO hasta en un 40%. » Lodo estabilizado. » Ocupan poco terreno. » Construcción general subterránea, que ayuda con generación de olores.	» Poca producción de patógenos. » El mantenimiento es dificultoso. » Requiere tiempo para generar bacterias acostumbradas al medio. » Produce olor.

Tratamientos de baja producción – sistemas biológicos

LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

- » Tecnología conocida y ampliamente utilizada en el país.
- » Construcción con elementos locales.
- » requiere poca operación y mantenimiento
- » Reduce patógenos cuando se usan lagunas facultativas y de maduración.
- » No usa energía adicional a la gravitatoria.
- » reduce grandemente la DBO hasta el 99%
- » Actúa como reservorio de regulación para sistemas de riego.
- » se requiere una gran superficie
- » Las lagunas anaerobias son profundas; no se usa con nivel freático alto.
- » Si se sobrecargan producen malos olores.
- » La evaporación es grande en climas áridos.
- » Si no se maneja bien el pelo de agua, gran producción de mosquitos
- » Existe rechazo en la población a esta solución.

HUMEDALES

- » Tecnología conocida ampliamente utilizada en el país.
- » Contrición con elementos locales.
- » Requiere poca operación y mantenimiento.
- » Reduce patógenos, las plantas fijan metales pesados.
- » No usan energía adicional ala gravitatoria.
- » Se requiere superficie de tamaño medio.
- » Si no se cosechan plantas hay sobre población que afecta al paisaje.
- » Requieren de geomembranas para no contaminar el subsuelo.
- » Requiere una cuidadosa selección del medio filtrante.
- » requieren de plantas que se adapten al liquido
- » Humedales de flujo superficial conllevan gran población de mosquitos

Tratamiento de alta producción		
Tratamiento	Ventajas	desventajas
REACTOR UASB REATOR (RAFA) REACTOR (RALF)	» Tecnología ampliamente en el contexto internacional. » Construcción con elementos locales. » Ocupa poco terreno. » Baja la carga de DBO hasta en un 50%. » Los olores son conocidos en el reactor eliminados por ventilación. » Producen un lodo estable.	» Poca reducción de patógenos. » Muy inestable con cambios bruscos de temperatura. » Requiere de operación y mantenimiento constante. » Requiere de personal especializado. » Requiere de laboratorio para control de pH, alcalidad. » Requiere inóculo para generar el manto suspendido. » En invierno puede necesitar fuente de calor
DESINFECCION POR RAYOS ULTRAVIOLETAS	» No se produce elementos tóxicos o cancerígenos. » Efectiva reducción de patógenos. » Tecnología simple de fácil manejo.	» La lámina de agua debe ser pequeña (cm). » El agua no debe contener sedimentos. » Necesita mantenimiento intensivo de las lámparas. » No se debe tener flujo turbulento.
LAGUNAS AIREADAS + LAGUNA DE SEDIMENTACION	» tecnología conocida » Construcción de las lagunas con elementos locales. » Reduce patógenos muy efectivamente. » No requiere etapa previa de sedimentación. » No produce olor.	» Requiere electricidad para los aireadores. » Aireadores se debe importar. » Se requiere personal de mantenimiento. » Los lodos deben ser tratados para reducir patógenos. » Si no se maneja bien puede haber gran producción de mosquito.

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2013 la Paz-Bolivia)

2.13. Eficiencia de remoción

En las siguientes tablas se muestra algunos parámetros usuales para caracterizar las aguas residuales, tomando en cuenta la eficiencia en la remoción, los valores expuestos en dicha tabla pueden ser considerados como valores representativos.

Tabla3. Eficiencia de remoción según diferentes autores

Unidades de tratamiento	Eficiencia en la remoción de contribuyentes, porcentaje						
	DBO	DQO	SS	P	N org	NH3-N	Patógenos
Rejilla	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.
Desarenadores	0-5	0-5	0-10	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.
Sedimentadores primarios	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0	Desp.
Lodos activados (convencional)	80-95	80-95	80-90	10-25	15-20	8-15	Desp.
Filtro percolador							
• Alta tasa, roca	65-80	60-80	60-80	8-12	15-50	8-15	Desp.
• Súper tasa, plástico	65-85	65-85	65-85	8-12	15-50	8-15	
Cloración	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	100
Reactor UASB	65-80	60-80	60-70	30-40	---	---	Desp.
Reactor RAP	65-80	60-80	60-70	30-40	---	---	Desp.
Filtros anaerobios	65-80	60-80	60-70	30-40	---	---	Desp.
Laguna de oxidación							
• Lagunas anaerobias	50-70	---	20-60	---	---	---	90-99.99
• Lagunas aireadas	80-95	---	85-95	---	---	---	90-99.99
• Lagunas facultativas	80-90	---	63-75	30	---	---	90-99.99
• Lagunas de maduración	60-80	---	85-95	---	---	---	90-99.99
Ultra violeta	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	100

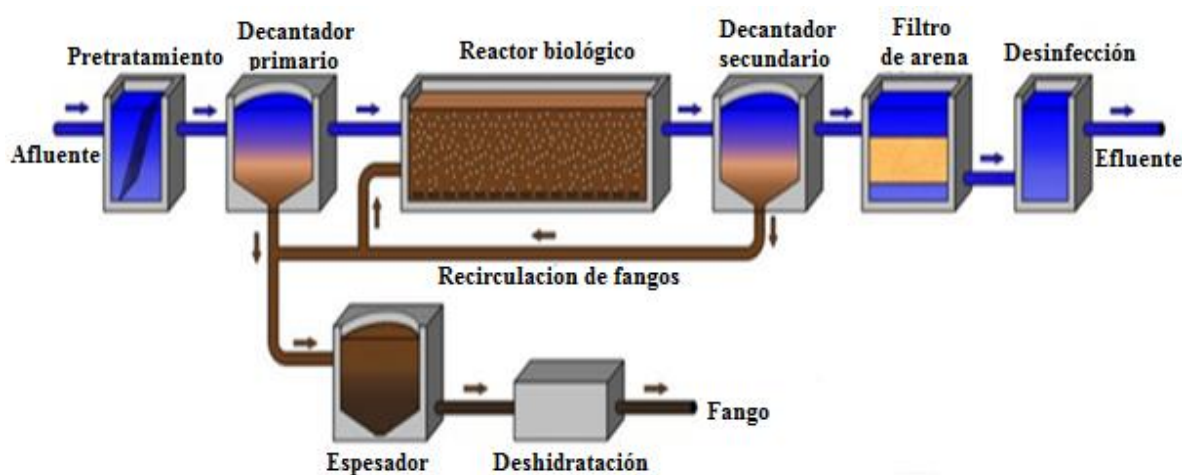
Fuente: Jairo Romero Rojas, Diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales
 Los procesos de tratamiento de aguas residuales se clasifican en: Tratamiento primario, secundario y terciario

2.14. Producción de lodos

Los principales constituyentes del agua residual eliminados en la planta de tratamiento incluyen basuras, arenas, espumas y lodo. El lodo extraído y producido en las operaciones y procesos de tratamientos de las aguas residuales generalmente suele ser un líquido o líquido semisólido con gran contenido de sólido entre el 0.25% y el 12% en peso. El lodo es, por mucho, el constituyente de mayor volumen eliminado en los tratamientos. Su tratamiento y evacuación es probablemente, el problema más complejo al que se enfrentan los ingenieros sanitarios.

Los lodos separados en el sedimentador primario y aquellos producidos en el tratamiento biológico deben ser estabilizados, espesados y desinfectados antes de ser retirados del sitio de tratamiento. A continuación, se analiza el proceso que se utiliza para reducir el contenido de agua y materia orgánica del lodo, y se utilizan además para acondicionar el fango para su reutilización o evacuación final.

Figura 20. Flujo de producción de lodos primarios y secundarios



Fuente. Wagner, 2010

Estabilización de lodos

El término estabilización puede considerarse como el proceso o el conjunto de procesos que dan como producto final un lodo con características tales que después del proceso puede ser usado sin que comprometa la salud pública o al medio ambiente.

La estabilización de lodo se lleva a cabo principalmente para reducir la presencia de patógenos, eliminar los olores desagradables, reducir o eliminar su potencial de putrefacción, la supervivencia de microorganismos patógenos y la proliferación de olores el lodo se producen cuando se permite que los microorganismos se desarrollan sobre la fracción orgánica del mismo.

Las técnicas de estabilización de lodos más recurridas son; la indigestión anaerobia; la digestión aerobia; estabilización con cal; y el compostaje.

En Latinoamérica se calcula normalmente con un valor del lodo de 50 l/(hab.año).

Los métodos más comunes para estabilizar los lodos son:

- Digestión anaerobia
- Digestión aerobia
- Composteo
- Estabilización con cal
- Incineración

Aprovechamiento y disposición de lodos.

La producción de lodos en una planta de tratamiento, puede traer también ciertos beneficios dependiendo del tratamiento o destino que se les dé. Las principales formas de aprovechamiento son como fuente de energía o mejoradores de suelo en la agricultura también pueden ser usados para acelerar la restauración ecológica de terrenos afectados por incendios forestales y para rellenar huecos formados por bancos de materiales.

2.15. La digestión anaerobia

Se realiza en un estanque cerrado llamado digestor y no requiere la presencia de oxígeno pues es realizada por bacterias que se desarrollan en su ausencia. Para el óptimo crecimiento de estos microorganismos se requiere una temperatura de 35 °C. Las bacterias anaerobias degradan la materia orgánica presente en el agua servida, en una primera fase, a ácido propiónico, ácido acético y otros compuestos intermedios, para posteriormente dar como producto final metano (60 - 70 %), anhídrido carbónico (30%) y trazas de amoníaco, nitrógeno, anhídrido sulfuroso e hidrógeno. El metano y el anhídrido carbónico son inodoros;

en cambio, el ácido propiónico tiene olor a queso rancio y el ácido acético tiene un olor a vinagre.

2.16. La digestión aerobia

Se realiza en un estanque abierto y requiere la presencia de oxígeno y, por tanto, la inyección de aire u oxígeno. En este caso la digestión de la materia orgánica es efectuada por bacterias aerobias, las que realizan su actividad a temperatura ambiente. El producto final de esta digestión es anhídrido carbónico y agua. No se produce metano. Este proceso bien efectuado no produce olores.

2.17. Parámetros básicos de diseño de plantas de tratamientos de aguas residuales.

En el dimensionamiento de las unidades de tratamiento y accesorios complementarios, así como otros componentes, serán tomados en cuenta entre los elementos obtenidos, los siguientes "Parámetros Básicos": El caudal máximo, medio y mínimo, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO 5 días y 20 °C) y materia en suspensión (en mg/l) y los sólidos sedimentables (ml/l), temperatura, pH, DBO sedimentable.

Se podrán utilizar los diferentes caudales (máximo, medio y mínimo) para el dimensionamiento o verificación de funcionamiento de las diferentes unidades de tratamiento, según sus características.

Carga orgánica

El parámetro de carga orgánica a ser asumido tiene un valor de DBO igual a 54 gr/hab.día.

2.18. Medición de caudal

En cualquier proyecto de estación de tratamiento debe ser incluido un sistema de medición de caudal, compatible con la dimensión de la propia PTAR. Esto posibilita, a su vez, ajustar las condiciones operativas de las distintas etapas del tratamiento, así como obtener el coste del tratamiento por unidad de volumen tratado. Este sistema comprenderá:

- a) Medición de caudal afluente y/o efluente de las aguas residuales.
- b) Medición del caudal de lodo activado recirculado y en exceso, en el caso de proceso de lodos activados, excluyendo los sistemas de tratamiento.

2.19. Estudios de caracterización del agua residual

Los estudios de caracterización del agua residual están encaminados a determinar; las características físicas, químicas y biológicas del agua y las concentraciones de los constituyentes del agua residual, y los medios óptimos para reducir las concentraciones de contaminantes.

Muestreo

Se toman muestras para hacer el análisis de la calidad del agua, con el objetivo que se tenga conocimiento del funcionamiento y la eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Existen cuatro principios importantes en la toma de muestras

En general, el objetivo es lograr una muestra de una composición representativa que nos indique el estado promedio de la PTAR. Es por eso que estos cuatro principios nos ayudarán a conseguir una muestra con esas cualidades:

- **Lugar:** elegir un lugar adecuado para tomar la muestra.
- **Tiempo:** considerar el tiempo adecuado para tomar la muestra.
- **Frecuencia:** tomar las muestras en la frecuencia adecuada.
- **Técnica:** usar una técnica del muestreo adecuada.

2.20. Operación y mantenimiento de sistemas de tratamientos de aguas residuales.

2.20.1. Operación

Operar es hacer funcionar en forma correcta el sistema de alcantarillado y de tratamiento de aguas residuales a través de un trabajo permanente y responsable en las instalaciones y equipos, para tener un servicio constante, evitar la contaminación del ambiente y, sobre todo, asegurar la satisfacción de los usuarios.

Si el sistema no funciona bien, los usuarios no estarán contentos y rehusaran pagar sus tarifas, si no se pagan las tarifas, no habrá recursos para operar y mantener el sistema. De esta manera se genera un círculo vicioso que terminara con la destrucción del sistema de alcantarillado.

Para operar un sistema de alcantarillado y su planta de tratamiento es necesario contar con los planos de construcción, los cuales deben ser entregados por la empresa constructora o el financiador al Gobierno Municipal y a la entidad responsable de la operación del sistema. No tener los planos del sistema es cómo manejar un camión sin volante o camión a ciegas.

2.20.2. Mantenimiento

Mantenimiento significa todas las actividades desarrolladas con el fin de conservar las instalaciones y equipos en condiciones de funcionamiento seguro, eficiente y económico. Como objetivo básico, el mantenimiento procura contribuir por todos los medios disponibles, reducir en lo posible el costo de operación de la planta y cumplir de manera adecuada con su objetivo de construcción. De lo anterior se desprende un objetivo técnico que trata de conservar en condiciones de funcionamiento seguro y eficiente todo el equipo, tanto maquinaria como estructura, de tratamiento de las aguas residuales se conocen dos tipos de mantenimiento preventivo y correctivo.

Mantenimiento preventivo

Es el conjunto de actividades que se llevan a cabo en un equipo, instrumento o estructura, con el propósito de que opere a su máxima eficiencia, evitando que produzcan paros forzados o imprevistos.

Este sistema requerido de un alto grado de conocimiento y una organización muy eficiente. Consiste en elaborar un plan de inspección para los distintos equipos de la planta, a través de una buena planificación, programación, control y ejecución de actividades para descubrir y corregir deficiencias que puedan ser causa de daños más graves posteriormente

Mantenimiento correctivo

Es el conjunto de actividades que se deben llevar a cabo cuando un equipo, instrumento o estructura ha tenido un paro forzado o imprevisto, debido al funcionamiento inadecuado. Este es el sistema más generalizado, debido a se requiere de menor conocimiento y organización.

Cuando se hace mantenimiento preventivo dentro de un sistema correctivo, a este se le llama “mantenimiento rutinario”. Cuando se hace mantenimiento correctivo en un sistema

preventivo, se llama “corrección de falla”, En la práctica, no es posible tener a los dos sistemas como procesos totalmente diferenciados.

2.21. Reusó de aguas residuales tratadas

2.21.1. Panorama del reusó

El aumento de la demanda de agua en sitios donde este recurso es escaso, o donde hay una alta competencia por el mismo, crea la necesidad de utilizar las denominadas “fuentes de agua no convencionales”, entre las que se encuentra el reúso de las aguas tratadas.

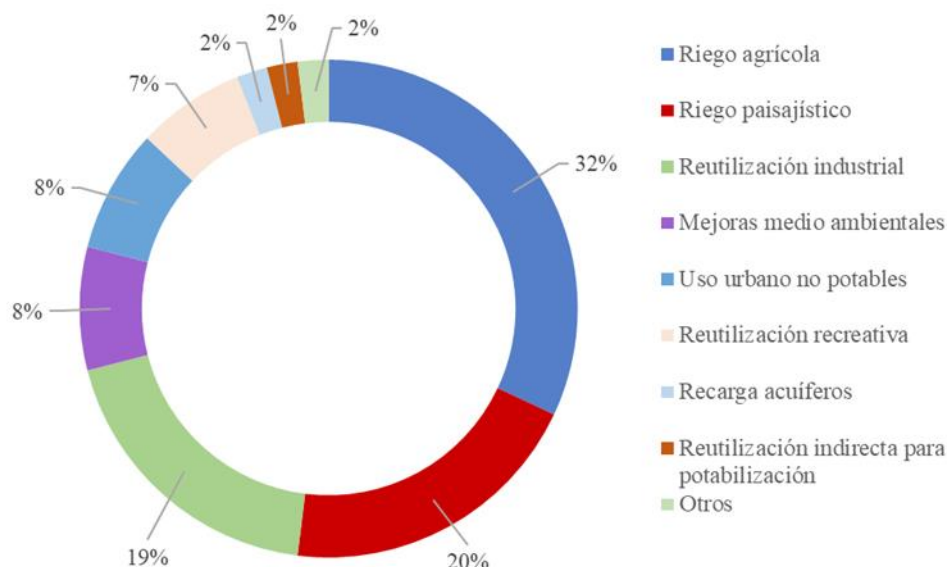
La regeneración y el reúso de las aguas tratadas se han convertido en una opción atractiva para conservar y ampliar la disponibilidad de agua y es una medida para cumplir tres objetivos fundamentales, dentro de la perspectiva de gestión integrada de los recursos hídricos:

- Reducir la carga de contaminantes y su descarga en los cuerpos de agua receptores, mejorando el estado cualitativo de los cuerpos de agua superficiales, aguas subterráneas y de los suelos.
- Aliviar la escasez del recurso, mediante la promoción del uso eficiente del agua, mejorando su conservación, reduciendo el desperdicio y equilibrando la balanza de demanda de agua a largo plazo con la oferta.
- Contribuir a la seguridad alimentaria, para una producción de mayor cantidad de alimentos reduciendo la necesidad de fertilizantes, a través de la reutilización de aguas tratadas.

2.21.2. Tipos de reusó

El agua tratada se reúsa para diversos fines. A nivel mundial, el riego agrícola es la principal aplicación para el reúso del agua, con el 32% del agua regenerada utilizada para este fin. Otros usos importantes son el riego de zonas ajardinadas (20%) y los usos industriales (19%). (Figura 10.1) (GWI, 2012).

Figura 21. Reutilización global del agua después del tratamiento avanzado (terciario): cuota de mercado por aplicación.



Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

En la siguiente Tabla se detallan las aplicaciones más usuales de las aguas residuales regeneradas.

Tabla4. Usos más frecuentes del agua regenerada

Tipo de uso	Usos
Urbano	Riego de parques públicos, instalaciones deportivas, jardines, márgenes de caminos, limpieza de calles, sistema de protección contra incendios, lavado de vehículos, lavado de inodoros, aires acondicionados, control de polvo, limpieza de alcantarillas
Agrícola	Cultivos alimenticios no procesados comercialmente, cultivos alimentarios comercialmente procesados, pastos para animales, forraje, fibras, cultivos de sencillas, flores ornamentales, huertos, cultivos hidropónicos, acuicultura, invernaderos, viticultura.
Industrial	Procesamiento de agua, agua de refrigeración, recirculación de aguas de refrigeración, agua de lavado, fabricación de hormigón, compactación del suelo, control del polvo
Recreativo	Riego de campos de golf, embalses con/sin acceso público (por ejemplo, pesca, baño), fabricación de nieve.
Ambiental	Recarga de acuíferos, humedales, marismas, aumento de recursos para aguas superficiales, hábitats silvestres, silvicultura.
Potable	Recarga de acuíferos para uso de agua potable, aumento de fuentes superficiales para el suministro de agua potable, tratamiento hasta la calidad del agua potable

Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

2.21.3. Beneficios y riesgos del reúso de las aguas tratadas

El reúso desempeña un papel importante en la planificación y administración del uso eficiente de los recursos hídricos, pues se trata de un suministro de agua fiable, bastante independiente de sequías estacionales y de la variabilidad climática, y que es capaz de cubrir picos de demanda de agua, permitiendo a las comunidades depender menos de las tradicionales fuentes de agua superficiales o subterráneas.

Sin embargo, el reúso de aguas tratadas también implica riesgos, que deben conocerse y gestionarse. Al considerar la introducción de un esquema de reúso de aguas tratadas, es importante examinar toda la gama de beneficios y riesgos que pueden surgir.

Si el agua residual no se ha tratado adecuadamente antes de ser reutilizada, las personas pueden quedar expuestas a agentes patógenos y a sustancias químicas, por la formación de aerosoles durante el riego, por contacto directo con el agua, por pozos contaminados con estas aguas, o por el consumo de cultivos no lavados adecuadamente o sin cocer, en los que los patógenos pueden permanecer activos.

Los riesgos más importantes para la salud que puede entrañar el reúso de las aguas tratadas se deben a la presencia de microorganismos patógenos: virus, bacterias, parásitos (huevos de helmintos y protozoos) y de contaminantes químicos.

Los principales riesgos se centran en las enfermedades diarreicas y en las infecciones helmínticas. La experiencia recomienda el empleo de indicadores indirectos de la contaminación microbiológica, que pueden usarse fácilmente para analizar el agua tratada en busca de agentes peligrosos para la salud humana. En la siguiente Tabla se muestran los principales organismos indicadores de patógenos presentes en el agua residual.

Tabla5. Organismos indicadores para patógenos humanos aguas residuales (adaptado de WHO, 2006 en internacional wáter manogement institute (IWMI 2016)

Patógenos humanos	Organismos indicadores	Comentarios
Bacterias: Shgella, legionella pneumophila, Salmonela, E. coli enterotoxigenica, Campylobacter, Vibrio cholerae	E. coli. Coliformes ter- motolerantes. Entero- cocos intestinales	Utilizado durante más de 100 años como modelo para bacterias patógenas. El comportamiento en condiciones ambientales refleja los patógenos entéricos. Pero no las bacterias ambientales.
Virus: Adenovirus, rotavirus, enterovirus, virus de la hepatitis A. norovirus	Bacteriofagos – colifagos-somáticos o colifagos de F-ARN	Los bacteriófagos son virus que infectan bacterias. Se consideran no patógenos para los humanos y se pueden cultivar fácilmente y enumerar en el laboratorio.
Protozoos: (oo)quistes de Cryptosporidium y Giardia	Clostridium perfringens	Bacteria formadora de esporas, que es altamente resistente a las condiciones ambientales. Modelo útil para (oo) quistes de cryptosporidium y guardia.
Helmintos: Ascaris, Trichuris y Taenia	Huevos de helmintos o de Ascaris	

Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

Las siguientes tablas muestran los agentes químicos y contaminantes emergentes presentes en las aguas tratadas y sus posibles efectos adversos para la salud humana y para el medioambiente.

Tabla6. Agentes químicos en agua tratada y sus efectos adversos (EPA, 2004; EPHC, NRMMC, AHMC, 2006)

Agentes químicos	Efectos adversos
Orgánicos biodegradables (proteínas, carbohidratos).	Condiciones anóxicas en ecosistemas acuáticas.
Aceites, grasas, celulosa, lignina	Condiciones anóxicas en ecosistemas acuáticas.
Macronutrientes (N, P, K)	Eutrofización de suelos y aguas superficiales, toxicidad, desequilibrio de nutrientes, plagas, enfermedades en las plantas, pérdidas de biodiversidad.
Micronutrientes (B, Ca, Cu, Fe, Mg, Na, Co)	Toxicidad para las plantas, acumulación en suelos
Metales (Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn)	Toxicidad para las plantas y la biota acuática
Sales inorgánicas (cloruros, sulfatos y nitratos de sodio, potasio, calcio, magnesio)	Salinización del suelo, aumento de la salinidad del agua subterránea y riesgo para la salud humana. Sodificación y desestructuración de suelos, e incluso problemas de impermeabilización del suelo.

Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

Tabla7. Contaminantes en aguas y sus efectos adversos (EPA, 2024; EPHC, NRMMC, AHMC, 2006)

Contaminantes emergentes	Efectos adversos
Productos farmacéuticos y sus metabolitos antibacterianos (sulfametoxazol), analgésicos (acetaminofeno, ibuprofeno) betabloqueantes (atenolol), antiepilépticos (fenitoína, carbamazepina), antibióticos humanos (azitromicina) y anticonceptivos orales (etinilestradiol)	Efectos cancerígenos, teratogénicos y/o mutagénicos, riesgo para la salud humana (cianotoxinas), bioacumulación, toxicidad para las plantas posibles efectos aun no descubiertos.
Productos de cuidado personal (triclosan, ingredientes de protección solar, fragancias, pigmentos)	
Productos químicos para el hogar y aditivos alimentarios (sucralosa, bisfenol A (BPA), ftalato de dibutilo, polietoxilatos de alquifenol), retardadores de llama (ácido perfluorooctanoico, sulfonato de perfluorooctano)	
Pesticidas, biocidas y herbicidas (atrazina, lindano, diuron, fipronil, etc)	
Disruptores endocrinos	

Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

2.21.4. Pautas y normativas sobre el reúso de las aguas tratadas

A continuación, se analizan, con un mayor grado de detalle, las normativas de la OMS, la Unión Europea y México. Esta selección de normativas viene justificada en el caso de la OMS por tratarse de la norma internacional de referencia por excelencia, en el caso de la Unión Europea por ser la norma más actualizada y, por último, en el caso de México, por tratarse del país latinoamericano más relevante que cuenta con norma de reúso. También, se trata el caso de Bolivia (Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021).

Directrices de la OMS

Tabla8. objetivos basados en la salud y objetivos de reducción de helmintos para el uso de agua residuales tratadas en la agricultura		
Tipo de riego	Objetivo basado en la salud para patógenos virales, bacterianos y protozoos	Objetivo de reducción para huevos de helmintos
Sin restricciones	$\leq 10^6$ DAI Y por persona y año ¹	≤ 1 por litro (media aritmética) ²³
Restringido	$\leq 10^6$ DAI Y por persona y año ¹	≤ 1 por litro (media aritmética) ²³
Localizado (por ejempló, por goteo)	$\leq 10^6$ DAI Y por persona y año ¹	a) Cultivos de ciclo corto ≤ 1 por litro (media aritmética) b) Cultivos de ciclo largo no existente

1. El objetivo basado en la salud se puede lograr, para el riego sin restricciones y localizado, mediante una reducción de organismos patógenos de 6-7 unidades logarítmicas, obtenida mediante la combinación del tratamiento de las aguas residuales con otras medidas de protección de la salud. Para el riego restringido el objetivo se logra mediante una reducción de los organismos patógenos de 2-3 unidades logarítmicas.
2. Cuando estén expuestos niños menores de 15 años, deben tomarse medidas adicionales para la protección de su salud.
3. Se debe determinar la media aritmética durante toda la temporada de riego. El valor medio de ≤ 1 huevo de helmintos por litro debe alcanzarse para al menos el 90% de las muestras. Con algunas tecnologías de tratamiento, como es el caso de las Lagunas de Estabilización, se puede emplear el tiempo de retención hidráulica como sustituto para garantizar el cumplimiento del requisito de ≤ 1 huevo por litro.
4. Los cultivos de ciclo largo incluyen: árboles frutales, olivos, etc.
5. No se deben recoger los frutos del suelo.

Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

Normativa de la Unión Europea (UE)

Tabla9. Requisitos de calidad del agua reusada para riego agrícola

Clase de calidad del agua reusada	Tipo de tratamiento	Requisitos de calidad				
		E. coli(n ² /100L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)	Turbidez (NTU)	OTROS
A	Tratamiento secundario. Filtración y desinfección	≤10	≤10	≤10	≤5	Legionella spp; <1000 UFC/1. Cuando haya riesgo de aerosolización. Nematodos intestinales (huevos de helmintos): ≤ 1huevo/L para irrigación de pastos o forraje
B	Tratamiento secundario y desinfección	≤100			-	
C	Tratamiento secundario y desinfección	≤1000	De acuerdo a la directiva 91/271 CEE (Anexo I, tabla 1)	De acuerdo a la directiva 91/271 CEE (Anexo I, tabla 1)	-	
D	Tratamiento secundario y desinfección	≤10000			-	

Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

Tabla10. Grupos de calidad en función de los límites bacteriológicos

USOS		Valor máximo admisible VMA			
		Calidad	E coli UFC/100 mL	Nematodos huevos/10L	Legionella spp. UFC/L
Industrial 3.2 a)	Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.	A	Ausencia	1	Ausencia
Urbano 1.1 a) y b)	Riego de jardines privados. Descarga de aparatos sanitarios		Ausencia	1	100
Ambiental 5.2 a)	Recarga de acuíferos por inyección directa		Ausencia	1	No se fija límite
Urbano 1.1 a), b), c) y d)	Riego zonas verdes urbanas. Baldeo de calles, sistema contra incendios y lavado de vehículos.	B	200	1	100
Agrícola 2.1 a)	Riego agrícola sin restricción, riego de campos de golf		100	1	1000
Recreativo 4.1 a)	Riego agrícola sin restricción, riego de campos de golf		200	1	100
Agrícola 2.2 a), b) y c)	Riego de productos agrícolas para consumo humano en fresco.	C	1000	1 ²	No se fija límite

	Riego de pastos para animales productores acuicultura				
Industrial 3.1 c)	Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria.		1000	1	100
Ambiental 5.1 a)	Recarga de acuíferos por percolación a través del terreno		1000	No se fija limite	No se fija limite
Agrícola 2.3 a) b) c)	Riego de cultivos leñosos sin contacto con los frutos. Riego de cultivos de flores viveros e invernaderos, sin contacto con producción, riego de cultivos industriales no alimentarios.	D	10000	1	100
Industrial 3.1 a) b)	Otros usos industriales		10000	No se fija limite	100
Recreativo 4.2 a)	Estanque, masas de agua y caudales ornamentales, con acceso impedido al público.		10000	No se fija limite	No se fija limite
Ambiental 5.3 a) b)	Riego de bosques y zonas verdes no accesibles al público silvicultura	E	No se fija limite	No se fija limite	No se fija limite
Ambiental 5.4 a)	Mantenimiento de humedales, caudales mínimos	F	Calidad requerida se estudiará caso por caso		

Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

Normativa de México

Tabla 11. NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permitidos de contaminantes. Promedio mensual

Tipo de reúso	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Huevo de helminto (huevo/L)	Aceites y grasas (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
Servicios públicos con contacto directo	240	1	15	20	20
Servicio al público con contacto indirecto u ocasional	1000	5	15	30	30

Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

Normativa de Bolivia

Si se decide reusar el efluente de la nueva PTAR a construir, deben establecerse las características exigidas para el efluente regenerado, en función del uso o los usos a que se vaya a destinar. En este caso, el sistema de depuración debe incorporar los tratamientos necesarios para permitir la regeneración del efluente.

El RMCH recoge, en su cuadro n°1, la clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso. Estos usos son:

USO 1: para abastecimiento doméstico de agua potable después de: a. Sólo una desinfección y ningún tratamiento (Clase A). b. Tratamiento solamente físico y desinfección (Clase B) c. Tratamiento físico-químico completo: coagulación, floculación, filtración y desinfección (Clase C). d. Almacenamiento prolongado o presedimentación, seguidos de tratamiento, al igual que c) (Clase D).
USO 2: para recreación de contacto primario: natación, esquí, inmersión (Clases A, B y C).
USO 3: para protección de los recursos hidrobiológicos (Clases A, B y C)
USO 4: para riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cáscara delgada, que sean ingeridas crudas sin remoción de ella (Clases A y B).
USO 5: para abastecimiento industrial (Clases A, B, C y D).
USO 6: para la cría natural y/o intensiva (acuicultura) de especies destinadas a la alimentación humana (Clases A, B y C).
USO 7: para abrevadero de animales (Clases B y C).
USO 8: para la navegación (Clases B, C y D).

Fuente: Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento. Bolivia 2021.

La Tabla 12 muestra los valores máximos admisibles de parámetros indicadores de contaminación en reúso de aguas para los usos mencionados anteriormente. En las últimas filas de esta tabla se presentan los valores admisibles de los nutrientes: nitrógeno (como nitrógeno total, amoníaco, nitritos y nitratos), y fósforo (como fosfatos).

Tabla12. Valores máximos admisibles de parámetros indicadores de contaminación

	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
Sólidos sedimentables (mg/L)	<10	30 <0,1 mL/L	<50 <1ml/l	<100 <1 ml/l
DBO ₅ (mg/L)	<2	<5	<20	<30
DQO (mg/L)	<5	<10	<40	<60
Coliformes fecales (NMP/100mL)	<50 y<5 en 80% de muestra	<1.000 y < 200 en 80% de muestras	<5.000 y < 1000 en 80% de muestras	<50.000 y < 5000 en 80% de muestras
Parásitos (N/L)	<1	<1	<1	<1
Fosfato total (mgPO ₄ /L)	0,4	0,5	1	1
Amoniaco (mgNH ₃ /L)	0,05	1	2	4
Nitrato (mg NO ₃ /L)	20,0	50,0	50,0	50,0
Nitrato (mg N/L)	<1,0	1,0	1,0	1,0
Nitrógeno total (mg N/L)	5	12	12	12

Fuente: Guía Técnica para el Reúso de Aguas Residuales en la Agricultura

Debe resaltarse, que en el Reglamento se contempla el reúso indirecto de los efluentes tratados en las PTAR, es decir, una vez que se han diluido con las aguas de los cuerpos receptores.

CAPÍTULO III

3. MARCO LEGAL

3.1. Leyes y normativas vigentes

Todos proyectos de desarrollo se basan en las normativas, que establecen las normas de los recursos hídricos y sus servicios, que tiene por objeto establecer las normas que regulan todas las actividades, en el territorio nacional, que hacen uso y aprovechamiento de los recursos hídricos, sus servicios y el marco institucional la que los rige; así como las actividades y procesos susceptibles de afectar la calidad y cantidad de los recursos hídricos en cualquiera de sus estados.

En Bolivia no existe una ley específica que regule el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, las leyes están basadas en la protección del medio ambiente.

Constitución Política del Estado (CPE)

La Constitución Política del Estado fue promulgada el 7 de febrero de 2009, cuenta con un capítulo sobre recursos hídricos y otro de medio ambiente, entre los que podemos destacar para el presente trabajo:

En el **Título II** Medio Ambiente, Recursos Naturales, Tierra y Territorio, el artículo 342 establece que es deber del Estado y de la población conservar, proteger y aprovechar de manera sustentable los recursos naturales y la biodiversidad, así como mantener el equilibrio del medio ambiente.

En **capítulo Quinto** referente a Recursos Hídricos, reglamenta todo el marco de uso y aprovechamiento de los recursos hídricos:

La CPE, en el artículo 342, indica que:

- Es deber del Estado y de la población conservar, proteger y aprovechar de manera sustentable los recursos naturales y la biodiversidad, así como mantener el equilibrio del medio ambiente.

El Artículo 373 señala lo siguiente:

I. El agua constituye un derecho fundamentalísimo para la vida, en el marco de la soberanía del pueblo. El Estado promoverá el uso y acceso al agua sobre la base de principios de solidaridad, complementariedad, reciprocidad, equidad, diversidad y sustentabilidad.

II. Los recursos hídricos en todos sus estados, superficiales y subterráneos, constituyen recursos finitos, vulnerables, estratégicos y cumplen una función social, cultural y ambiental. Estos recursos no podrán ser objeto de apropiaciones privadas y tanto ellos como sus servicios no serán concesionados y están sujetos a un régimen de licencias, registros y autorizaciones conforme a Ley.

El artículo 374 establece que:

I. El Estado protegerá y garantizará el uso prioritario del agua para la vida. Es deber del Estado gestionar, regular, proteger y planificar el uso adecuado y sustentable de los recursos hídricos, con participación social, garantizando el acceso al agua a todos sus habitantes. La ley establecerá las condiciones y limitaciones de todos los usos.

Ley 1333 de Medio Ambiente

Promulgada el 27 de abril de 1992, tiene por objeto la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre con relación a la naturaleza y promoviendo el desarrollo sostenible con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población. Mediante Decreto Supremo 24176, del 8 de diciembre de 1995, se aprueba la reglamentación a la Ley 1333, con 6 reglamentos que son:

- Reglamento General de Gestión Ambiental
- Reglamento de Prevención y Control Ambiental
- Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica
- Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica
- Reglamento para actividades con Sustancias Peligrosas
- Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos

De los reglamentos mencionados, dos de ellos tienen que ver directamente con el uso de las ARD tratadas; éstos son:

Reglamento de Prevención y Control Ambiental

Esta disposición legal reglamenta la Ley de Medio Ambiente 1333 en lo referente a Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y Control de Calidad Ambiental (CCA) dentro del marco del desarrollo sustentable. Entre los instrumentos normativos reglamentados en este Reglamento están los siguientes:

- Ficha Ambiental (FA)
- Declaratoria de Impacto Ambiental (DIA)
- Manifiesto Ambiental (MA)
- Declaratoria de Adecuación Ambiental (DAA)
- Auditorías Ambientales (AA)
- Licencias y Permisos

Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica

Esta disposición legal reglamenta la Ley de Medio Ambiente 1333, en lo referente a la prevención y control de la contaminación hídrica, en el marco del desarrollo sustentable, dentro del reglamento se especifican:

- Límites permisibles de contaminación hídrica
- Procedimientos técnico - administrativos
- Descargas al alcantarillado y a cuerpos de agua
- Monitoreo y evaluación de la calidad hídrica
- Uso de aguas según calidad
- Prevención y control de la contaminación
- Conservación del recurso

Algunas características técnicas de calidad de agua que se deben cumplir, entre ellos están:

3.2. Límites máximos admisibles en cuerpos receptores

Características de las aguas residuales de acuerdo al grado de contaminación

La Tabla 13 muestra los parámetros empleados para cuantificar los cuatro tipos de contaminantes descritos, junto a sus concentraciones habituales, según se trate de aguas residuales urbanas de contaminación fuerte, media o débil.

Tabla 13. Características de las aguas residuales urbanas.

	Contaminación fuerte	Contaminación media	Contaminación débil
Sólidos en suspensión (mg/L)	350	220	100
DBO ₅ (mg/L)	400	220	110
DQO (mg/L)	1.00'	500	250
COT (mg/L)	290	160	80
N _T (mg N/L)	85	40	20
N _{orgánico} (mg N/L)	35	15	8
N _{amoniaco} (mg N/L)	50	25	12
P _T (mg P/L)	15	8	4
P _{orgánico} (mg P/L)	5	3	1
P _{inorgánico} (mg P/L)	10	5	3
Coliformes totales (NMP/100 mL)	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁶ -10 ⁷
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁵ -10 ⁶

Materia en suspensión
 nutrientes
 materia orgánica
 organismos patógenos

Fuente: Guía Técnica para el Reúso de Aguas Residuales en la Agricultura

3.3. Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso (4 Clases)

Esta 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, 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 pre sedimentación, 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.

Tabla14. Valores máximos admisibles de parámetros indicadores de contaminación.

	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
Sólidos sedimentables (mg/L)	<10	30 <0,1 mL/L	<50 <1ml/l	<100 <1 ml/l
DBO ₅ (mg/L)	<2	<5	<20	<30
DQO (mg/L)	<5	<10	<40	<60
Coliformes fecales (NMP/100mL)	<50 y <5 en 80% de muestra	<1.000 y < 200 en 80% de muestras	<5.000 y < 1000 en 80% de muestras	<50.000 y < 5000 en 80% de muestras
Parásitos (N/L)	<1	<1	<1	<1
Fosfato total (mgPO ₄ /L)	0,4	0,5	1	1
Amoniaco (mgNH ₃ /L)	0,05	1	2	4
Nitrato (mg NO ₃ /L)	20,0	50,0	50,0	50,0
Nitrato (mg N/L)	<1,0	1,0	1,0	1,0
Nitrógeno total (mg N/L)	5	12	12	12

Fuente: Guía Técnica para el Reúso de Aguas Residuales en la Agricultura

Tabla15. Valores máximos admisibles (CLASE D) según Cuadro N° A-1 del RMCH.

Parámetros	Valor máximo
DBO ₅ (mg/L)	<30
DQO (mg/L)	<60
Amoniaco (mg NH ₃ /L)	4
Nitrógeno total (mg N/L)	12
Nitrato (mg NO ₃ /L)	50,0
Nitrito (mg N/L)	1,0
Fosfato total (mg PO ₄ /L)	1,0
Coliformes fecales (NMP/100Ml)	<5.000 y <50. 000 en el 80% de las muestras

Nota: no se recogen los valores de los sólidos en suspensión, pero sí de los “sólidos sedimentarios”.

Fuente: Guía Técnica para el Reúso de Aguas Residuales en la Agricultura

La clasificación CLASE “D” aguas de calidad mínima, que requieren un proceso inicial de pre sedimentación, pues pueden tener una elevada turbiedad por elevado contenido de sólidos en suspensión, y luego tratamiento físico químico completo y desinfección bacteriológica.

Tabla 16. Límites permisibles para descargas líquidas según el Anexo A-2 del RMCH.

Parámetro	DIARIO	MES
Sólidos en suspensión (mg/L)	60,0	
DBO ₅ (mg/L)	80,0	
DQO (mg/L)	250,0	
Amonio (mg N/L)	4,0	2,0
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	1.000	

Nota: en la tabla, la columna con el epígrafe DIARIO recoge los valores picos diarios permitidos para los diferentes parámetros, mientras que la columna con el epígrafe MES, presenta los promedios mensuales máximos permitidos de estos parámetros

Fuente: Guía Técnica para el Reúso de Aguas Residuales en la Agricultura

Los límites permisibles habituales en el diseño de PTAR que se muestran en la Tabla 15. Debe hacerse constar que son medidos a la salida de las PTAR. En relación con otras normativas de vertido, destaca la elevada exigencia impuesta a la concentración de amonio en los efluentes tratados en las PTAR, y más aun teniendo en cuenta que es un límite de emisión, pero no hay que olvidar el carácter de transitoriedad de estos requisitos, hasta el momento en que se definan finalmente las calidades de los cuerpos de agua.

3.4. Marco Institucional

3.4.1 Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA)

El Ministerio de Medio Ambiente y Agua (creado el año 2009 D.S 29894) con sus tres viceministerios: Agua Potable y Saneamiento Básico, Recursos Hídricos y Riego, y Medio Ambiente Biodiversidad Cambio Climático y Gestión Forestal, es la instancia gubernamental encargada de la política, normas y desarrollo del sector agua en Bolivia.

De acuerdo al Plan Estratégico Institucional, la visión del MMAyA es promover, proteger y administrar de manera sustentable los recursos y servicios ambientales, generando condiciones para el desarrollo económico y social del país.

Para cumplir con esta visión, la misión del MMAyA es desarrollar y ejecutar políticas públicas, normas, planes, programas y proyectos para la conservación, adaptación y aprovechamiento sustentable de los recursos ambientales, así como el desarrollo de riego y

saneamiento básico con enfoque integral de cuencas, preservando el medio ambiente, garantizando el uso prioritario del agua para la vida, respetando usos y costumbres para “VIVIR BIEN”.

3.4.2 Viceministerio de Recursos Hídricos y de Riego (VRHR)

Su principal función es la de contribuir al desarrollo y ejecución de planes, políticas y normas de Manejo Integral de Cuencas y de Riego, además del diseño de estrategias para la conservación, uso y aprovechamiento de los recursos hídricos en todos sus estados, superficiales y subterráneos con los diferentes actores involucrados en la gestión ambiental de las cuencas hidrográficas, respetando los usos y costumbres.

3.4.3 Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico (VAPSB)

Su principal función es la de formular e implementar políticas, planes y normas para el desarrollo y mejoramiento de los servicios de Agua Potable y Saneamiento Básico, así como la implementación de programas sostenibles de saneamiento básico (agua potable, alcantarillado sanitario, baños ecológicos, residuos sólidos y drenaje pluvial) que permitan el acceso pleno y la expansión de los servicios, en el marco de la gestión integral de recursos hídricos y de residuos sólidos.

3.4.4 Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (AAPS)

La Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico, es una institución pública técnica y operativa, con personalidad jurídica y patrimonio, independencia administrativa, financiera, legal y técnica, supeditada al Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

Fiscaliza, controla, supervisa y regula los servicios de Agua Potable y Saneamiento Básico, considerando la Ley No. 2066 de Prestación y Utilización de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario.

3.4.5 Servicio Nacional para la Sostenibilidad de los Servicios en Saneamiento Básico (SENASBA)

Institución pública descentralizada, con autonomía de gestión administrativa, financiera, legal y técnica, bajo tuición del Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Esta institución tiene la misión de coadyuvar a los procesos de fortalecimiento y sostenibilidad de las entidades operadoras y prestadoras de servicio de agua potable y saneamiento básico en Bolivia.

En ese sentido, el SENASBA se ocupa de ofrecer asistencia técnica a los operadores de agua potable y saneamiento básico; implementar el desarrollo comunitario DESCOM; brindar fortalecimiento institucional; difundir experiencias positivas en agua potable y saneamiento básico; ejecutar políticas y estrategias en el sector de agua y saneamiento orientadas a la sostenibilidad.

3.4.6 Gobiernos Autónomos Departamentales (GAD)

- Ejecutar programas y proyectos de los servicios de agua potable y alcantarillado, conforme a la Constitución Política del Estado en el marco del régimen hídrico y de sus servicios y las políticas establecidas por el nivel central del Estado.
- Proveer los servicios de agua potable y alcantarillado a través de entidades públicas, cooperativas, comunitarias o mixtas sin fines de lucro, conforme a la Constitución Política del Estado y en el marco de las políticas establecidas en el nivel central del Estado.
- Aprobar las tasas de los servicios públicos de agua potable y alcantarillado cuando estos presten el servicio de forma directa.
- Tienen la competencia exclusiva del alcantarillado y establecimiento de las tasas sobre la misma.

3.4.7. Entidades prestadoras de servicios de agua potable y saneamiento (EPSA)

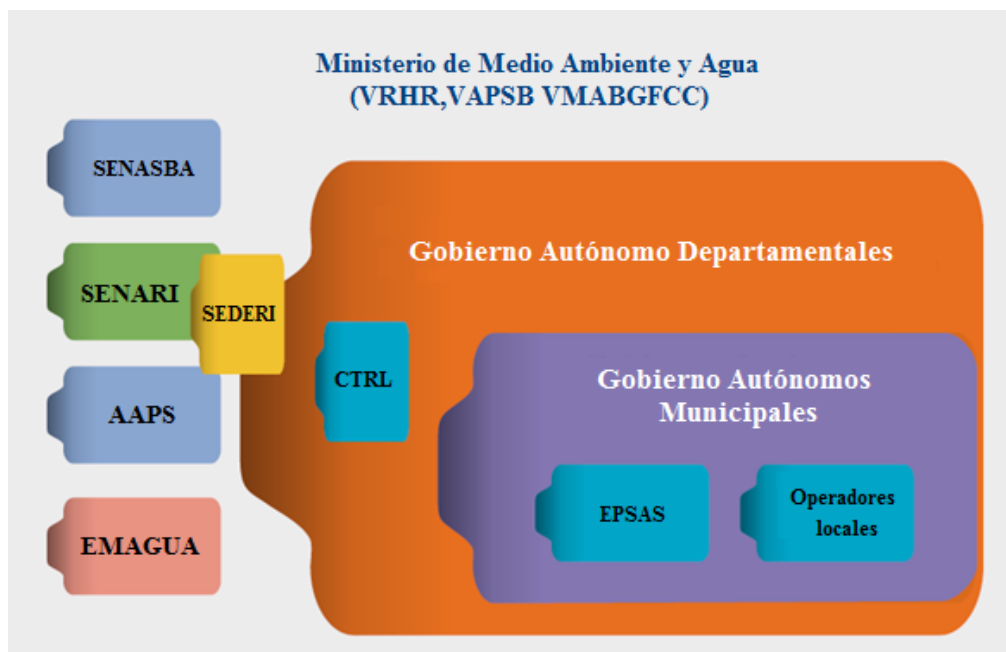
La EPSA es la entidad prestadora de servicios de agua potable y alcantarillado sanitario legalmente regularizada por la AAPS, que cuenta con personería jurídica y debe garantizar la calidad, cantidad y continuidad de los servicios que reciben los usuarios. La CPE y la Ley No. 2066 establecen las siguientes formas de constitución:

Entidades que prestan uno o ambos servicios de agua potable y saneamiento básico. Pueden tener diferentes formas de constitución: Pública Municipal, Cooperativa, Mancomunitaria Social, Comité de Agua y Saneamiento (CAPyS), Asociación Civil, Pueblos Indígenas y

Originarios, Comunidades Indígenas y Campesinas, Juntas Vecinales y cualquier otra organización que cuente con una estructura jurídica reconocida por ley.

En la provincia cercado la Empresa Prestadora de Servicio de Agua Potable (EPSA) es la empresa municipal de agua Potable y alcantarillado sanitario es COSAALT R.L.

Figura 22. Marco Institucional



Fuente: VRHR.2013

3.4.8. La Cooperativa de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de Tarija Limitada (COSAALT R.L.)

En la actualidad, mediante Resolución Administrativa Regulatoria AAPS N.º 251/2010 de fecha 14 de diciembre de 2010, la AAPS, en ejercicio de su competencia, confiere la Licencia del servicio de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de Tarija a COSAALT R.L.

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

Visión. Ser una EPSA líder en el Sur de Bolivia, comprometida con la mejora continua y sustentable de su capital humano y de los recursos que administra, capaz de dotar de un servicio de agua potable y alcantarillados continuo, oportuno y de calidad a la ciudad de Tarija. (Estudio de Precios y Tarifas de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario

"COSAAALT R.L.", 2019-2023; Estudio de Precios y Tarifas de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario "COSAAALT R.L.", 2019-2023)

3.4.9. Marco Normativo

La Norma Boliviana NB 688 "Instalaciones Sanitarias - Alcantarillado Sanitario, Pluvial y Tratamiento de aguas residuales (Segunda revisión)"

El uso de la norma, tiene como objetivo fundamental regular y ordenar el diseño y consecuentemente la construcción de los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario y plantas de tratamientos de aguas residuales, mejorando las condiciones de vida y salud de Bolivia.

Por tanto, la norma establece las condiciones a cumplir en el estudio y concepción de los sistemas de saneamiento básico, con el objeto de guiar a los proyectistas en todo lo referente al diseño, planificación y ejecución de los componentes de los sistemas. Además, el uso de la norma conlleva a una optimización de los parámetros y demás elementos de diseño, de tal manera que constituye una minimización de costos de construcción, calidad de materiales, etc.

Esta norma tiene como objetivo fundamental, regir el diseño y consecuentemente la construcción de los sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales y pluviales, para mejorar las condiciones de vida del ciudadano boliviano.

La presente norma se constituye en un instrumento que debe ser conocido y aplicado de forma obligatoria por los responsables de las diferentes etapas de implementación de proyectos de recolección y evacuación de aguas residuales y pluviales.

Esta norma establece disposiciones para las etapas de concepción, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y control de todas las obras, de tal manera que se garantice su efectividad, seguridad, estabilidad, durabilidad, calidad y sostenibilidad a lo largo de su vida útil.

3.4.10. Manual de operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales en poblaciones rurales (Viceministerio de saneamientos básicos)

El manual de operación y mantenimiento de sistemas de tratamientos de aguas residuales en poblaciones rurales, presenta los procedimientos esenciales para operar y mantener las

diferentes unidades de tratamientos de agua residual y sus obras complementarias, está destinado a los responsables y operadores de los servicios; como documento técnico y como guía para la capacitación en operación y mantenimiento de plantas de tratamiento.

Se espera que constituya un instrumento útil en el desafío de mantener servicios de alcantarillado en buen funcionamiento, que lleguen a satisfacer las expectativas y exigencias de los usuarios.

CAPÍTULO IV

4. INGENIERÍA DEL PROYECTO

4.1. Ubicación Geográfica

El barrio Catedral se encuentra en la provincia Cercado, del departamento de Tarija, Bolivia, Limita al norte con provincia Eustaquio Méndez, al este con la provincia O'Connor, al sur con la Aniceto Arce, y al oeste con provincia José Avilés

Su ubicación geográfica es:

21°32' 79`` Latitud Sud
64°54'31`` Longitud Oeste
1905 m.s.n.m. Altitud

Se presenta en la gráfica de la ubicación del municipio, respecto del contexto nacional.

Figura 23. Ubicación del departamento de Tarija



Fuente: <http://www.educa.com.bo/geografía/Bolivia-mapa>

Figura 24. Ubicación de la provincia Cercado del departamento de Tarija



Fuente: <http://www.educa.com.bo/geografía/departamento-Tarija-mapa>

Figura 25. Ubicación geográfica de la ciudad de Tarija



Fuente: <http://www.educa.com.bo/geografía/provincia- cercado-cercado-mapa>

La planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra ubicada en el barrio Catedral del distrito 13 de la provincia cercado del departamento de Tarija. En la siguiente imagen se indica la ubicación de la PTAR encerrada en círculo.

Fotografía 1. Localización satelital del proyecto



Fuente: Elaboración propia, Google Earth, 2020

El acceso a la zona del proyecto el proyecto se localiza a una distancia de 7 Km distante de la ciudad de Tarija y se recorre en un tiempo aproximado a 10 minutos en vehículo.

La accesibilidad es mediante una carretera asfaltada hasta el barrio catedral distante a 7 km de la ciudad de Tarija y un segundo tramo es de camino de tierra de 200 mts aproximadamente hasta el lugar donde se encuentra la planta de tratamientos de aguas residuales.

4.2. Descripción de la Red de Alcantarillado Sanitario del Barrio Catedral

El sistema de alcantarillado sanitario del barrio Catedral se encuentra administrada por la cooperativa de servicio de agua y alcantarillado de Tarija COSAALT R.L.

La población del barrio Catedral cuenta con un número aproximado de 170 usuarios conectados a la red de alcantarillado sanitario, donde los usuarios que tiene acceso a este servicio y cancelan su tarifa por el servicio prestado.

Las conexiones a la red de alcantarillado corresponden a los siguientes inmuebles: viviendas familiares, restaurantes, hospital, unidades educativas.

4.3. Descripción de la PTAR Catedral

4.3.1. Antecedentes y generalidades

La planta de tratamiento del barrio Catedral, fue construida en el año 2018 y puesta en funcionamiento a principios del año 2019, la encargada de la operación y mantenimiento es la cooperativa de servicios de agua y alcantarillado de Tarija COSAALT.R.L.

En esta institución encargada de la planta de tratamiento de aguas residuales se obtuvo datos de diseño de la planta de tratamiento, como memoria de cálculo, planos, calidad del agua, caudal, operación y manteniendo.

Se recurrió en busca de información en la cooperativa de servicio de agua y alcantarillado COSAALT L.R.” donde se consiguió una ficha técnica, con los siguientes parámetros de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 17. Parámetros básicos de diseño de la PTAR.

PARÁMETROS DE DISEÑO	
Caudal de diseño	1.6 L/s
Tiempo de retención	3.5 días
Cuerpos receptores	Rio Guadalquivir
Fecha puesta en funcionamiento	2019
Periodo o de diseño	20 AÑOS
Población futura	1103
Aria de la planta	500

Fuente: (Empresa Rothwell Water Co. Ltd., 2012)

Como parte del trabajo se realizó una entrevista al técnico de COSAALT R.L. Encargado de la operación y mantenimiento de la PTAR. La información que nos proporciona es la siguiente:

- La principal responsabilidad es la administración, operación y mantenimiento de la recolección y tratamiento de las aguas residuales.
- Posee información como ser: planos, informes, datos de calidades del agua, caudales y manuales.

- La cooperativa tiene los recursos necesarios para lograr la adecuada gestión de recolección y tratamiento de aguas residuales.
- El monitoreo es constante de la PTAR.

Actualmente el trabajo que realiza de operación es el siguiente:

- Limpieza de rejilla y sesto donde se encuentra la cámara de bombeo.
- Desyuyado del lugar de la planta de tratamiento.
- Retiro de lodos que se obtiene de los procesos de tratamiento, los cuales son trasladados en un camión cisterna a la planta de San Luis.

Indicó también que fue capacitado por parte de la empresa Rothwell Water Co. Ltd. para la correcta operación, y que recibe dotación de equipo de protección personal, y que percibe un salario que hacen de que la operación sea de manera eficiente.

Cuando detecta algunas fallas que necesitan mantenimiento de personal capacitado la entidad encargada siempre cuenta con el personal capacitado. Según la entrevista al operador.

Las instalaciones están dentro de un ambiente con techo y buena ventilación. El cerramiento perimetral está construido de postes de tubo galvanizado y malla olímpica y alambre de púas que se encuentra en perfecto estado.

Fotografía 2. Cerco perimetral de malla olímpica



Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Descripción general de los componentes

El afluente (aguas residuales domésticas) ingresa al tanque de ecualización, cuya función es la de captar el agua del afluente del alcantarillado, homogenizando la variabilidad de la calidad y volumen de las aguas para el apto funcionamiento de la PTAR.

El agua residual luego ingresa a un Pre-Tratamiento a través de una criba, lo cual es fundamental para acondicionar el agua residual hasta los parámetros de diseño requeridos. La criba de barras paralelas retiene sólidos gruesos y finos en el afluente como huesos, papel, bolsa, fibras, pelos, etc. Estas cribas prevendrán el daño en el equipamiento de la PTAR y la interferencia en proceso biológico, lo cual podría generar paradas innecesarias y mayor costo de mantenimiento.

A continuación, el flujo de las aguas residuales del afluente se divide entre las celdas anóxica y Anaeróbica con el fin de optimizar la eliminación de nitrógeno y fósforo biológico. Una fracción del 20% se ha asignado a la celda anóxica y un 80% a la celda Anaeróbica, según las características de diseño de la PTAR. Esta división de flujo se puede ajustar después del inicio, dependiendo de las características reales de las aguas residuales en el afluente.

Las celdas anóxica, Anaeróbica y Aeróbica se operan en serie con licor mixto que fluye de la celda anóxica a la celda Aeróbica de la misma manera que el proceso de lodos activados convencionales en serie, sin cambios en el modo de operación cíclica. Las celdas SBR 1 y SBR2 son celdas idénticas que operan de manera alternada.

En la celda anóxica se da la mayor eliminación de nitrógeno (des nitrificación). El nitrógeno se elimina mediante la des nitrificación de microorganismos a través de la reducción de nitrato a gas nitrógeno, que luego se retira del licor mixto.

La celda anaeróbica es una celda en la que los microorganismos heterótrofos facultativos convierten la DQO (orgánica) fácilmente biodegradable (fácilmente fermentable) en SCVFA (ácido graso volátil de cadena corta), que luego es retirado y almacenado por el organismo que acumula fósforo (PAO) como PHA (poli-3-hidroxialcanoatos) dentro del cuerpo celular. En este proceso se libera, además de materia orgánica, fósforo.

El agua residual luego ingresa a las celdas SBR 1 y SBR 2. Las celdas SBR 1 y SBR2 funcionan de manera alternada de forma cíclica. Cuando la celda SBR 2 funciona como

decantador del efluente tratado, la celda SBR 1 funcionará como una celda a DQO (orgánica) fácilmente biodegradable (fácilmente fermentable) en SCVFA (ácido graso volátil de cadena corta), que luego es retirado y almacenado por el organismo que acumula fósforo (PAO) como PHA (poli-3-hidroxialcanoatos) dentro del cuerpo celular. En este proceso se libera, además de materia orgánica, fósforo.

El agua residual luego fluye de la celda Anaeróbica a la celda Aeróbica. Este reactor que cuenta con aireación en su proceso, por lo que la fuente de asimilación principal de los microorganismos es el oxígeno. El objetivo principal de este proceso es la nitrificación.

En la celda Aeróbica la PAO utiliza el PHA almacenado como fuente de energía para captar el orto-fosfato y almacena el fosfato como poli fosfato dentro del cuerpo celular.

La eliminación del fósforo es luego activada a través de la eliminación del exceso de lodo activado del biorreactor C SBR.

De reciclaje de RAS / Tratamiento por lotes / Asentamiento inactivo en el mismo ciclo operativo. La celda SBR pasará por las tres fases de operación en el siguiente orden: reciclaje de RAS, tratamiento por lotes y asentamiento inactivo de forma secuencial.

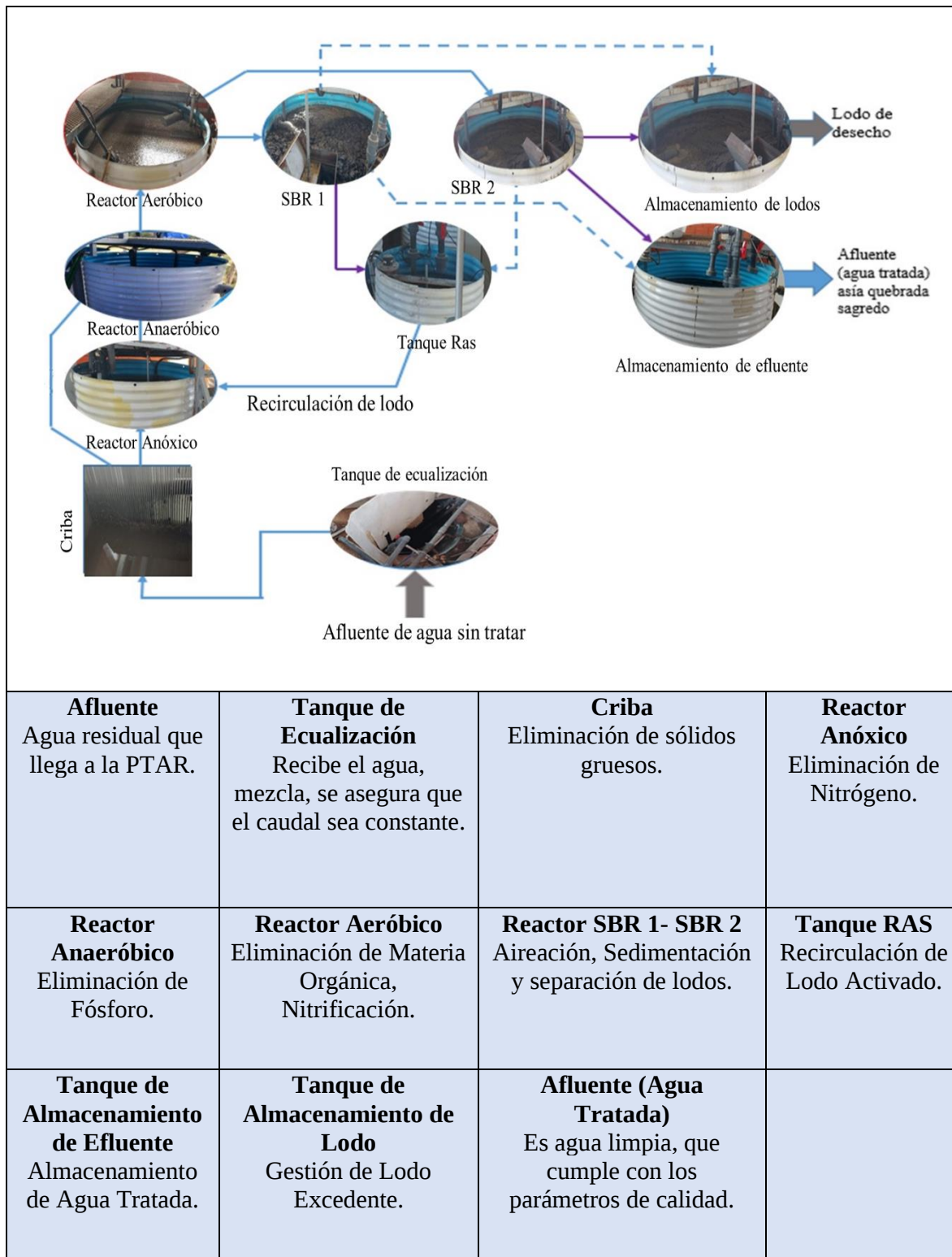
En la fase RAS, el equipo de aireación en la celda SBR 1 se enciende, bombeando el licor mixto de la celda SBR 1 hacia la Cámara RAS, para que la Cámara RAS luego lo recircule a la celda anóxica, recirculando el lodo activado acumulado en la celda SBR 1 durante el ciclo operativo anterior.

La aireación en la celda SBR 1 se puede activar y desactivar durante la fase RAS para optimizar la eliminación de nitrógeno del sistema CSBR. Una vez completada la fase RAS, la bomba RAS se apaga, lo que detiene el flujo de licor mixto a través de la celda SBR 1, convirtiendo la celda SBR 1 en una celda de tratamiento por lotes para un tratamiento adicional por lotes del contenido de la celda.

Al final del tratamiento por lotes, la aireación y la mezcla en la celda SBR 1 se apagan, creando un ambiente de asentamiento inactivo para la separación del efluente tratado final del lodo activado y preparando la celda para funcionar como una celda de decantación en el siguiente ciclo de operación.

Cuando la celda SBR 2 opera como decantador del efluente tratado, el efluente tratado decanta hacia el tanque de almacenamiento de efluente, donde luego será descargado por gravedad o bombeado fuera del sistema para el uso final que se requiera. Asimismo, los lodos en exceso del sistema son removidos por bombeo desde la celda SBR 2 hacia el tanque de almacenamiento de lodos de desecho, para su posterior disposición final fuera del sistema.

Figura 26. Esquema del tratamiento



Fuente: (Empresa Rothwell Water Co. Ltd., 2012)

4.3.2.1. Estructura de entrada a la planta de tratamiento de agua residual

El proceso comienza cuando el agua residual de la red de alcantarillado ingresa a una cámara de inspección. Posteriormente, fluye a través de una tubería de PVC de 4 pulgadas enterrada a una profundidad específica, hasta descargar en el tanque ecualizador. A partir de ahí, continúa con el tratamiento preliminar.

Nota sobre deficiencias: Se ha detectado que la estructura presenta deficiencias de limpieza.

Fotografia 3. Estructura de ingreso a la PTAR



Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2. Tratamiento preliminar

Los elementos que brindan el tratamiento preliminar son rejilla que se utiliza para la retención de sólidos grandes, se utilizará una cámara de rejillas, que estará colocada previo al pozo de bombeo, y posteriormente el cesto su principal objetivo es el de proteger las bombas y los demás equipos de los sólidos gruesos que puedan contener las aguas residuales.

Tanque de ecualización

La función del tanque ecualizador es de captar el agua residual del alcantarillado tanto como comerciales e industriales, estabilizar y homogenizando la variabilidad de la calidad y volumen de las aguas, para el apto funcionamiento de la planta.

- **Regulación de Caudal:** Al garantizar un caudal constante, los reactores, bombas y clarificadores posteriores servir como estructura de aforo es decir permitir medir caudales de aguas residuales que ingresa diariamente a la PTAR.
- **Homogeneización de Carga y Calidad (Amortiguación de Carga):** Mediante la mezcla del agua residual que ingresa, el tanque ecualizador homogeneiza la calidad del agua. Esto evita que lleguen concentraciones elevadas de contaminantes al proceso biológico, lo cual podría dañar a los microorganismos encargados de la depuración.

Fotografia 4. Tanque Ecualización



Fuente: Elaboración propia.

El tanque ecualizador, la estructura presenta algunas deficiencias de limpieza y de pintado.

Rejillas o cribas de barras

Se encuentra una sola rejilla y tienen como objetivo la remoción o detención de los materiales sólido de tamaño considerable, gruesos o en suspensión de mayor tamaño como palos, piedras, trapos, bolsas, etc., desde el tanque de ecualización los cuales pueden ser retirados manualmente, están formadas por barras separadas entre 1.0 a 5.0 cm colocadas en un ángulo de 30 a 60 grados respecto a la base.

Fotografía 5. Rejillas



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la fotografía a pesar de la instalación de la rejilla se permite circulación de sólidos, los cuales se representan en plásticos tales como envolturas de alimentos lo cual puede llegar a ocasionar el taponamiento.

Este paso de sólidos se debe a las situaciones: La primera, es que la limpieza de las rejillas no es continua lo cual ocasiona la acumulación y pasó de sólidos desde la rejilla hacia las siguientes unidades.

4.3.2.3. Tratamiento primario

Tanque Anóxico

El tanque anóxico se utiliza para llevar a cabo la des nitrificación, este es un proceso biológico el cual se genera por la asimilación bacteriana del Oxígeno de los Nitritos y Nitratos presentes en el lodo retornado de la etapa de clarificación, con este tratamiento se logra la reducción necesaria de Nitrógeno total para estar dentro de la norma de estos parámetros.

- Primer tanque de la secuencia de tratamiento.
- Su característica es la ausencia de oxígeno en su proceso, por lo que la fuente de asimilación de los microorganismos son los nitratos principalmente, sulfatos, hidrógeno y otros.
- Debido a eso, el objetivo principal de este proceso es la “des nitrificación”.
- Reactor cuya característica es la ausencia de oxígeno en su proceso. Debido a eso, el objetivo principal de este proceso es la des nitrificación ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$).

Fotografía 6. Tanque anóxico



Fuente: Elaboración Propia

Tanque Anaeróbico

EL Reactor Anaeróbico es una unidad de tratamiento biológico en la cual la materia orgánica presente en el agua residual es descompuesta por una comunidad de microorganismos en ausencia de oxígeno molecular (O_2).

La principal función de un reactor anaeróbico es lograr la estabilización y la reducción de la carga orgánica del agua residual antes de su descarga o de su paso a un tratamiento secundario aerobio. Específicamente:

- **Manto de Lodos:** El reactor opera con un denso lecho o manto de lodos en la parte inferior.
- **Flujo Ascendente:** El agua residual ingresa por el fondo y fluye hacia arriba, pasando a través del manto de lodos, donde se produce la digestión anaerobia.
- **Remoción de Carga Orgánica:** Transformar una porción significativa de la DBO5 y DQO soluble y particulada en biogás y una mínima producción de lodos estabilizados.

Fotografia 7. Tanque anaeróbico



Fuente: Elaboración Propia

Tanque Aeróbico MBBR

El Tanque Aeróbico MBBR o Reactor de Biopelícula de Lecho Móvil es un sistema de tratamiento biológico que combina características del proceso de lodos activados con la tecnología de biopelícula. Se define como un reactor de mezcla completa que contiene una gran cantidad de soportes plásticos móviles (medios). Son piezas pequeñas de material plástico con una densidad cercana a la del agua. Están diseñados con geometrías internas para maximizar la superficie activa protegida (m^2/m^3) donde crece el *biofilm*. Ocupan entre el 20% y el 70% del volumen del reactor. El objetivo principal es proporcionar una gran área superficial protegida para el crecimiento de una biopelícula de microorganismos, logrando así una alta concentración de biomasa activa.

La principal función del Tanque Aeróbico MBBR en la PTAR es lograr una alta eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos y nutrientes en un volumen reducido, sin depender de la sedimentación de lodo.

Fotografía 8. tanque Aeróbico



Fuente: Elaboración Propia

4.3.2.4. Tratamiento secundario

Tanque SBR

Un reactor biológico secuencial SBR (Sequential Biological Reactor) es un tipo de tratamiento biológico cuya característica principal es que utiliza un único depósito para realizar las operaciones habituales de una planta de lodos activados, aunque generalmente se suelen poner casi siempre dos depósitos en paralelo para alternar algunas fases del proceso de tratamiento.

- Este tanque, el sistema de tratamiento, opera mediante dos procesos biológicos: el anóxico y el aeróbico.
- Estos dos tanques operan en ciclos intercalados (2 horas) y se repite alternativamente cada ciclo: en un tanque se da el proceso de reacción, mientras que en el otro se da el proceso de decantación.
- Cuando el tanque se encuentra en proceso de reacción, se recirculan los lodos a través de la cámara RAS.
- Cuando el tanque se encuentra en proceso de decantación, se lleva el agua tratada al tanque de almacenamiento de efluente.
- Estos dos tanques operan en ciclos intercalados y se repite alternativamente cada ciclo: mientras en un tanque se da el proceso de reacción anóxica y aeróbica, en el otro se da el proceso de decantación (descarga del agua tratada).

Fotografia 9. Tanque SBR1



Fuente: Elaboración Propia

Fotografia 10. Tanque SBR2

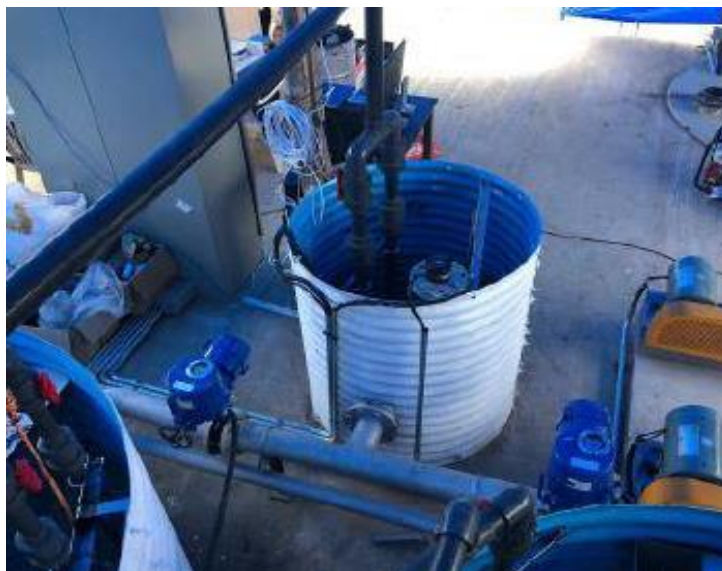


Fuente: Elaboración Propia

Tanque RAS

Este tanque acumula los lodos activados de retorno (RAS) descargados del tanque SBR en etapa de reacción y los recircula al tanque anóxico.

Fotografía 11. Tanque RAS



Fuente: Elaboración Propia

4.3.2.5. Tratamiento terciario

Tanque de Almacenamiento de Lodos

Los lodos en exceso del sistema son removidos por bombeo hacia este tanque, donde se almacenarán hasta ser trasladados a la PTAR San Luis para su disposición final.

Tanque de Almacenamiento de Efluente

Este tanque almacena el agua tratada proveniente del proceso de decantación del tanque SBR. Posteriormente esta agua tratada se puede descargar fuera del sistema por gravedad o por bombeo.

Fotografia 12. Tanque de almacenamiento de lodos y almacenamiento de efluente



Fuente: Elaboración Propia

Panel de Control CSBR

Panel que permite el control manual y automático del sistema SBR mediante dispositivos eléctricos, interruptores y un software de control.

Fotografia 13. Panel de control

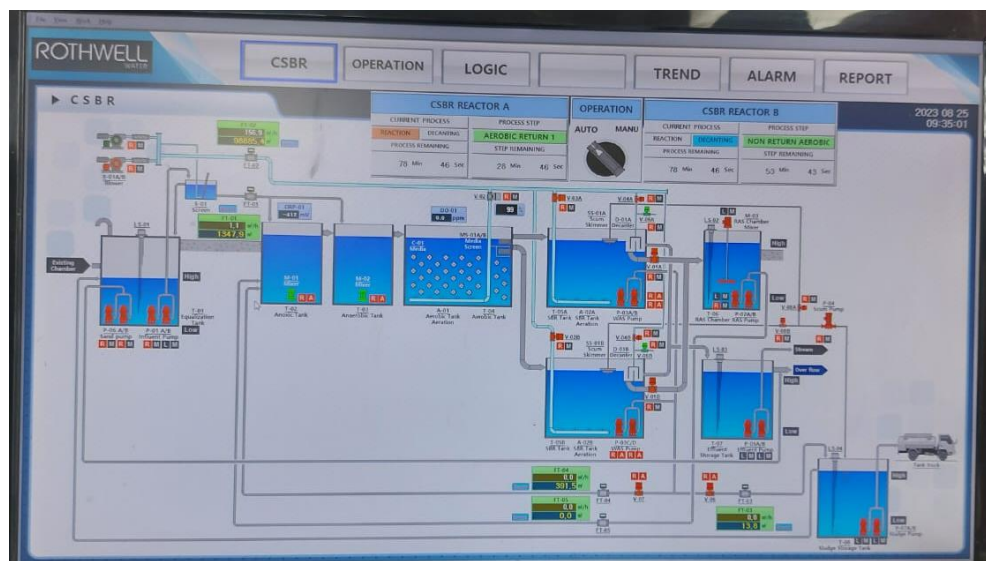


Fuente: Elaboración Propia

Pantalla de monitoreo de Operación HMI (Software de Control):

La pantalla CSBR muestra colectivamente el estado de operación del biorreactor operado actualmente, incluido el estado de operación del tanque de SBR, la etapa y el tiempo de tratamiento.

Fotografía 14. Sistema de monitoreo central



Fuente: Elaboración Propia

4.3.3. Personal operador

Operario de la planta es el personal asignado que al día estará 2 horas para verificar el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Según se muestra en el registro fotográfico el operador se encuentra operando los sistemas sin los mínimos elementos de seguridad industrial requerida para la operación de la PTAR. Se recomienda que la entidad encargada dote al personal con los elementos de protección para evitar riesgos de contaminación y accidentes laborales.

Fotografia 15. Seguridad industrial del personal de operación



Fuente: Elaboración propia.

Fotografia 16. Seguridad industrial del personal de operación



Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Operación y monitoreo

La planta de tratamiento cuenta con una caseta de operación y no así con un laboratorio para hacer ensayos y análisis de las muestras de agua. Los estudios y resultados se los hacen en los laboratorios de COSAALT R.L. ubicado en la zona de San Luis.

El operador de la planta fue capacitado para la operación de la planta es el encargado de operar y monitorear los equipos de la planta, hay otro personal encargado de hacer el mantenimiento de limpieza a las rejillas y al terreno en general, y se encarga de transportar a los lodos a la planta de San Luis. Esto se puede verificar por las condiciones en que se encuentra la PTAR estando en buenas condiciones de funcionamiento por la buena operación y mantenimiento.

La planta de tratamiento de agua residual del barrio Catedral cuenta con un manual de operación que estipula la frecuencia con la que se deben hacer los mantenimientos, y operación y monitoreo de cada estructura.

También se pudo evidenciar que existen controles o formularios de datos de información de la planta, esto porque se lleva un registro de cómo funciona la planta, y es claro que la operación de los sistemas de tratamiento está en óptimas condiciones.

4.3.5. Diagnóstico de la situación actual de la infraestructura

Se describen a continuación los aspectos más relevantes del estado actual de la PTAR:

Tabla 18. Observaciones del estado físico actual de los elementos de la PTAR

Fase	Elemento	Observación
Pre tratamiento	Tanque de Ecualización	Tanque de ecualización se encuentra en buen funcionamiento, aunque presenta muchas corrosiones por óxido debido a los residuos que ingresan.
	Criba	Las rejas de la planta son de operación manual, metálicas y actualmente encuentran en buen estado, además de que se observó que los operarios cumplen con la constante remoción de los desechos sólidos en la cámara de rejillas
Tratamientos primarios	Reactor Anóxico	El compartimiento de las cámaras anóxico se encuentra en buen estado, aunque presentan pequeñas corrosiones de óxido. El funcionamiento de los mezcladores igual se encuentra en buen estado de funcionamiento.
	Reactor Anaeróbico	El compartimiento de las cámaras anaeróbica se encuentra en buen estado, aunque presentan pequeñas corrosiones de óxido. El funcionamiento de los mezcladores de aire se encuentra en buen estado de funcionamiento.
	Reactor Aeróbico	El compartimiento de las cámaras aeróbico se encuentra en buen estado, aunque presentan pequeñas corrosiones de óxido. Las cámaras de aireación no presentan averías ni anomalías, en su estructura, ni en su tubería, se encuentran bien
Tratamiento secundario	Reactor SBR1-2	El compartimiento del reactor SBR se encuentran en buen estado, aunque presentan corrosiones de óxido.
	Cámara RAS	El compartimiento de las cámaras RAS no se encuentra en funcionamiento debido a unas obstrucciones.
Tratamientos terciarios	Tanque de Alm. de Lodos	Los tanques de ambos módulos no presentan averías ni anomalía, actualmente en buen estado y funcionando
	Operario de la planta	Los operadores cuentan con equipo de protección personal, aunque existen limitaciones en la disponibilidad de material de protección de trabajo

A continuación, se describe el diagnóstico visual característica que se hace en la operación de la PTAR. La misma fue proporcionada por el operador.

Tabla19. Resultados del estado operacional de la planta mediante los indicadores visuales

Indicadores Visuales	
Color	El color café del lodo indica que está muy bien aireado y saludable.
Olor	El olor a humedad y no séptico indica que la PTAR está trabajando bien
Espumas	La ausencia de espuma indica un buen proceso de purga en el lodo activado.
Algas	La ausencia de algas indica un buen proceso de remoción de nutrientes en general o baja concentración de ellos en las aguas del afluente.
Turbiedad del efluente	La claridad del agua en el efluente (sin turbiedad) indica un buen proceso de sedimentación en el clarificador y un lodo con buenas características de sedimentación
Burbujeos	La ausencia de burbujas en el sedimentador indica buenos tiempos de recirculación de lodos evitando que este se vuelva séptico
Material flotante	La ausencia de material flotante indica unas bajas concentraciones de las grasas y aceites, además de un eficiente mezclado del agua en la cámara de aireación es decir una buena inyección de aire por los difusores
Acumulación de sólidos	La ausencia de acumulación de sólidos indica un buen funcionamiento del desarenador, y un buen mezclado en la cámara de aireación
Trayectoria de flujos	No se presentó presencia de cortocircuitos esto indica una buena distribución de difusores en la cámara de aireación y de mamparas en el sedimentador.

4.3.6. Análisis de costo de funcionamiento de la PTAR

Una de las grandes desventajas del sistema de lodos activados al cual perteneces los reactores biológicos MBBR y SBR es el alto consumo energético por lo que tratamos de compararlo con otros sistemas de tratamiento en nuestro país lo cual no conseguimos debido a que no existen estudios que nos brinden costos de operación de otros sistemas.

Para la realización de esta comparación los costos involucrados en la operación de la planta (desechando los costos de inversión) son:

- Personal técnico: 1 operarios con salario fijo de 4500
- Personal administrativo: 1 Ingeniero 5500bs
- Transporte de lodos en cisterna 2000
- Costo energético: 7500 Bs
- Caudal residual promedio diario :53 m3/día

$$CAT = \frac{\frac{C.P.T. + C.P.A. + C.E. + T.L.}{30}}{CRPD}$$

$$CAT = \frac{\frac{4500 + 5500 + 7500 + 2000}{30 \text{ dia/mes}}}{53 \text{ m}^3/\text{dia}}$$

$$CAT = 12,82 \text{ Bs/m}^3$$

El costo promedio de agua tratada por mes es de 15.82 Bs/m3

En nuestro estudio tenemos que el caudal calculado entrante a la planta es de 53 m3/día por 12,82 Bs/m3 eso en 30 días da un total de 20383 Bs mes. Y el estudio de el costo de operación y mantenimiento es de veinte mil trescientos ochenta y tres Bs mes.

4.4. Cuerpo receptor

Las aguas tratadas son vertidas a la quebrada Sagredo y este desemboca al río Guadalquivir. La clasificación del río Guadalquivir es CLASE “D”. Según el reglamento en materia de contaminación hídrica estas aguas son de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

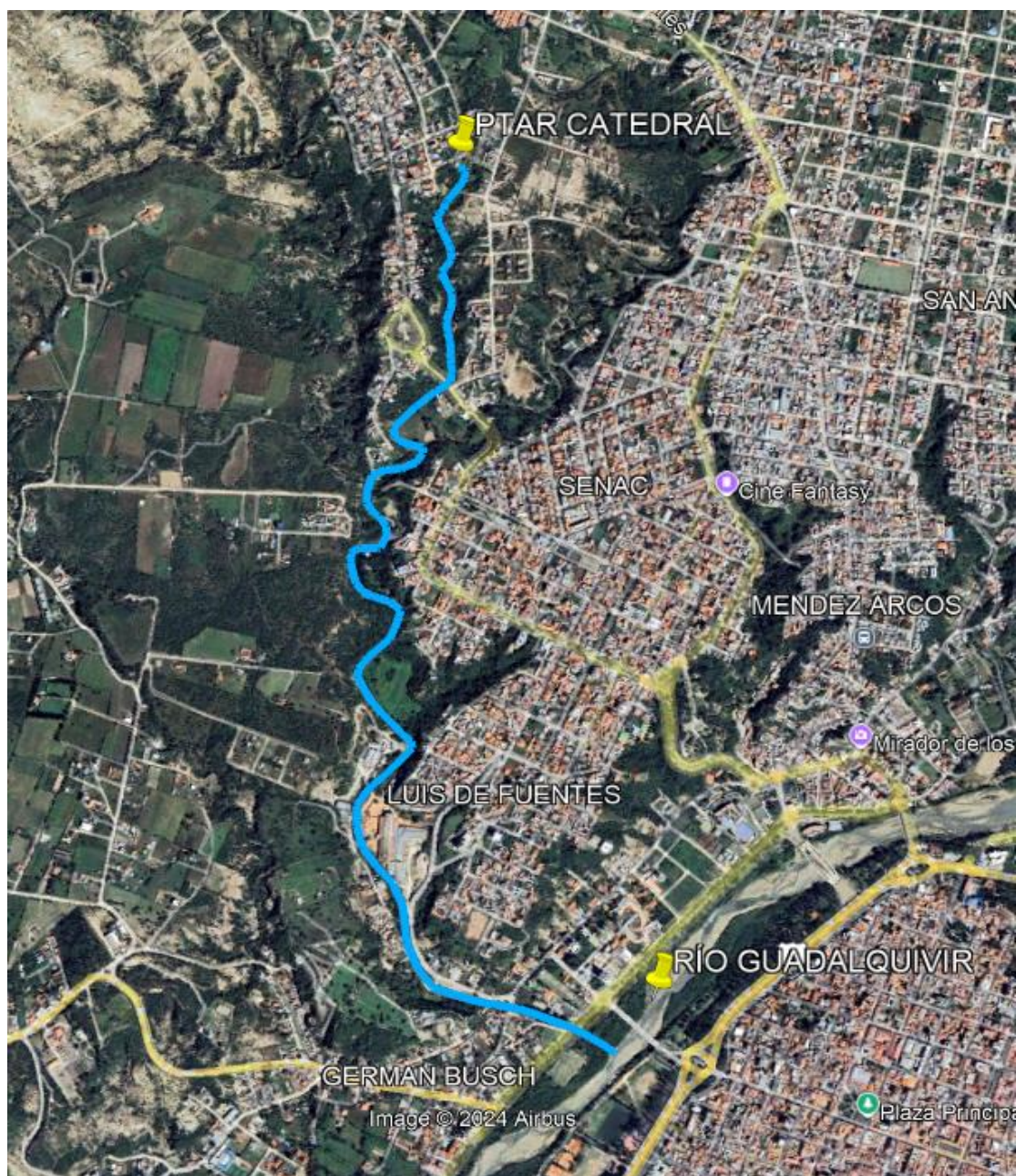
Fotografía 17. Fotografía satelital descriptiva de la PTAR.



Fuente: Elaboracion propia, Google Earth, 2020.

Se puede evidenciar en la imagen que, a poca distancia de la planta de tratamiento de aguas residuales, se encuentra la quebrada Sagredo, donde es vertida el agua tratada.

Fotografía 18. Quebrada Sagredo desde la PTAR hasta el Río Guadalquivir



Fuente: Google Earth

Este trayecto tiene una longitud de 2222 m hasta su confluencia con el Río Guadalquivir. Además, de las aguas de la PTAR Catedral, también recibe en este trayecto aporte de aguas de otras quebradas de fuentes y calidad desconocidas, por lo que no es posible evaluar las aguas ya mezcladas que probablemente lleguen al río Guadalquivir.

En la siguiente fotografía se puede ver el efluente de la PTAR, está bastante clara y visitando el lugar se evidencia que no genera malos olores.

Fotografía 19. Efluente de la PTAR Catedral

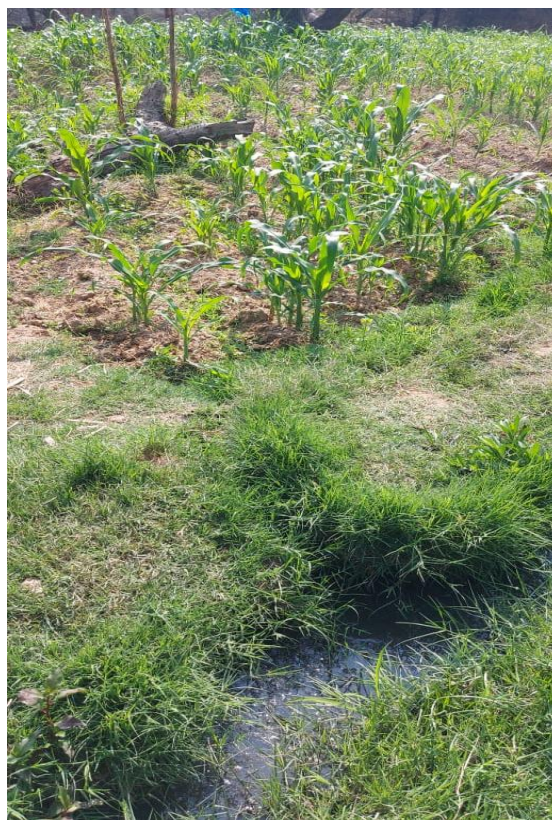


Fuente. Elaboración propia

La quebrada Sagredo en su trayecto recibe aguas residuales de otros usos desconocidos, son las que en realidad desembocan y se juntan con las aguas del Río Guadalquivir, aclarando que estas aguas “negras” no de la PTAR Catedral.

El caudal de agua residual tratada que sale de la PTAR Catedral es muy poco, de acuerdo a esta investigación esta agua es reutilizada para regar un pequeño terreno de cultivo ubicado a 200 metros aguas debajo de la PTAR, tal como se puede ver en la foto.

Fotografía 20. Terreno de cultivo



Fuente. Elaboración propia

Fotografia 21. Fotografías de agua contaminada de diferentes orígenes



Fuente: Elaboración propia

La quebrada Sagredo en su trayecto recibe aguas residuales de otros usos son las que en realidad desembocan y juntan con las aguas del Río Guadalquivir, aclarando que estas aguas “negras” que no de la PTAR Catedral.

Fotografia 22. Confluencia de la quebrada Sagredo con el río Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia

4.5. Registro de caudales

Dentro de las actividades operativas en la planta de tratamiento, está la medición de caudales. Para aforar se utiliza el caudalímetro digital, este brinda caudales horarios, con los cuales los operarios pueden identificar el comportamiento y la variación del caudal.

A continuación, se muestra un resumen del registro de caudales y se presenta una gráfica de la variación del comportamiento del caudal en el tiempo.

FECHA	CAUDAL	
	m ³ /day	L/s
22/10/2019	3.63	0.04
24/10/2019	24.00	0.28
26/10/2019	24.25	0.28
28/10/2019	41.51	0.48
30/10/2019	31.28	0.36
01/11/2019	34.07	0.39
03/11/2019	47.10	0.55
05/11/2019	41.10	0.48
07/11/2019	8.64	0.10
09/11/2019	31.82	0.37
11/11/2019	50.91	0.59
13/11/2019	65.80	0.76
17/11/2019	50.74	0.59
19/11/2019	30.09	0.35
21/11/2019	31.04	0.36
23/11/2019	36.36	0.42
25/11/2019	23.10	0.27
28/11/2019	39.58	0.46
30/11/2019	43.15	0.50
02/12/2019	55.94	0.65
04/12/2019	40.63	0.47
06/12/2019	52.03	0.60
08/12/2019	44.46	0.51
10/12/2019	60.99	0.71
12/12/2019	43.58	0.50
14/12/2019	56.00	0.65
16/12/2019	42.34	0.49
18/12/2019	53.17	0.62
20/12/2019	47.66	0.55
22/12/2019	42.25	0.49
24/12/2019	42.05	0.49
26/12/2019	38.07	0.44
28/12/2019	47.05	0.54
30/12/2019	43.98	0.51
01/01/2020	43.19	0.50
03/01/2020	49.03	0.57
05/01/2020	29.51	0.34
07/01/2020	50.54	0.58
09/01/2020	48.09	0.56
11/01/2020	28.97	0.34
13/01/2020	43.26	0.50
15/01/2020	50.08	0.58
17/01/2020	53.95	0.62
19/01/2020	26.85	0.31
21/01/2020	48.84	0.57
23/01/2020	47.02	0.54
25/01/2020	44.44	0.51
27/01/2020	43.93	0.51
29/01/2020	47.99	0.56
02/02/2020	73.46	0.85
04/02/2020	58.37	0.68
06/02/2020	45.20	0.52
08/02/2020	58.11	0.67
10/02/2020	47.58	0.55
12/02/2020	48.78	0.56
14/02/2020	47.85	0.55

FECHA	CAUDAL	
	m ³ /day	L/s
17/03/2020	57.02	0.66
19/03/2020	63.02	0.73
21/03/2020	51.85	0.60
23/03/2020	54.34	0.63
25/03/2020	53.68	0.62
27/03/2020	53.42	0.62
29/03/2020	49.03	0.57
31/03/2020	57.76	0.67
02/04/2020	48.52	0.56
04/04/2020	49.67	0.57
06/04/2020	50.34	0.58
08/04/2020	51.18	0.59
10/04/2020	51.19	0.59
12/04/2020	43.96	0.51
14/04/2020	38.93	0.45
18/04/2020	50.39	0.58
20/04/2020	52.47	0.61
22/04/2020	56.77	0.66
24/04/2020	59.16	0.68
26/04/2020	47.45	0.55
28/04/2020	58.53	0.68
30/04/2020	54.75	0.63
02/05/2020	54.88	0.64
04/05/2020	52.70	0.61
06/05/2020	54.72	0.63
08/05/2020	32.53	0.38
11/05/2020	111.19	1.29
13/05/2020	80.71	0.93
15/05/2020	56.24	0.65
18/05/2020	135.51	1.57
20/05/2020	63.80	0.74
22/05/2020	59.53	0.69
24/05/2020	16.26	0.19
26/05/2020	47.10	0.55
28/05/2020	44.13	0.51
30/05/2020	65.55	0.76
01/06/2020	49.55	0.57
03/06/2020	59.98	0.69
05/06/2020	50.68	0.59
09/06/2020	58.09	0.67
11/06/2020	47.07	0.54
15/06/2020	52.18	0.60
17/06/2020	50.58	0.59
19/06/2020	27.68	0.32
21/06/2020	53.30	0.62
23/06/2020	54.82	0.63
25/06/2020	55.22	0.64
30/06/2020	56.00	0.65
02/07/2020	41.74	0.48
04/07/2020	35.93	0.42
06/07/2020	41.63	0.48
08/07/2020	42.08	0.49
10/07/2020	47.33	0.55
12/07/2020	42.84	0.50
14/07/2020	33.14	0.38
16/07/2020	45.76	0.53

FECHA	CAUDAL	
	m ³ /day	L/s
29/08/2020	48.54	0.56
31/08/2020	48.85	0.57
02/09/2020	47.74	0.55
04/09/2020	46.11	0.53
06/09/2020	50.24	0.58
08/09/2020	41.15	0.48
10/09/2020	48.20	0.56
12/09/2020	49.59	0.57
14/09/2020	49.35	0.57
16/09/2020	49.39	0.57
18/09/2020	51.03	0.59
20/09/2020	49.60	0.57
22/09/2020	51.14	0.59
24/09/2020	54.65	0.63
26/09/2020	48.52	0.56
28/09/2020	47.92	0.55
30/09/2020	54.20	0.63
02/10/2020	51.99	0.60
04/10/2020	51.73	0.60
06/10/2020	60.14	0.70
08/10/2020	60.29	0.70
10/10/2020	45.78	0.53
12/10/2020	49.15	0.57
14/10/2020	50.23	0.58
16/10/2020	39.05	0.45
18/10/2020	48.45	0.56
20/10/2020	54.92	0.64
22/10/2020	59.93	0.69
24/10/2020	48.97	0.57
26/10/2020	54.18	0.63
28/10/2020	66.43	0.77
30/10/2020	54.71	0.63
01/11/2020	52.92	0.61
03/11/2020	58.20	0.67
05/11/2020	47.03	0.54
07/11/2020	50.07	0.58
09/11/2020	66.04	0.76
11/11/2020	60.58	0.70
13/11/2020	60.74	0.70
15/11/2020	50.47	0.58
17/11/2020	49.95	0.58
19/11/2020	59.29	0.69
21/11/2020	57.29	0.66
23/11/2020	56.98	0.66
25/11/2020	45.14	0.52
27/11/2020	55.96	0.65
29/11/2020	55.29	0.64
01/12/2020	68.11	0.79
03/12/2020	69.83	0.81
05/12/2020	44.46	0.51
07/12/2020	71.65	0.83
09/12/2020	74.20	0.86
11/12/2020	58.14	0.67
13/12/2020	52.67	0.61
15/12/2020	43.72	0.51
17/12/2020	70.78	0.82

FECHA	CAUDAL	
	m ³ /day	L/s
24/01/2021	63.41	0.73
26/01/2021	70.73	0.82
28/01/2021	71.24	0.82
30/01/2021	59.90	0.69
01/02/2021	69.83	0.81
03/02/2021	70.52	0.82
05/02/2021	60.06	0.70
07/02/2021	65.95	0.76
09/02/2021	80.01	0.93
11/02/2021	88.31	1.02
13/02/2021	78.66	0.91
15/02/2021	71.63	0.83
17/02/2021	73.74	0.85
19/02/2021	70.69	0.82
21/02/2021	60.36	0.70
23/02/2021	64.61	0.75
25/02/2021	52.83	0.61
27/02/2021	62.80	0.73
01/03/2021	65.17	0.75
03/03/2021	64.39	0.75
05/03/2021	73.05	0.85
07/03/2021	69.01	0.80
09/03/2021	77.01	0.89
11/03/2021	75.55	0.87
13/03/2021	57.55	0.67
15/03/2021	74.33	0.86
17/03/2021	50.60	0.59
19/03/2021	65.48	0.76
21/03/2021	75.42	0.87
23/03/2021	76.50	0.89
25/03/2021	70.71	0.82
27/03/2021	81.30	0.94
29/03/2021	73.56	0.85
31/03/2021	66.61	0.77
02/04/2021	67.02	0.78
04/04/2021	60.30	0.70
06/04/2021	68.75	0.80
08/04/2021	65.56	0.76
10/04/2021	49.89	0.58
12/04/2021	74.84	0.87
14/04/2021	54.61	0.63
16/04/2021	67.30	0.78
18/04/2021	68.67	0.79
20/04/2021	79.90	0.92
22/04/2021	70.02	0.81
24/04/2021	63.53	0.74
26/04/2021	55.28	0.64
28/04/2021	53.19	0.62
30/04/2021	61.31	0.71
02/05/2021	53.86	0.62
04/05/2021	63.01	0.73
06/05/2021	68.74	0.80
08/05/2021	50.99	0.59
10/05/2021	68.01	0.79
12/05/2021	44.66	0.52
14/05/2021	54.14	0.63
16/05/2021	52.79	0.61
18/05/2021	57.35	0.66
21/05/2021	33.57	0.39
23/05/2021	51.06	0.59
25/05/2021	51.49	0.60
27/05/2021	51.54	0.60
08/06/2021	57.13	0.66
10/06/2021	50.29	0.58
12/06/2021	48.75	0.56

FECHA	CAUDAL	
	m ³ /day	L/s
14/06/2021	48.42	0.56
16/06/2021	52.45	0.61
18/06/2021	46.01	0.53
20/06/2021	45.80	0.53
22/06/2021	54.88	0.64
24/06/2021	54.85	0.63
26/06/2021	55.00	0.64
28/06/2021	54.81	0.63
30/06/2021	52.97	0.61
02/07/2021	55.99	0.65
04/07/2021	51.07	0.59
06/07/2021	57.36	0.66
08/07/2021	55.43	0.64
10/07/2021	56.86	0.66
12/07/2021	56.56	0.65
14/07/2021	57.30	0.66
16/07/2021	43.56	0.50
18/07/2021	58.41	0.68
20/07/2021	51.72	0.60
22/07/2021	49.90	0.58
24/07/2021	60.63	0.70
26/07/2021	50.90	0.59
28/07/2021	42.36	0.49
30/07/2021	53.34	0.62
01/08/2021	56.44	0.65
03/08/2021	55.28	0.64
05/08/2021	49.95	0.58
07/08/2021	51.81	0.60
09/08/2021	44.94	0.52
11/08/2021	50.23	0.58
13/08/2021	51.70	0.60
15/08/2021	54.22	0.63
17/08/2021	53.77	0.62
19/08/2021	49.75	0.58
21/08/2021	49.63	0.57
23/08/2021	45.30	0.52
25/08/2021	30.41	0.35
27/08/2021	31.78	0.37
29/08/2021	33.01	0.38
31/08/2021	34.77	0.40
02/09/2021	31.38	0.36
04/09/2021	21.55	0.25
06/09/2021	27.89	0.32
08/09/2021	30.92	0.36
10/09/2021	47.08	0.54
12/09/2021	47.73	0.55
14/09/2021	52.75	0.61
16/09/2021	46.29	0.54
18/09/2021	44.35	0.51
20/09/2021	54.93	0.64
22/09/2021	42.18	0.49
24/09/2021	49.61	0.57
26/09/2021	46.91	0.54
28/09/2021	57.46	0.67
30/09/2021	59.86	0.69
02/10/2021	55.65	0.64
04/10/2021	55.57	0.64
06/10/2021	53.67	0.62
08/10/2021	57.85	0.67
10/10/2021	49.45	0.57
12/10/2021	56.26	0.65
14/10/2021	53.53	0.62
26/10/2021	57.51	0.67
28/10/2021	54.39	0.63
30/10/2021	58.35	0.68

FECHA	CAUDAL	
	m ³ /day	L/s
15/11/2021	61.63	0.71
17/11/2021	59.40	0.69
19/11/2021	63.27	0.73
21/11/2021	40.00	0.46
23/11/2021	67.54	0.78
25/11/2021	63.69	0.74
27/11/2021	61.68	0.71
29/11/2021	61.92	0.72
01/12/2021	61.43	0.71
03/12/2021	61.70	0.71
05/12/2021	59.91	0.69
07/12/2021	55.52	0.64
09/12/2021	58.77	0.68
11/12/2021	57.96	0.67
13/12/2021	57.86	0.67
15/12/2021	30.91	0.36
17/12/2021	55.15	0.64
19/12/2021	47.10	0.55
21/12/2021	56.36	0.65
23/12/2021	56.92	0.66
25/12/2021	53.15	0.62
27/12/2021	56.24	0.65
29/12/2021	58.97	0.68
31/12/2021	62.29	0.72
02/01/2022	64.42	0.75
04/01/2022	54.78	0.63
06/01/2022	55.99	0.65
08/01/2022	62.62	0.72
10/01/2022	62.59	0.72
12/01/2022	51.98	0.60
14/01/2022	58.43	0.68
16/01/2022	61.59	0.71
18/01/2022	60.82	0.70
20/01/2022	59.85	0.69
22/01/2022	53.06	0.61
24/01/2022	60.17	0.70
26/01/2022	65.78	0.76
28/01/2022	64.56	0.75
30/01/2022	64.59	0.75
01/02/2022	65.80	0.76
03/02/2022	64.40	0.75
05/02/2022	61.13	0.71
07/02/2022	66.05	0.76
09/02/2022	57.53	0.67
11/02/2022	61.53	0.71
13/02/2022	61.30	0.71
15/02/2022	61.46	0.71
17/02/2022	59.32	0.69
19/02/2022	43.11	0.50
21/02/2022	60.52	0.70
23/02/2022	66.97	0.78
25/02/2022	62.22	0.72
27/02/2022	65.99	0.76
01/03/2022	63.15	0.73
03/03/2022	63.25	0.73
05/03/2022	42.13	0.49
07/03/2022	56.50	0.65
09/03/2022	62.31	0.72
11/03/2022	55.99	0.65
13/03/2022	51.44	0.60
15/03/2022	56.44	0.65
17/03/2022	61.16	0.71
29/03/2022	58.33	0.68
31/03/2022	50.88	0.59
02/04/2022	58.43	0.68

FECHA	CAUDAL	
	m ³ /day	L/s
12/04/2022	55.61	0.64
14/04/2022	56.05	0.65
16/04/2022	53.90	0.62
18/04/2022	53.60	0.62
20/04/2022	54.27	0.63
22/04/2022	53.67	0.62
24/04/2022	46.89	0.54
26/04/2022	58.32	0.67
28/04/2022	47.74	0.55
30/04/2022	20.78	0.24
12/05/2022	56.46	0.65
14/05/2022	54.22	0.63
16/05/2022	54.55	0.63
18/05/2022	51.68	0.60
20/05/2022	48.61	0.56
22/05/2022	52.11	0.60
24/05/2022	48.11	0.56
26/05/2022	54.39	0.63
28/05/2022	36.53	0.42
30/05/2022	48.44	0.56
01/06/2022	53.81	0.62
03/06/2022	54.11	0.63
05/06/2022	34.02	0.39
07/06/2022	57.35	0.66
09/06/2022	50.04	0.58
11/06/2022	42.98	0.50
13/06/2022	51.38	0.59
15/06/2022	42.06	0.49
17/06/2022	54.62	0.63
19/06/2022	54.88	0.64
21/06/2022	51.99	0.60
23/06/2022	51.34	0.59
25/06/2022	57.33	0.66
27/06/2022	57.84	0.67
29/06/2022	57.72	0.67
01/07/2022	53.79	0.62
03/07/2022	58.78	0.68
05/07/2022	58.37	0.68
07/07/2022	58.56	0.68
09/07/2022	57.09	0.66
11/07/2022	58.28	0.67
13/07/2022	57.43	0.66
15/07/2022	54.45	0.63
17/07/2022	57.91	0.67
19/07/2022	56.97	0.66
21/07/2022	58.24	0.67
23/07/2022	58.48	0.68
25/07/2022	57.64	0.67
27/07/2022	58.44	0.68
29/07/2022	56.32	0.65
31/07/2022	54.31	0.63
02/08/2022	52.33	0.61
04/08/2022	57.35	0.66
06/08/2022	57.81	0.67
08/08/2022	55.94	0.65
10/08/2022	54.12	0.63
12/08/2022	60.51	0.70
14/08/2022	60.34	0.70

FECHA	CAUDAL	
	m ³ /day	L/s
30/08/2022	56.84	0.66
01/09/2022	56.00	0.65
03/09/2022	53.96	0.62
05/09/2022	52.12	0.60
07/09/2022	50.24	0.58
09/09/2022	55.58	0.64
11/09/2022	61.44	0.71
13/09/2022	61.59	0.71
15/09/2022	60.81	0.70
17/09/2022	60.04	0.69
29/09/2022	54.54	0.63
01/10/2022	34.30	0.40
03/10/2022	41.46	0.48
05/10/2022	54.26	0.63
07/10/2022	56.72	0.66
09/10/2022	57.76	0.67
11/10/2022	50.22	0.58
13/10/2022	46.10	0.53
15/10/2022	57.44	0.66
17/10/2022	54.30	0.63
19/10/2022	61.94	0.72
21/10/2022	59.53	0.69
23/10/2022	59.13	0.68
25/10/2022	59.31	0.69
27/10/2022	59.35	0.69
29/10/2022	58.59	0.68
31/10/2022	56.81	0.66
02/11/2022	25.55	0.30
04/11/2022	55.11	0.64
06/11/2022	55.42	0.64
08/11/2022	56.42	0.65
10/11/2022	64.10	0.74
12/11/2022	57.82	0.67
14/11/2022	49.85	0.58
16/11/2022	55.42	0.64
18/11/2022	56.82	0.66
20/11/2022	33.19	0.38
22/11/2022	50.47	0.58
24/11/2022	65.37	0.76
26/11/2022	55.09	0.64
28/11/2022	61.35	0.71
30/11/2022	64.33	0.74
02/12/2022	61.39	0.71
04/12/2022	61.66	0.71
06/12/2022	61.77	0.71
08/12/2022	53.22	0.62
10/12/2022	7.10	0.08
12/12/2022	48.76	0.56
14/12/2022	55.51	0.64
16/12/2022	60.89	0.70
18/12/2022	60.80	0.70
20/12/2022	59.73	0.69
22/12/2022	59.39	0.69
24/12/2022	33.92	0.39
26/12/2022	50.88	0.59
28/12/2022	58.96	0.68
30/12/2022	59.34	0.69
01/01/2023	59.26	0.69

FECHA	CAUDAL	
	m ³ /day	L/s
31/01/2023	56.74	0.66
02/02/2023	55.26	0.64
04/02/2023	56.50	0.65
06/02/2023	59.61	0.69
08/02/2023	56.09	0.65
10/02/2023	53.85	0.62
12/02/2023	56.54	0.65
14/02/2023	56.45	0.65
16/02/2023	53.31	0.62
18/02/2023	52.74	0.61
02/03/2023	54.39	0.63
04/03/2023	50.00	0.58
06/03/2023	50.32	0.58
08/03/2023	54.53	0.63
10/03/2023	56.07	0.65
12/03/2023	53.86	0.62
14/03/2023	57.00	0.66
16/03/2023	56.70	0.66
18/03/2023	53.56	0.62
20/03/2023	51.60	0.60
22/03/2023	59.37	0.69
24/03/2023	57.22	0.66
26/03/2023	46.78	0.54
28/03/2023	56.29	0.65
30/03/2023	53.62	0.62
01/04/2023	55.37	0.64
03/04/2023	56.34	0.65
05/04/2023	58.56	0.68
07/04/2023	55.56	0.64
09/04/2023	53.62	0.62
11/04/2023	56.02	0.65
13/04/2023	53.13	0.61
15/04/2023	56.02	0.65
17/04/2023	55.64	0.64
29/06/2023	48.35	0.56
01/07/2023	46.06	0.53
03/07/2023	45.61	0.53
05/07/2023	45.76	0.53
07/07/2023	45.51	0.53
09/07/2023	43.56	0.50
11/07/2023	45.94	0.53
13/07/2023	48.20	0.56
15/07/2023	44.02	0.51
17/07/2023	47.48	0.55
19/07/2023	48.63	0.56
21/07/2023	49.68	0.57
23/07/2023	49.03	0.57
25/07/2023	44.07	0.51
27/07/2023	46.91	0.54
30/07/2023	44.27	0.51
01/08/2023	42.75	0.49
03/08/2023	43.93	0.51
05/08/2023	44.25	0.51
07/08/2023	43.37	0.50
09/08/2023	50.81	0.59
11/08/2023	45.84	0.53
13/08/2023	51.42	0.60
15/08/2023	48.20	0.56

VALOR PROMEDIO (L/s):	0.62
VALOR MÍNIMO (L/s):	0.04
VALOR MÁXIMO (L/s):	1.57

La serie de caudales horarios corresponde al periodo 2019 al 2023, un total de 1388 datos. En la gráfica se puede ver en algunos caudales una notable variación respecto al tiempo, pero la mayoría de los datos esta alrededor del valor medio de 0.62 L/s. El caudal de diseño de esta PTAR es de 1.6 L/s.

A continuación, se muestra un registro de caudales de la PTAR de dos días

Tabla20. Aforo de caudales de un día viernes

Día	Viernes		
fecha	20/06/2025		
Hora de medición	Caudal (lt/seg)	Caudal Max (lt/seg)	Caudal min (lt/seg)
7:00AM	0.51209491	0.612199074	0.47509259
8:00AM	0.50982639		
9:00AM	0.49457176		
10:00AM	0.48195602		
11:00AM	0.49723380		
12:00PM	0.58805556		
13:00PM	0.61219907		
14:00PM	0.53050926		
15:00PM	0.49111111		
16:00PM	0.47509259		
17:00PM	0.56957176		
18:00PM	0.55790509		
caudal medio (l/s)	0.52667728		

Figura 27. Variación de caudal diario de 7 AM a 18 PM de un día viernes de agua residual

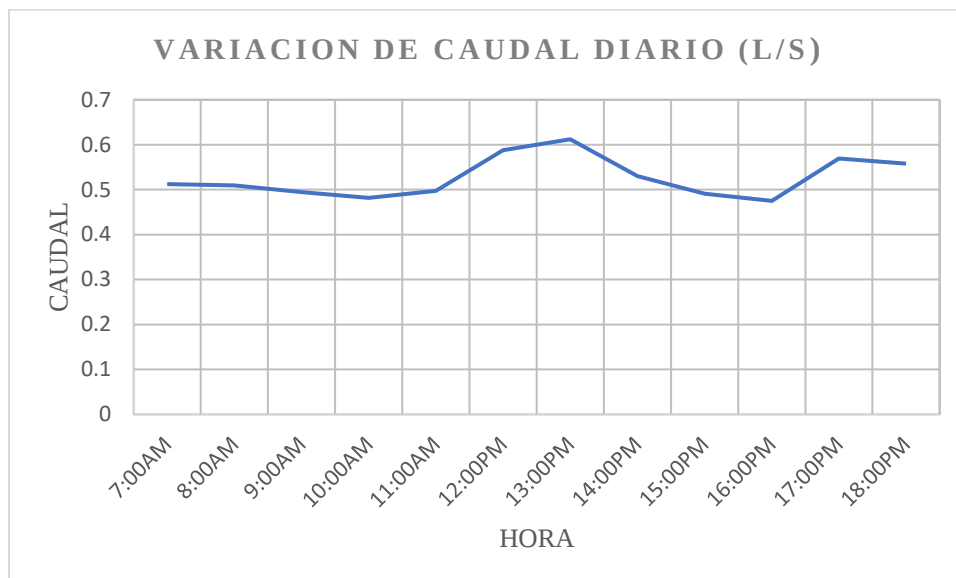
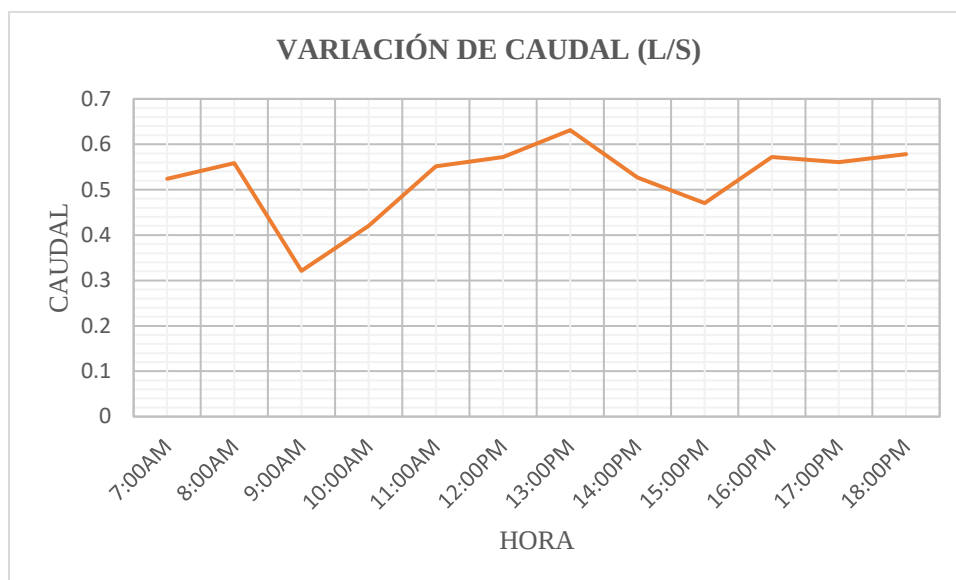


Tabla21.Aforo de caudales de un día sábado

Día	Sábado		
fecha	21/06/2025		
hora de medición	caudal (lt/seg)	caudal Max (lt/seg)	caudal min (lt/seg)
7:00AM	0.52401620	0.631134259	0.32119213
8:00AM	0.55887731		
9:00AM	0.32119213		
10:00AM	0.42055556		
11:00AM	0.55178241		
12:00PM	0.57175926		
13:00PM	0.63113426		
14:00PM	0.52682870		
15:00PM	0.47039120		
16:00PM	0.57162037		
17:00PM	0.56040509		
18:00PM	0.57825231		
caudal medio (l/s)	0.52390123		

Figura 28. Variación de caudal diario de 7 AM a 18 PM de un día viernes de agua residual



4.6. Caracterización del agua residual de la PTAR

4.6.1. Estudios de caracterización del agua residual

Los estudios de caracterización del agua residual de la planta de tratamiento de aguas residuales fueron realizados en el laboratorio COSAALT R.L. Ubicado en la zona de San Luis los ensayos que realizados fueron los parámetros fisicoquímicos (DBO, DBQ, Grasas y Aceites, pH y sólidos suspendidos totales) y para el ensayo de nitrógeno total y fósforo total se realizó en el laboratorio del ceanid ubicado en la universidad UAJMS, todos estos parámetros son los más básicos e importantes.

Para el muestreo se siguió la metodología y recomendaciones por la técnica. Leticia Cano C.

- Para el muestro del afluente se realiza la toma de muestra en la entrada a la planta de tratamiento, cerca de las rejillas y para el muestro del efluente, se toma las muestras en las aguas que salen del último componente de tratamiento de la planta, que desagua atreves de un tuvo.
- Se tomó las muestras en una posición donde el agua estaba bien mezclada, donde el agua fluye con rapidez para el afluente o donde cae par el efluente.

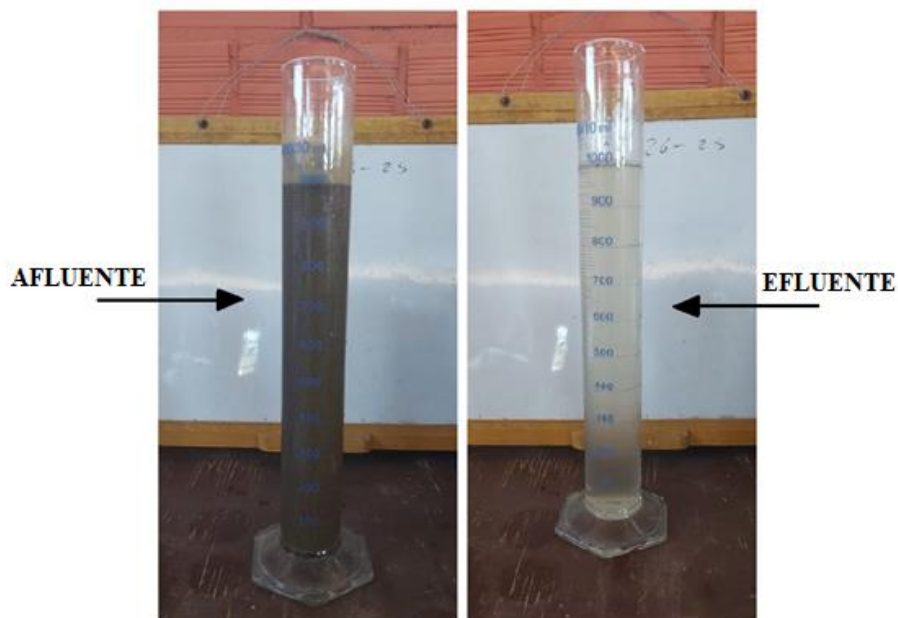
- Siempre se toma la muestra en el centro del agua corriente. Nunca toque el fondo de la tubería o paredes de un canal para que los sedimentos no puedan entrar a la muestra.
- Las diferentes muestras que se realizaron tienen un volumen de 2 litros (2000 ml) para que sean representativas y en botellas de plástico de envase de agua mineral nuevas.
- Se rellenó las etiquetas de las botellas. antes de la toma de las muestras para no tener confusiones
- Se abre el recipiente y llenar el recipiente con agua, Inmediatamente cierre el recipiente y seque el exterior.

Se transporta las muestras con cuidado, prestando atención que no se caigan o derramen y se usa una conservadora para transportar las muestras que son las más adecuadas para mantener oscuridad y una temperatura entre 1 – 5 °C.

4.6.2. Descripción física de las aguas residuales del afluente y efluente de la PTAR.

En la siguiente figura se puede observar el resultado cualitativo del funcionamiento de la PTAR, comparando visualmente las muestras de afluente y efluente de la planta, evidenciándose una remoción de los parámetros evaluados y además de parámetros como color y turbiedad.

Fotografía 23. Comparación visual entre el afluente y efluente de la PTAR



Fuente: Elaboración propia

4.6.3. Informes de calidad el agua residual en la PTAR Catedral

De acuerdo a los informes de laboratorio realizados y suministrados por el Centro de Análisis, de COSAALT R.L. Se realizó una tabla resumen con los valores de calidad del agua residual caracterizado por sus principales parámetros.

Tabla22. Resultados fisicoquímicos del afluente y efluente

FECHA	CAUDAL		AFLUENTE					EFLUENTE				
			COLIFORMES FECALES	DBO5	DQO	SST	ph	COLIFORMES FECALES	DBO5	DQO	SST	ph
	m ³ /day	L/s	NMP/100ml	Mg/L	Mg/L	Mg/L		NMP/100ml	Mg/L	Mg/L	Mg/L	
16/12/2019	42.34	0.49	4.40E+07	406	923	176.53	7.79	6.50E+05	34.8	61.54	75	7.19
10/03/2020	43.07	0.50	3.60E+07	142	325	168.45	8.26	2.40E+05	43.65	83	128	7.2
09/06/2020	58.09	0.67	6.50E+07	319	513.74	161.47	7.71	4.30E+05	33.24	190.82	112	7.01
14/09/2020	49.35	0.57	6.40E+07	296	587.14	185.23	7.81	1.50E+05	28.2	102.74	119	7.11
15/12/2020	43.72	0.51	6.30E+07	296	487.14	174.13	7.51	2.50E+05	28.2	98.75	123	6.91
09/03/2021	77.01	0.89	3.60E+07	486.5	387.15	235.95	7.03	2.30E+05	43.65	84.19	156	7.19
15/06/2021	50.68	0.59	4.30E+07	586.5	527.55	247.67	7.69	2.40E+05	41.65	154.59	188	7.42
14/09/2021	52.75	0.61	4.50E+07	516.5	417.23	237.73	7.32	2.40E+05	40.61	81.29	159	7.18
13/12/2021	57.86	0.67	4.60E+07	566.3	387.71	245.93	7.28	2.60E+05	43.65	71.29	177	7.19
22/03/2022	53.13	0.61	3.60E+07	356.2	427.51	387	7.95	2.60E+05	53.25	84.59	64	7.72
14/06/2022	55.10	0.64	4.40E+07	257	392.16	305.73	7.79	6.30E+05	62.2	125.49	64	7.68
20/09/2022	16.77	0.19	3.60E+07	375	527.46	348.92	8.01	5.91E+05	26	150.98	48	7.78
12/12/2022	48.76	0.56	1.10E+07	268	475.25	373.18	7.93	2.40E+05	86.25	35.46	88	7.2
13/03/2023	55.56	0.64	4.5E+07	363	459.2	219	7.95	4.6E+05	30.2	133	112	7.72
13/06/2023	40.85	0.47	5.60E+07	289.2	342	239	7.79	2.50E+05	37.6	78	127	7.68

Fuente: Elaboración prop

4.7. Datos de suministro de aire

Registro de suministro de aire

Data	Air	
	1day	´©Àû
	m³/day	m³
21/10/2019		37,040.00
22/10/2019	2,936.00	39,976.00
23/10/2019	2,935.00	42,911.00
24/10/2019	2,982.00	45,893.00
25/10/2019	2,812.00	48,705.00
26/10/2019	2,765.00	51,470.00
27/10/2019	2,764.00	54,234.00
28/10/2019	2,713.10	56,947.10
29/10/2019	2,621.40	59,568.50
30/10/2019	2,597.30	62,165.80
31/10/2019	2,805.40	64,971.20
01/11/2019	2,714.80	67,686.00
02/11/2019	2,862.00	70,548.00
03/11/2019	2,620.00	73,168.00
04/11/2019	2,768.80	75,936.80
05/11/2019	2,966.10	78,902.90
06/11/2019	3,004.10	81,907.00
07/11/2019	3,026.00	84,933.00
08/11/2019	2,783.00	87,716.00
09/11/2019	2,877.00	90,593.00
10/11/2019	2,761.00	93,354.00
11/11/2019	2,779.00	96,133.00
12/11/2019	2,702.00	98,835.00
13/11/2019	2,729.00	101,564.00
14/11/2019	2,557.00	104,121.00
16/11/2019	5,252.00	109,373.00
17/11/2019	2,541.00	111,914.00
18/11/2019	2,623.00	114,537.00
19/11/2019	2,640.40	117,177.40
20/11/2019	2,478.60	119,656.00
21/11/2019	2,387.00	122,043.00
02/05/2020	2,857.80	443,264.70
03/05/2020	2,904.60	446,169.30
04/05/2020	2,918.90	449,088.20
05/05/2020	2,957.60	452,045.80
06/05/2020	3,053.70	455,099.50
07/05/2020	2,937.30	458,036.80
08/05/2020	3,109.70	461,146.50
09/05/2020	3,173.70	464,320.20

Fuente: Elaboración propia

4.8. Evaluación de la planta de tratamiento en base a la información disponible

4.8.1. Relación DBO₅/DQO

Al Respecto en la “Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales” del estado plurinacional de Bolivia indica lo siguiente: La relación DBO₅/DQO de un agua residual dada aporta información muy útil sobre su biodegradabilidad y, por tanto, sobre si es susceptible o no de ser tratada mediante la aplicación de procesos biológicos.

Tabla23. Biodegradabilidad del agua residual

DBO ₅ /DQO	Biodegradabilidad del agua residual
≥0.4	Alta
0.2 – 0.4	Media
≤0.2	Baja

Fuente: Guía Técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales, 2021

Aguas residuales que presenten valores de la relación DBO₅/DQO iguales o superiores a 0.4, son aguas muy biodegradables, entre 0.2 y 0.4 son aguas biodegradables, mientras que si la relación es inferior a 0.2 las aguas son poco biodegradables, por lo que no es adecuado utilizar procesos biológicos para su tratamiento, siendo necesario recurrir, generalmente, a la aplicación de procesos fisicoquímicos.

En las aguas residuales típicamente urbanas, la relación DBO₅/DQO suele ser del orden de 0,4. El tratamiento mediante lagunas de oxidación tendrá altas eficiencias de tratamiento siempre que las aguas sean biodegradables. De las muestras de agua correspondientes a la entrada a la PTAR se analizó la relación:

Tabla24. Relación DBO₅/DQO Afluente PTAR Catedral

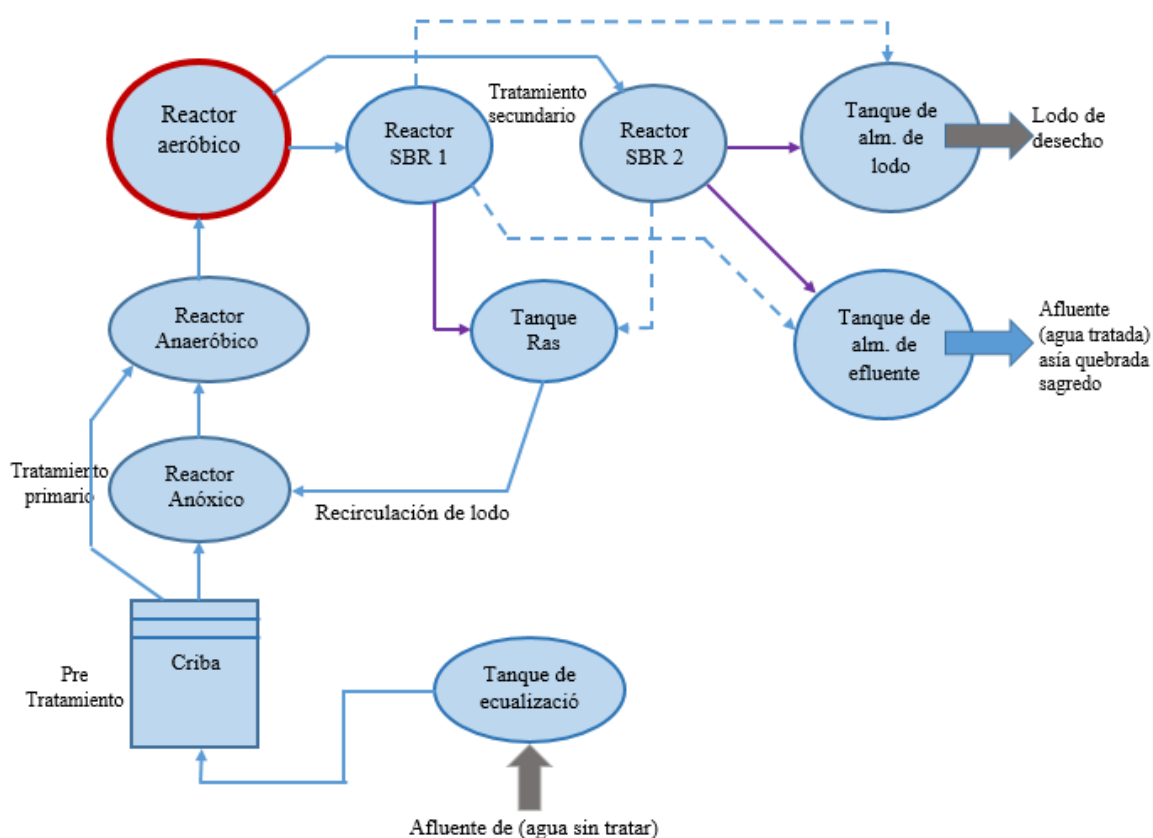
FECHA	DBO ₅	DQO mg/L	DBO ₅ /DQO
16/12/2019	406	923	0.44
10/03/2020	142	325	0.44
09/06/2020	319	514	0.62
14/09/2020	296	587	0.50
15/12/2020	296	487	0.61
09/03/2021	487	387	-
15/06/2021	587	528	-
14/09/2021	517	417	-
13/12/2021	566	388	-
22/03/2022	356	428	0.83
14/06/2022	257	392	0.66
20/09/2022	375	527	0.71
12/12/2022	268	475	0.56
13/03/2023	363	459	0.79
13/06/2023	289	342	0.85
Valor Promedio	368.21	478.62	0.64

Fuente: Elaboración propia

Casi todas las relaciones de manera separada y el valor medio, indican que se trata de agua residual biodegradables de origen doméstico.

4.8.2. Determinación de eficiencias en el sistema de tratamiento

Figura 29. Componentes del sistema de tratamiento



Fuente: (Empresa Rothwell Water Co. Ltd., 2012)

A partir de los datos de calidad del agua residual entrante y saliente de la planta de tratamiento que se muestra en la figura (PTAR BARRIO CATEDRAL) se determinó la eficiencia del tratamiento para los principales parámetros. Se usó la siguiente expresión:

$$\%Remoción = \frac{Concentración Af - Concentración Ef}{Concentración Af} * 100$$

Af : Afluente; *Ef* : Efluente

Eficiencia de remoción de DBO₅

Tabla 25. Eficiencia de remoción de DBO₅ en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	EFICIENCIA
16/12/2019	406.00	34.80	91.4%
10/03/2020	142.00	43.65	69.3%
09/06/2020	319.00	33.24	89.6%
14/09/2020	296.00	28.20	90.5%
15/12/2020	296.00	28.20	90.5%
09/03/2021	486.50	43.65	91.0%
15/06/2021	586.50	41.65	92.9%
14/09/2021	516.50	40.61	92.1%
13/12/2021	566.30	43.65	92.3%
22/03/2022	356.20	53.25	85.1%
14/06/2022	257.00	62.20	75.8%
20/09/2022	375.00	26.00	93.1%
12/12/2022	268.00	86.25	67.8%
13/03/2023	363.00	30.20	91.7%
13/06/2023	289.20	37.60	87.0%
Valor Mínimo			67.82%
Valor Promedio			86.67%
Valor Máximo			93.07%

Fuente: Elaboración propia

Eficiencia de remoción de DQO en la salida de la PTAR

Tabla26.Eficiencia de remoción de DQO en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	EFICIENCIA
16/12/2019	923.00	61.54	93.3%
10/03/2020	325.00	83.00	74.5%
09/06/2020	513.74	190.82	62.9%
14/09/2020	587.14	102.74	82.5%
15/12/2020	487.14	98.75	79.7%
09/03/2021	387.15	84.19	78.3%
15/06/2021	527.55	154.59	70.7%
14/09/2021	417.23	81.29	80.5%
13/12/2021	387.71	71.29	81.6%
22/03/2022	427.51	84.59	80.2%
14/06/2022	392.16	125.49	68.0%
20/09/2022	527.46	150.98	71.4%
12/12/2022	475.25	35.46	92.5%
13/03/2023	459.20	133.00	71.0%
13/06/2023	342.00	78.00	77.2%
Valor Mínimo			62.86%
Valor Promedio			77.62%
Valor Máximo			93.33%

Fuente: Elaboración propia

Eficiencia de remoción de SST en la salida de la PTAR

Tabla27. Eficiencia de remoción de SST en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	EFICIENCIA
16/12/2019	176.53	75.00	57.5%
10/03/2020	168.45	128.00	24.0%
09/06/2020	161.47	112.00	30.6%
14/09/2020	185.23	119.00	35.8%
15/12/2020	174.13	123.00	29.4%
09/03/2021	235.95	156.00	33.9%
15/06/2021	247.67	188.00	24.1%
14/09/2021	237.73	159.00	33.1%
13/12/2021	245.93	177.00	28.0%
22/03/2022	387.00	64.00	83.5%
14/06/2022	305.73	64.00	79.1%
20/09/2022	348.92	48.00	86.2%
12/12/2022	373.18	88.00	76.4%
13/03/2023	219.00	112.00	48.9%
13/06/2023	239.00	127.00	46.9%
Valor Mínimo			24.01%
Valor Promedio			47.82%
Valor Máximo			86.24%

Fuente: Elaboración propia.

Variación de pH

Tabla28.Variación de pH en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Variación
16/12/2019	7.79	7.19	0.6
10/03/2020	8.26	7.20	1.1
09/06/2020	7.71	7.01	0.7
14/09/2020	7.81	7.11	0.7
15/12/2020	7.51	6.91	0.6
09/03/2021	7.03	7.19	-0.2
15/06/2021	7.69	7.42	0.3
14/09/2021	7.32	7.18	0.1
13/12/2021	7.28	7.19	0.1
22/03/2022	7.95	7.72	0.2
14/06/2022	7.79	7.68	0.1
20/09/2022	8.01	7.78	0.2
12/12/2022	7.93	7.20	0.7
13/03/2023	7.95	7.72	0.2
13/06/2023	7.79	7.68	0.1
Valor Mínimo			-0.16
Valor Promedio			0.38
Valor Máximo			1.06

Fuente: Elaboración propia.

Eficiencia de remoción de Coliformes fecales y totales

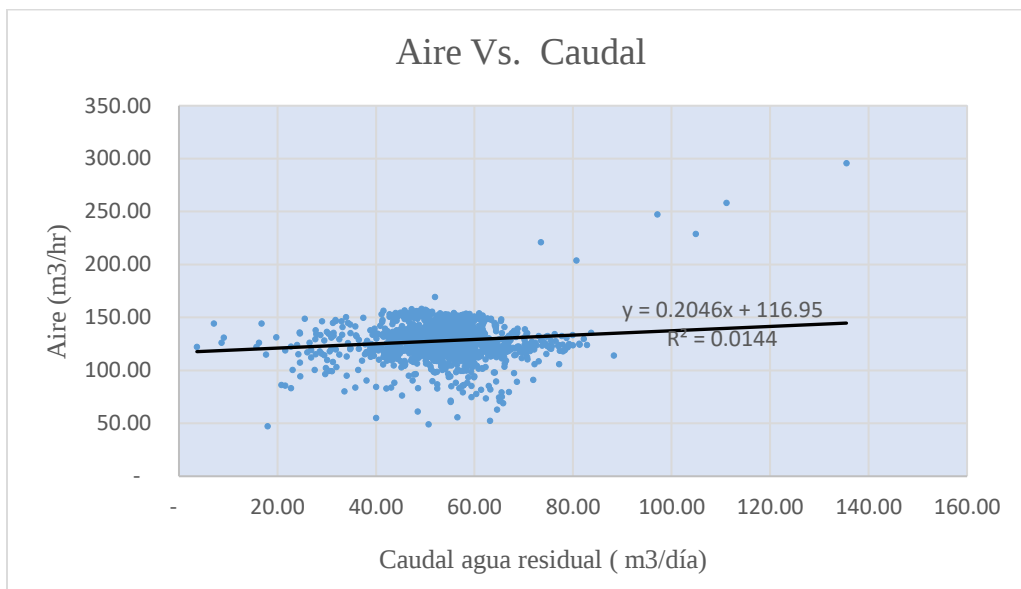
Tabla29.Eficiencia de remoción de COLIFORMES TOTALES en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR NMP/100ml	Salida de PTAR NMP/100ml	EFICIENCIA
16/12/2019	4.40E+07	6.50E+05	98.52%
10/03/2020	3.60E+07	2.40E+05	99.33%
09/06/2020	6.50E+07	4.30E+05	99.34%
14/09/2020	6.40E+07	1.50E+05	99.77%
15/12/2020	6.30E+07	2.50E+05	99.60%
09/03/2021	3.60E+07	2.30E+05	99.36%
15/06/2021	4.30E+07	2.40E+05	99.44%
14/09/2021	4.50E+07	2.40E+05	99.47%
13/12/2021	4.60E+07	2.60E+05	99.43%
22/03/2022	3.60E+07	2.60E+05	99.28%
14/06/2022	4.40E+07	6.30E+05	98.57%
20/09/2022	3.60E+07	5.91E+05	98.36%
12/12/2022	1.10E+07	2.40E+05	97.82%
13/03/2023	4.50E+07	4.60E+05	98.98%
13/06/2023	5.60E+07	2.50E+05	99.55%
Valor Mínimo			97.82%
Valor Promedio			99.32%
Valor Máximo			99.77%

Fuente: Elaboración propia.

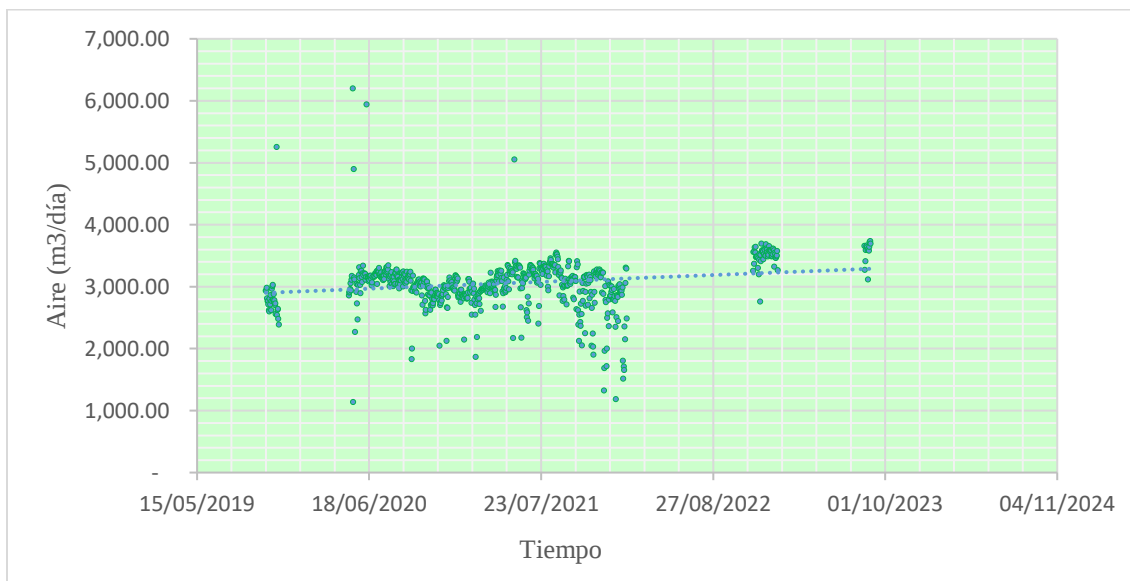
4.8.3. Variación del consumo de aire

Figura 30. Variación de la inyección de aire respecto al caudal de aguas residuales



Unos cuantos puntos esporádicos, indican una leve tendencia de que a mayor caudal se inyecta más cantidad de aire. Pero, no es representativa.

Figura 31. Variación de la inyección de aire respecto al caudal de aguas residuales



Hay un leve incremento en el suministro de aire en el transcurso del tiempo.

Variación de la inyección de aire respecto a la DBO5

Figura 32. El suministro de aire ha tenido un leve aumento respecto al incremento de la DBO.

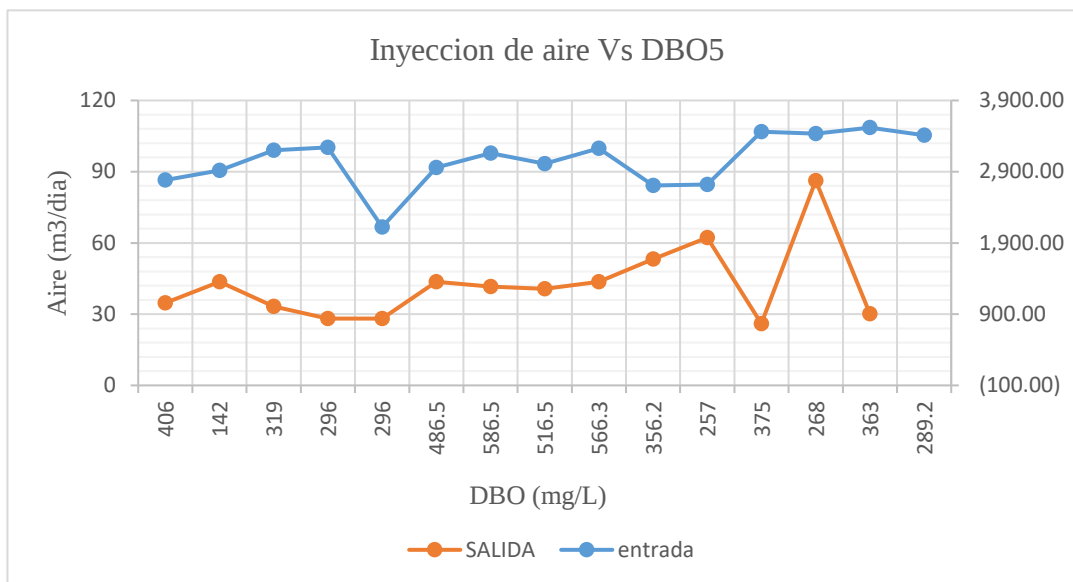
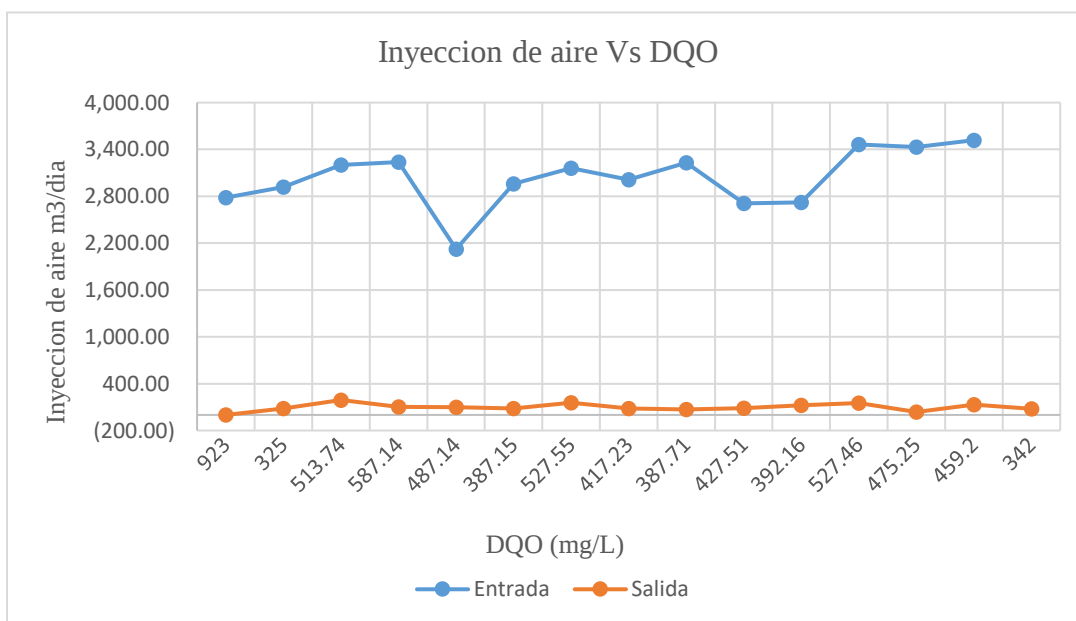
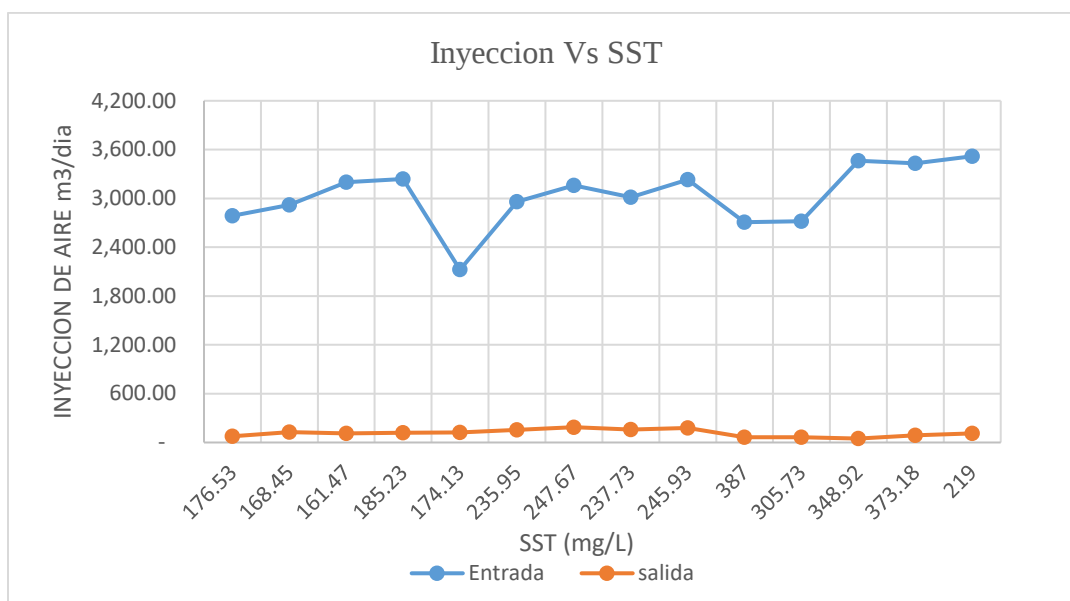


Figura 33. Variación de la inyección de aire respecto a la DQO



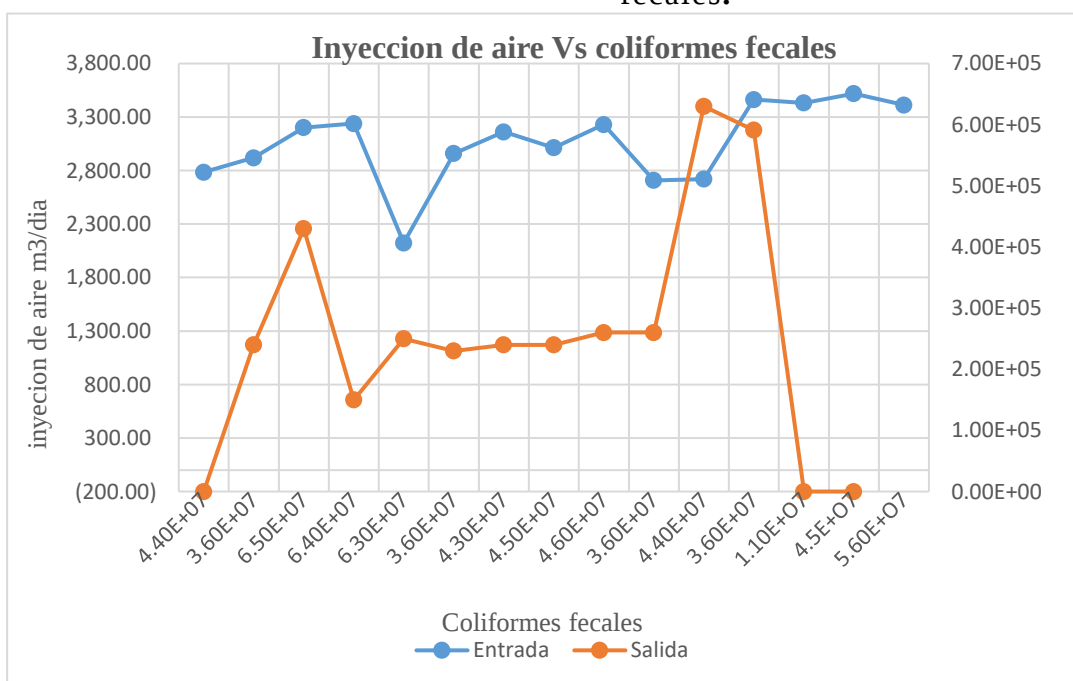
No hay una tendencia de aumento de suministro de oxígeno cuando aumenta la DQO.

Figura 34. Variación de la inyección de aire respecto a los SST



Ante valores altos de SST, no se nota un aumento en la aireación.

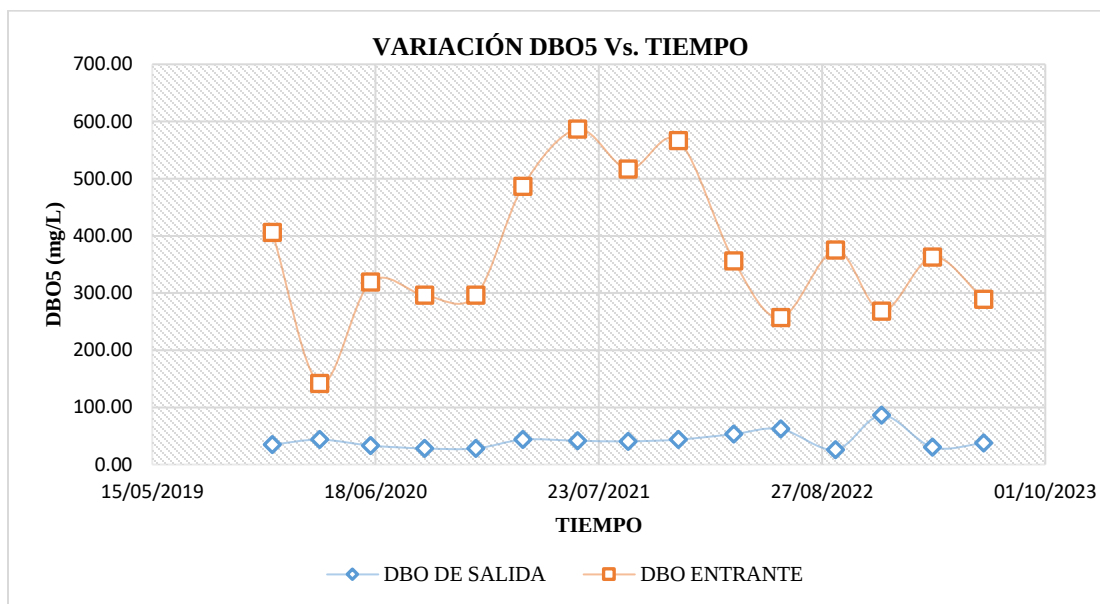
Figura 35. Variación de la inyección de aire respecto a los Coliformes fecales.



Presenta un leve incremento de la aireación respecto al incremento de los coliformes fecales.

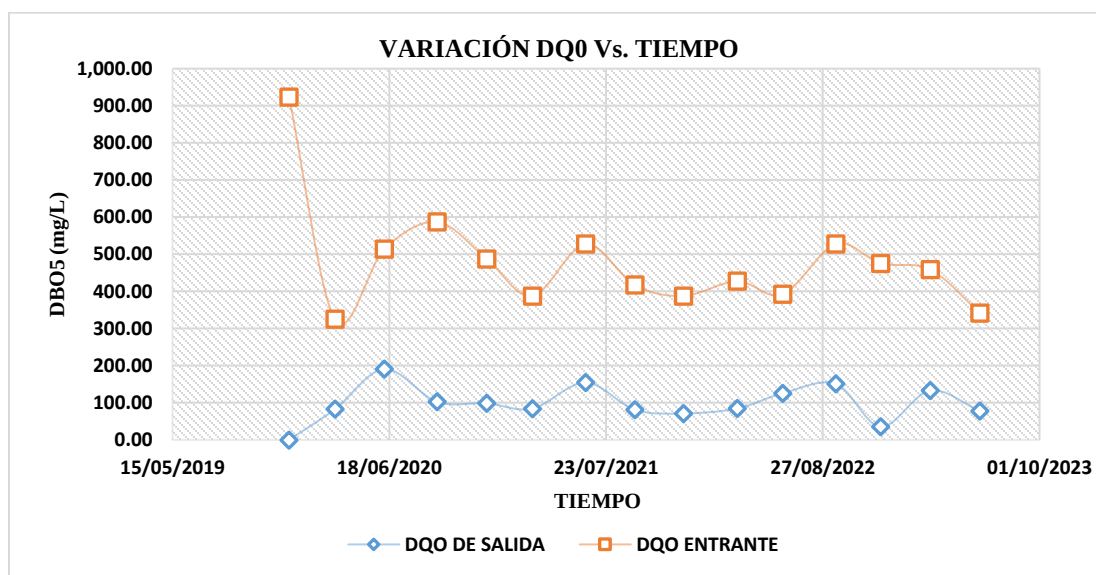
4.8.4. Variación de los parámetros en el tiempo

Figura 36. Variación de la DBO



Los valores de entrada tienen una variación notable respecto al tiempo, pero, los valores de salida presentan poca variación.

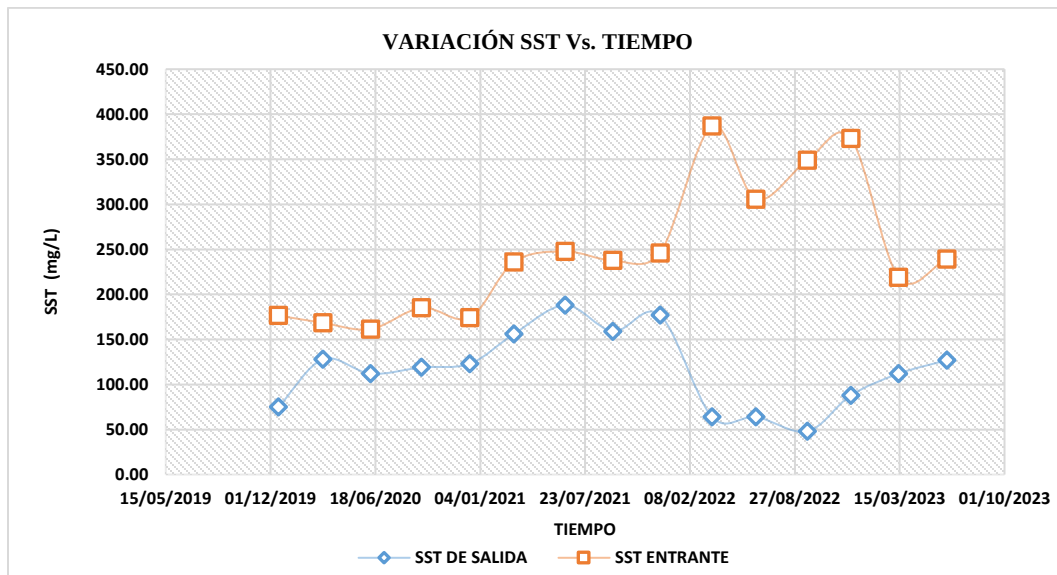
Figura 37. Variación de la DBO



Fuente: Elaboración propia

Los valores de entrada presentan variaciones no tan extremas respecto al tiempo, mientras que los valores de salida presentan menos variación.

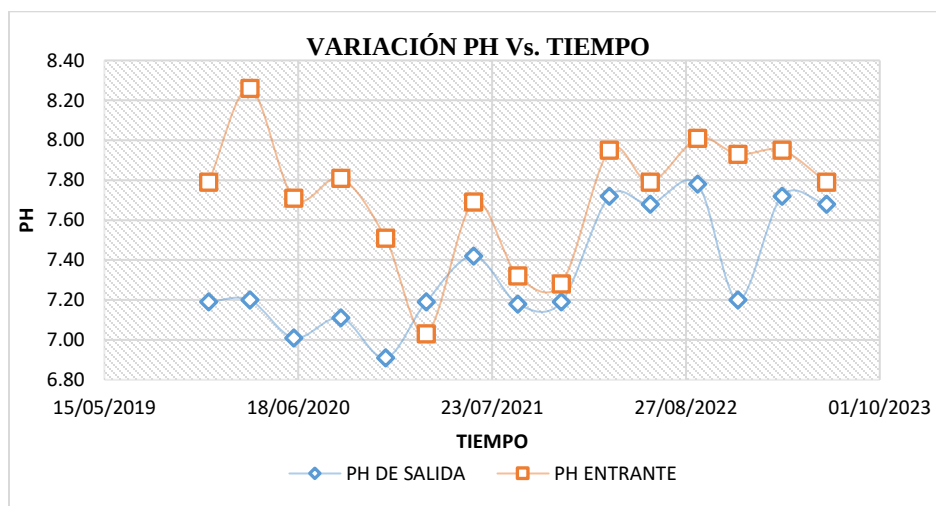
Figura 38. Variación de la SST



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la gráfica una variación muy notoria en los valores de entrada, sobre todo en los últimos años. Los valores salientes también presentan variación considerable.

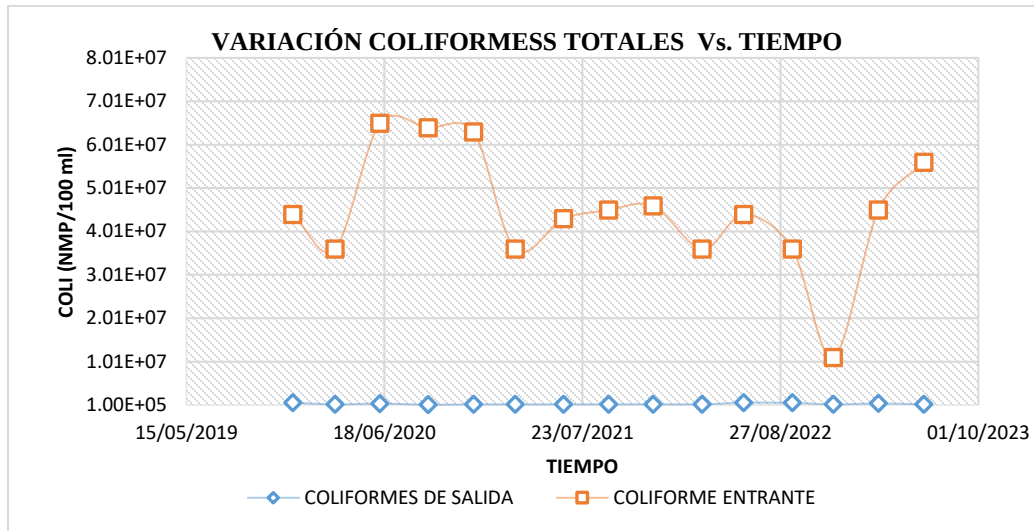
Figura 39. Variación del pH



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de entrada y salida presentan notable variación respecto al tiempo.

Figura 40. Variación de los coliformes fecales



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de entrada tienen una variación relativamente notoria. Mientras que los valores de salida presentan valores con casi nada de variación.

4.8.5. Diagnóstico del cumplimiento con Anexo A-1, del RMCH de la ley 1333 para clase D

El agua residual tratada que sale de la PTAR descarga a la quebrada Sagredo, el cual no tiene clasificación, está quebrada confluye al Rio Guadalquivir que tiene clasificación D.

El agua residual de la PTAR Catedral es muy poco, es reusado en su trayecto, se infiltra, se mezcla con otras aguas contaminadas. Por lo tanto, no se puede evaluar a cabalidad su cumplimiento con el Anexo 1, del RMCH de la ley 1333.

A continuación, se muestra resultados de laboratorio y su cumplimiento con el Anexo 1, del RMCH de la ley 1333.

4.8.5.1. Análisis de DBO en la salida de la PTAR

CUMPLIMIENTO ANEXO A-1 LEY 1333

DBO5 en salida de PTAR

FECHA	DBO ₅ mg/L	LÍMITES CLASE "D" CUADRO N° 1 A-1 RMCH	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	34.80	30	NO CUMPLE
10/03/2020	43.65	30	NO CUMPLE
09/06/2020	33.24	30	NO CUMPLE
14/09/2020	28.20	30	CUMPLE
15/12/2020	28.20	30	CUMPLE
09/03/2021	43.65	30	NO CUMPLE
15/06/2021	41.65	30	NO CUMPLE
14/09/2021	40.61	30	NO CUMPLE
13/12/2021	43.65	30	NO CUMPLE
22/03/2022	53.25	30	NO CUMPLE
14/06/2022	62.20	30	NO CUMPLE
20/09/2022	26.00	30	CUMPLE
12/12/2022	86.25	30	NO CUMPLE
13/03/2023	30.20	30	NO CUMPLE
13/06/2023	37.60	30	NO CUMPLE
VALOR PROMEDIO	35.29	30	NO CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

4.8.5.2. Análisis de DQO en la salida de la PTAR

CUMPLIMIENTO ANEXO A-1 LEY 1333

DQO en salida de PTAR

FECHA	DQO mg/L	LÍMITES CLASE "D" CUADRO N° 1 A-1 RMCH	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	61.54	60	NO CUMPLE
10/03/2020	83.00	60	NO CUMPLE
09/06/2020	190.82	60	NO CUMPLE
14/09/2020	102.74	60	NO CUMPLE
15/12/2020	98.75	60	NO CUMPLE
09/03/2021	84.19	60	NO CUMPLE
15/06/2021	154.59	60	NO CUMPLE
14/09/2021	81.29	60	NO CUMPLE
13/12/2021	71.29	60	NO CUMPLE
22/03/2022	84.59	60	NO CUMPLE
14/06/2022	125.49	60	NO CUMPLE
20/09/2022	150.98	60	NO CUMPLE
12/12/2022	35.46	60	CUMPLE
13/03/2023	133.00	60	NO CUMPLE
13/06/2023	78.00	60	NO CUMPLE
VALOR PROMEDIO	103.51	60	NO CUMPLE

4.8.5.3. Análisis de SST en la salida de la PTAR

CUMPLIMIENTO ANEXO A-1 LEY 1333

SST en salida de PTAR

FECHA	SST mg/L	LÍMITES CLASE "D" CUADRO N° 1 A-1 RMCH	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	75.00	No Especifica	
10/03/2020	128.00	No Especifica	
09/06/2020	112.00	No Especifica	
14/09/2020	119.00	No Especifica	
15/12/2020	123.00	No Especifica	
09/03/2021	156.00	No Especifica	
15/06/2021	188.00	No Especifica	
14/09/2021	159.00	No Especifica	
13/12/2021	177.00	No Especifica	
22/03/2022	64.00	No Especifica	
14/06/2022	64.00	No Especifica	
20/09/2022	48.00	No Especifica	
12/12/2022	88.00	No Especifica	
13/03/2023	112.00	No Especifica	
13/06/2023	127.00	No Especifica	

VALOR PROMEDIO	118.83	No Especifica	
-----------------------	---------------	----------------------	--

4.8.5.4. Análisis de pH en la salida de la PTAR

CUMPLIMIENTO ANEXO A-1 LEY 1333

pH en salida de PTAR

FECHA	pH	LÍMITES CLASE "D" CUADRO N° 1 A-1 RMCH	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	7.19	de 6 a 9	CUMPLE
10/03/2020	7.20	de 6 a 9	CUMPLE
09/06/2020	7.01	de 6 a 9	CUMPLE
14/09/2020	7.11	de 6 a 9	CUMPLE
15/12/2020	6.91	de 6 a 9	CUMPLE
09/03/2021	7.19	de 6 a 9	CUMPLE
15/06/2021	7.42	de 6 a 9	CUMPLE
14/09/2021	7.18	de 6 a 9	CUMPLE
13/12/2021	7.19	de 6 a 9	CUMPLE
22/03/2022	7.72	de 6 a 9	CUMPLE
14/06/2022	7.68	de 6 a 9	CUMPLE
20/09/2022	7.78	de 6 a 9	CUMPLE
12/12/2022	7.20	de 6 a 9	CUMPLE
13/03/2023	7.72	de 6 a 9	CUMPLE
13/06/2023	7.68	de 6 a 9	CUMPLE
VALOR PROMEDIO	7.10	de 6 a 9	CUMPLE

4.8.5.5. Análisis de Coliformes Totales en la salida de la PTAR

CUMPLIMIENTO ANEXO A-1 LEY 1333

COLIFORMES TOTALES en salida de PTAR

FECHA	COLIFORMES TOTALES NMP/100ml	LÍMITES CLASE "D" CUADRO N° 1 A- 1 RMCH	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	6.50E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
10/03/2020	2.40E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
09/06/2020	4.30E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
14/09/2020	1.50E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
15/12/2020	2.50E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
09/03/2021	2.30E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
15/06/2021	2.40E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
14/09/2021	2.40E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
13/12/2021	2.60E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
22/03/2022	2.60E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
14/06/2022	6.30E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
20/09/2022	5.91E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
12/12/2022	2.40E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
13/03/2023	4.60E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
13/06/2023	2.50E+05	5.00E+04	NO CUMPLE
VALOR PROMEDIO	2.60E+05	5.00E+04	NO CUMPLE

4.8.6. Diagnóstico respecto al cumplimiento con el Anexo – 2 del RMCH de la ley 1333

Como ya se indicó arriba el agua residual de la PTAR no confluye con el Río Guadalquivir, se reutiliza para riego en el trayecto de la Quebrada Sagredo. Esta quebrada no tiene clasificación, por lo que debería cumplir con el Anexo A-2 del RMCH de la ley 1333 para cauces sin clasificación. Por esta razón se hace este análisis.

4.8.6.1. Análisis de DBO en la salida de la PTAR

CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333

DBO₅ en salida de PTAR

FECHA	DBO ₅ mg/L	LÍMITES PERMISIBLES LEY 1333 ANEXO A-2	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	34.80	80	CUMPLE
10/03/2020	43.65	80	CUMPLE
09/06/2020	33.24	80	CUMPLE
14/09/2020	28.20	80	CUMPLE
15/12/2020	28.20	80	CUMPLE
09/03/2021	43.65	80	CUMPLE
15/06/2021	41.65	80	CUMPLE
14/09/2021	40.61	80	CUMPLE
13/12/2021	43.65	80	CUMPLE
22/03/2022	53.25	80	CUMPLE
14/06/2022	62.20	80	CUMPLE
20/09/2022	26.00	80	CUMPLE
12/12/2022	86.25	80	NO CUMPLE
13/03/2023	30.20	80	CUMPLE
13/06/2023	37.60	80	CUMPLE

VALOR PROMEDIO	35.29	80	CUMPLE
-----------------------	--------------	-----------	---------------

Fuente: Elaboración propia

4.8.6.2. Análisis de DQO en la salida de la PTAR

Tabla30. CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 DQO en salida de PTAR

FECHA	DQO mg/L	LÍMITES PERMISIBLES LEY 1333 ANEXO A-2	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	61.54	250	CUMPLE
10/03/2020	83.00	250	CUMPLE
09/06/2020	190.82	250	CUMPLE
14/09/2020	102.74	250	CUMPLE
15/12/2020	98.75	250	CUMPLE
09/03/2021	84.19	250	CUMPLE
15/06/2021	154.59	250	CUMPLE
14/09/2021	81.29	250	CUMPLE
13/12/2021	71.29	250	CUMPLE
22/03/2022	84.59	250	CUMPLE
14/06/2022	125.49	250	CUMPLE
20/09/2022	150.98	250	CUMPLE
12/12/2022	35.46	250	CUMPLE
13/03/2023	133.00	250	CUMPLE
13/06/2023	78.00	250	CUMPLE

VALOR PROMEDIO	103.51	250	CUMPLE
-----------------------	---------------	------------	---------------

Fuente: Elaboración propia

4.8.6.3. Análisis de SST en la salida de la PTAR

Tabla31. CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 SST en salida de PTAR

FECHA	SST mg/L	LÍMITES PERMISIBLES LEY 1333 ANEXO A-2	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	75.00	60	NO CUMPLE
10/03/2020	128.00	60	NO CUMPLE
09/06/2020	112.00	60	NO CUMPLE
14/09/2020	119.00	60	NO CUMPLE
15/12/2020	123.00	60	NO CUMPLE
09/03/2021	156.00	60	NO CUMPLE
15/06/2021	188.00	60	NO CUMPLE
14/09/2021	159.00	60	NO CUMPLE
13/12/2021	177.00	60	NO CUMPLE
22/03/2022	64.00	60	NO CUMPLE
14/06/2022	64.00	60	NO CUMPLE
20/09/2022	48.00	60	CUMPLE
12/12/2022	88.00	60	NO CUMPLE
13/03/2023	112.00	60	NO CUMPLE
13/06/2023	127.00	60	NO CUMPLE
VALOR PROMEDIO	118.83	60	NO CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

4.8.6.4. Análisis del pH en la salida de la PTAR

El pH es un coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.

“el pH neutro es 7: si el número es mayor, la solución, es básica, y si es menor, es ácida”

Tabla32. pH en salida de PTAR CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333

FECHA	pH	LÍMITES PERMISIBLES LEY 1333 ANEXO A-2	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	7.19	de 6 a 9	CUMPLE
10/03/2020	7.20	de 6 a 9	CUMPLE
09/06/2020	7.01	de 6 a 9	CUMPLE
14/09/2020	7.11	de 6 a 9	CUMPLE
15/12/2020	6.91	de 6 a 9	CUMPLE
09/03/2021	7.19	de 6 a 9	CUMPLE
15/06/2021	7.42	de 6 a 9	CUMPLE
14/09/2021	7.18	de 6 a 9	CUMPLE
13/12/2021	7.19	de 6 a 9	CUMPLE
22/03/2022	7.72	de 6 a 9	CUMPLE
14/06/2022	7.68	de 6 a 9	CUMPLE
20/09/2022	7.78	de 6 a 9	CUMPLE
12/12/2022	7.20	de 6 a 9	CUMPLE
13/03/2023	7.72	de 6 a 9	CUMPLE
13/06/2023	7.68	de 6 a 9	CUMPLE
VALOR PROMEDIO	7.10	de 6 a 9	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

4.8.6.5. Análisis de Coliformes Totales en la salida de la PTAR

Tabla33. CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 COLIFORMES TOTALES en salida de PTAR

FECHA	COLIFORMES TOTALES NMP/100ml	LÍMITES PERMISIBLES LEY 1333 ANEXO A-2	CUMPLIMIENTO
16/12/2019	6.50E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
10/03/2020	2.40E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
09/06/2020	4.30E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
14/09/2020	1.50E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
15/12/2020	2.50E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
09/03/2021	2.30E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
15/06/2021	2.40E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
14/09/2021	2.40E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
13/12/2021	2.60E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
22/03/2022	2.60E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
14/06/2022	6.30E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
20/09/2022	5.91E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
12/12/2022	2.40E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
13/03/2023	4.60E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
13/06/2023	2.50E+05	1.00E+03	NO CUMPLE
VALOR PROMEDIO	2.60E+05	1.00E+03	NO CUMPLE

Fuente: Elaboracion propia.

4.8.6.6. Análisis de Fosforo Totales de la PTAR

Resultados de Laboratorio de Fósforo Total

La tabla a continuación resume las concentraciones de Fósforo Total (P Total) en las muestras de entrada (afluente) y salida (efluente) del sistema de tratamiento.

Tabla34. resultados de las muestras de Fósforo Total (P Total) del afluente y efluente

Muestra	Parámetro	Unidad	Concentración de Entrada (Afluente)	Concentración de Salida (Efluente)
1	Fósforo Total	mgP/l	10.6	8.54
2	Fósforo Total	mgP/l	11.9	4.7
3	Fósforo Total	mgP/l	20.5	8.3

Nota: el tipo de muestra es compuesta tomada durante diferente período para la medición del parámetro en la descarga líquida.

Análisis de Eficiencia del Tratamiento

La eficiencia de remoción de Fósforo Total en cada muestra se calcula mediante la siguiente fórmula:

Tabla35. Eficiencia de remoción de Fósforo Total

Muestra	P Total Entrada (mgP/l)	P Total Salida (mgP/l)	Remoción (mgP/l)	Eficiencia (%)
1	10.6	8.54	2.06	19.43%
2	11.9	4.7	7.2	60.50%
3	20.5	8.3	12.2	59.51%
Promedio	14.33	7.18	7.15	46.48%

Análisis:

El sistema de tratamiento mostró una eficiencia de remoción inconsistente, con un promedio general de 46.48%. La Muestra N°1 presentó una remoción muy baja (19.43%), lo que sugiere una falla temporal o un proceso de tratamiento ineficiente en ese momento. Las Muestras N°2 y N°3 mostraron eficiencias moderadas (alrededor del 60%).

Comparación con la Normativa Boliviana (Ley N°1333)

El marco legal boliviano se rige por la Ley del Medio Ambiente N°1333 (1992) y su Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) (D.S. N°24176 de 1995).

Límite Permisible (LMP) de Fósforo Total

El RMCH clasifica los cuerpos de agua receptores (ríos, lagos, etc.) en Clases A, B, C y D, y establece los Límites Máximos Admisibles (LMA) para preservar su calidad.

El RMCH (Anexo A-2, para el caso de descargas que no tienen una clasificación específica de cuerpo receptor o para las que se deben tomar como referencia para descargas no clasificadas) no establece límites que varían según la clase de cuerpo de agua al que se descarga. Sin embargo, para el parámetro de Fósforo Total (que engloba el Fósforo Total en la norma):

Parámetro	Unidad	Límite Máximo Admisible
Fósforo Total	mg/l	8.0 (Común en regulaciones de descarga no especializadas)

El límite permisible exacto para Fósforo Total (P Total) según el Anexo A-2 o el Anexo 13-C del RMCH (DS 24176) puede depender de la clasificación del cuerpo receptor. No obstante, 8.0 mg/l es un valor frecuentemente usado como referencia para descargas en general.

Tabla36.CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 **Fósforo Total** en salida de PTAR

Muestra	Concentración de Salida (mgP/l)	Límite Permisible Referencial (mgP/l)	Cumplimiento	Observación
Muestra 1	8.54	8.0	no cumple	Excede el límite
Muestra 2	4.70	8.0	cumple	Dentro del límite
Muestra 3	8.30	8.0	no cumple	Excede el límite
Promedio	7.18	8.0	cumple	Dentro del límite

Los resultados nos indican que el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley N°1333 de Bolivia establece Límites Máximos Admisibles (LMA) para distintos parámetros en cuerpos receptores (Anexo 13-A del Reglamento), clasificados según su aptitud de uso (Clase A, B, C, D).

Para el **fósforo total**, el Anexo A-2 no especifica un límite. Sin embargo, en la normativa boliviana, para la descarga a un cuerpo de agua (quebradas) no clasificado, se toman como referencia otros límites. Si bien el reglamento no muestra un valor específico para fósforo total, generalmente se consideran perjudiciales, especialmente en cuerpos de agua superficiales, debido a que el fósforo es un nutriente que puede causar eutrofización (crecimiento excesivo de algas).

4.8.6.7. Análisis de Nitrógeno Totales de la PTAR

Los resultados de laboratorio muestran las concentraciones de Nitrógeno Total (N-Total) en el afluente (entrada) y el efluente (salida) de la PTAR.

Tabla37.Resultados de las muestras de Nitrógeno Total (P Total) del afluente y efluente

Muestra	Parámetro	Unidad	Concentración de Entrada (Afluente)	Concentración de Salida (Efluente)
1	Nitrógeno Total	mgP/l	89.6	86.8
2	Nitrógeno Total	mgP/l	95.2	84
3	Nitrógeno Total	mgP/l	112	100.8

Nota: el tipo de muestra es compuesta tomada durante diferentes periodos para la medición del parámetro en la descarga líquida.

Análisis de Eficiencia del Tratamiento

La eficiencia de remoción de Nitrógeno Total en cada muestra se calcula mediante la siguiente fórmula:

Tabla38.Eficiencia de remoción de Nitrógeno Total

Muestra	N Total Entrada (mg/l)	N Total Salida (mg/l)	Remoción (mg/l)	Eficiencia (%)
1	89.6	86.8	2.8	3.13%
2	95.2	84.0	11.2	11.87%
3	112.0	100.8	11.2	10.00%
Promedio	98.93	90.53	8.40	8.49%

Eficiencia Promedio: 8.49% P Total Salida (mgP/l)

Análisis:

El sistema de tratamiento mostró una eficiencia de remoción con un promedio general de 8.49% para Nitrógeno Total es extremadamente baja la Muestra N°1 presentó una remoción muy baja (3.13%), lo que sugiere una falla temporal o un proceso de tratamiento ineficiente en ese momento. Las Muestras N°2 y N°3 mostraron eficiencias moderadas (alrededor del 11.87%).

Límite Máximo Admisible

A continuación, se presenta el parámetro y el límite máximo admisible referencial para el análisis de la descarga (Salida) del agua residual, tomando como base el contexto de la normativa y la práctica ambiental, ante la ausencia del valor de N Total en el Anexo A-2.

Parámetro	Unidad	Límite Máximo Admisible (LMA) - Descarga (Referencial)	Base Legal / Comentario
Nitrógeno Total (NTotal)	mg/L	50	Límite Referencial utilizado para el análisis de cumplimiento. El Anexo A-2 no especifica LMA para N Total.

Se compara el resultado de la descarga (Salida) con el LMA referencial de 50 mg/L.

Tabla39.CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 Nitrógeno Total en salida de PTAR

Muestra	Parámetro	Unidad	Resultado de Salida	Límite Máximo Admisible (LMA) (Referencial)	¿Cumple o No Cumple?
1	Nitrógeno Total	mg/L	86.8	50	NO CUMPLE
2	Nitrógeno Total	mg/L	84.0	50	NO CUMPLE
3	Nitrógeno Total	mg/L	100.8	50	NO CUMPLE

Comparación con la Normativa Boliviana (Ley N°1333)

Para el análisis de descargas líquidas en Bolivia, es crucial referirse al Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), que reglamenta la Ley N° 1333.

- Nitrógeno Total (NT): Este parámetro no se encuentra directamente listado con un Límite Máximo Permisible (LMP) en el Anexo A-2 (Límites Permisibles para Descargas Líquidas) del RMCH.

- **Parámetro Relacionado:** En el Anexo A-2, el parámetro relacionado con el nitrógeno es el Nitrógeno Amoniacal c/N ($\text{NH}_3\text{-N}$), cuyo límite máximo permisible para la descarga a un cuerpo de agua es de 10 mg/L.

Importante sobre los Anexos A-1 y A-2:

- El Anexo A-1 del RMCH establece los Límites Máximos Admisibles de parámetros en los Cuerpos Receptores (ríos, lagos, etc.), clasificando el agua según su uso (Clases A, B, C, D). Estos límites se aplican al cuerpo de agua natural, no al efluente de la planta de tratamiento.
- El Anexo A-2 (o Anexo 1 del RMCH) es el que establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para las Descargas Líquidas (efluentes), que es lo que se aplica al agua de salida de su sistema de tratamiento.

Dado que el Nitrógeno Total no tiene un límite directo, el análisis se realizará primero evaluando la eficiencia de remoción del sistema y, de manera referencial, comparando los resultados con el LMP del Nitrógeno Amoniacal, asumiendo que el Nitrógeno Amoniacal constituye una parte significativa del Nitrógeno Total y es el parámetro regulado.

Diferencia entre nitrógeno total y nitrógeno amoniacal

Parámetro	Definición	Relevancia
Nitrógeno Total (NT)	El nitrógeno total (NT) es la suma de todas las formas de nitrógeno presentes en una muestra	Indica la carga total de nutrientes que contribuye a la eutrofización.
Nitrógeno Amoniacal (NH_3) (NH_4^+)	se refiere únicamente al nitrógeno presente como amonio o amoniaco. Esta es la forma predominante de nitrógeno en las aguas residuales crudas y es la más tóxica para la vida acuática, especialmente a valores altos de pH y temperatura, donde predomina el amoniaco NH_3 .	Es la forma más importante y potencialmente tóxica para la vida acuática, especialmente el amoníaco no ionizado (NH_3) a pH y a temperaturas elevadas.

4.8.7. Análisis de la posibilidad de reusó

A continuación, se evalúa la posibilidad de reusar, las aguas residuales tratadas de la PTAR del barrio Catedral.

Para esto hacemos uso de la Normativas que se menciona en la Guía técnica de selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales.

La calidad del agua tratada que sale de la PRAR Catedral es la siguiente:

EFLUENTE				
COLIFORMES FECAL	DBO5	DQO	SST	ph
NMP/100ml	Mg/L	Mg/L	Mg/L	
6.50E+05	34.8	61.54	75	7.19
2.40E+05	43.65	83	128	7.2
4.30E+05	33.24	190.82	112	7.01
1.50E+05	28.2	102.74	119	7.11
2.50E+05	28.2	98.75	123	6.91
2.30E+05	43.65	84.19	156	7.19
2.40E+05	41.65	154.59	188	7.42
2.40E+05	40.61	81.29	159	7.18
2.60E+05	43.65	71.29	177	7.19
2.60E+05	53.25	84.59	64	7.72
6.30E+05	62.2	125.49	64	7.68
5.91E+05	26	150.98	48	7.78
2.40E+05	86.25	35.46	88	7.2
4.6E+05	30.2	133	112	7.72
2.50E+05	37.6	78	127	7.68

4.8.8. Valoración con la Normativa de Bolivia

Se evaluará la calidad del agua sin mezclarse con aguas de ningún cauce, para ver si se puede usar directamente.

Para esto se debe evaluar si la calidad entra dentro de los parámetros límite de aguas de tipo A, B, C o D.

	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
Sólidos sedimentables (mg/L)	<10	30 <0,1 mL/L	<50 <1ml/l	<100 <1 ml/l
DBO ₅ (mg/L)	<2	<5	<20	<30
DQO (mg/L)	<5	<10	<40	<60
Coliformes fecales (NMP/100mL)	<50 y <5 en 80% de muestra	<1.000 y <200 en 80% de muestras	<5.000 y <1000 en 80% de muestras	<50.000 y <5000 en 80% de muestras
Parásitos (N/L)	<1	<1	<1	<1
Fosfato total (mgPO ₄ /L)	0,4	0,5	1	1
Amoniaco (mgNH ₃ /L)	0,05	1	2	4
Nitrato (mg NO ₃ /L)	20,0	50,0	50,0	50,0
Nitrato (mg N/L)	<1,0	1,0	1,0	1,0
Nitrógeno total (mg N/L)	5	12	12	12

En el apartado 4.8.3. de este documento, se pudo constatar que las aguas efluentes de la PTAR Catedral, con sus datos disponible, no entran dentro de esta clasificación, ya que la mayoría de los datos superan los límites permisibles de las aguas de tipo A, B, C o D. Solo en algunas muestras le alcanza para considerarse agua de tipo D.

Para su reúso directo, necesita un poco más de eficiencia de tratamiento.

4.8.9. Valoración con las Directrices de la OMS

Para valorar el reúso, aplicando las Directrices de la OMS se requiere comparar los valores de esta tabla.

Tabla40. Objetivos basados en la salud y objetivos de reducción de helmintos para el uso de agua residuales tratadas en la agricultura

Tipo de riego	Objetivo basado en la salud para patógenos virales, bacterianos y protozoos	Objetivo de reducción para huevos de helmintos
Sin restricciones	$\leq 10^6$ DAI. Y por persona y año ¹	≤ 1 por litro (media aritmética) ²³
Restringido	$\leq 10^6$ DAI. Y por persona y año ¹	≤ 1 por litro (media aritmética) ²³
Localizado (por ejemplo, por goteo)	$\leq 10^6$ DAI. Y por persona y año ¹	a) Cultivos de ciclo corto ≤ 1 por litro (media aritmética) b) Cultivos de ciclo largo no existe recomendación

En los datos disponibles de la PTAR Catedral, no se dispone de estos valores (patógenos en unidades de DALY por persona y año), por lo tanto, no se pudo evaluar el reúso aplicando estas directrices de la OMS.

4.8.10. Valoración con la Normativa de la Unión Europea (UE)

Los valores guía para valorar el cumplimiento de esta normativa se indica en la siguiente tabla:

Tabla41. Requisitos de calidad del agua residual para riego agrícola.

Clase de calidad del agua reusada	Tipo de tratamiento	Requisitos de calidad				
		E.coli(n ² /100mL)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)	Turbidez (NTU)	OTROS
A	Tratamiento secundario. Filtración y desinfección	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	Legionella spp; <1000 UFC/1. Cuando haya riesgo de aerosolización. Nematodos intestinales (huevos de helmintos): ≤ 1 huevo/L para irrigación de pastos o forraje
B	Tratamiento secundario y desinfección	≤ 100			-	
C	Tratamiento secundario y desinfección	≤ 1000	De acuerdo a la directiva 91/271 CEE (Anexo I, tabla 1)	De acuerdo a la directiva 91/271 CEE (Anexo I, tabla 1)	-	
D	Tratamiento secundario y desinfección	≤ 10000			-	

Cuadro 1: requisitos por los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanos sujetos a los dispuestos, se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

parámetros	concentración	Porcentaje mínimo de Reducción ⁽¹⁾	Método de medidas de referencia
Demanda química de oxígeno (DQO 5 a 20 °c) sin nitrificación ⁽²⁾	25 mg/ O ₂	70-90 40 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar Determinación del oxígeno disuelto antes y después de 5 días de incubación a 20 °C ± 1 °C en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de la nitrificación
Demanda química de oxígeno (DQO)	125 mg/ O ₂	75	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar, Dicromático potásico
Total, de sólidos en suspensión	35 mg/l ⁽³⁾ 35 de conformidad con el aparato 2 del artículo 4 (más de 1000e-h) 60 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (de 2000 a 10000 e-h)	90 ⁽³⁾ 90 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (más de 10000 e-h) 70 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (de 2000 a 10000 e-h)	-Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105 °c y pesaje. -Centrifugación de una muestra representativa (durante 5 minutos como mínimo, con una aceleración media de 2800 a 3200 g), Secado a 105 °c y pesaje.

⁽¹⁾ Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada

⁽²⁾ este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO) si puede establecerse una correlación entre DBO₅ y el parámetro sustitutivo

Los análisis de vertidos procedentes de fosos de fermentación se llevarán a cabo sobre muestras filtradas; no obstante, la concentración de sólidos totales en suspensión en las muestras de agua sin filtrar no deben superar los 150 mg/l.

EFLUENTE				
COLIFORMES FECALES	DBO ₅	DQO	SST	ph
NMP/100ml	Mg/L	Mg/L	Mg/L	
6.50E+05	34.8	61.54	75	7.19
2.40E+05	43.65	83	128	7.2
4.30E+05	33.24	190.82	112	7.01
1.50E+05	28.2	102.74	119	7.11
2.50E+05	28.2	98.75	123	6.91
2.30E+05	43.65	84.19	156	7.19
2.40E+05	41.65	154.59	188	7.42
2.40E+05	40.61	81.29	159	7.18
2.60E+05	43.65	71.29	177	7.19
2.60E+05	53.25	84.59	64	7.72
6.30E+05	62.2	125.49	64	7.68
5.91E+05	26	150.98	48	7.78
2.40E+05	86.25	35.46	88	7.2
4.6E+05	30.2	133	112	7.72
2.50E+05	37.6	78	127	7.68

Los datos disponibles, permite corroborar que en:

- El Coli, no cumple para ninguna de las clases de reusó, supera el 10+4 NMP/100ml.
- En DBO₅, no cumple para ningún tipo de reusó, supera los 25 mg/L.
- En DQO, no cumple para ningún tipo de reusó, supera los 125 mg/L.
- En SST, no cumple para ningún tipo de reuso, supera los 60 mg/L.

También evaluamos, con la siguiente tabla, el cual incluye clasificación de tipo E y F.

Tabla42. Grupos de calidad en función de los límites bacteriológicos establecidos en el R.D. 1620/2007.

Usos		Valor Máximo Admisible (VMA)			
		Calidad	E. coli UFC/100mL	Nematodos Huevos/10 L	Legionella spp. UFC/L ²
Ambiental 5.3 a) y b)	Riego de bosques y zonas verdes no accesibles al público silvicultura	E	No se fija límite	No se fija limite	No se fija límite
Ambiental 5.4 a)	Mantenimiento de humedales, caudales mínimos	F	La calidad requerida se estudiará caso por caso		

De acuerdo a esta tabla de la UE, el agua tratada se puede usar en:

- Riego de bosques y zonas verdes “no” accesibles al público.

- Mantenimiento de humedales, siempre que no represente riesgo a la salud o cause daño ambiental.

4.8.11. Valoración con la Normativa de México

La tabla siguiente nos da los valores guía para valorar el reúso:

Tabla43. NOM-003-SEMARNAT- 1997. Límites máximos permitidos de contaminantes promedio mensual

Tipos de reúso	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	Huesos de helminto (huevo/L)	Aceites y grasas (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
Servicio al público con contacto directo	240	1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1000	5	15	30	30

Los datos disponibles, permite corroborar que en:

- El Coli, no cumple para ninguna de las clases de reúso, supera el 10+3 NMP/100ml.
- En DBO₅, no cumple para ningún tipo de reúso, supera los 30 mg/L.
- En SST, no cumple para ningún tipo de reúso, supera los 30 mg/L.

De acuerdo a estas exigencias de calidad, no se puede reusar, ni en servicios al público con contacto directo, ni con contacto indirecto u ocasional. Para un uso directo requiere afinar un poco la calidad del agua en la PTAR.

4.8.12. Valoración con la Normativa de Israel

La legislación israelí establece las siguientes normas sanitarias vigentes de calidad de efluentes, actualizadas en 1999 [8, 9]:

Parámetro unidades	Coliformes fecales por 100 ml	DBO Mg/l (max.)	Sólidos suspendidos mg/l (max)	Oxígeno disuelto mg / min.)
Efluentes en general	10	20	30	0.5
Cultivos industriales		60	90	
Jardines	10	20	30	0.5
Canchas de golf	14	20	30	0.5

Fuente: Valoración de las aguas residuales en Israel como un recurso Agrícola (2004)

EFLUENTE				
COLIFORMES FECALIS	DBO5	DQO	SST	ph
NMP/100ml	Mg/L	Mg/L	Mg/L	
6.50E+05	34.8	61.54	75	7.19
2.40E+05	43.65	83	128	7.2
4.30E+05	33.24	190.82	112	7.01
1.50E+05	28.2	102.74	119	7.11
2.50E+05	28.2	98.75	123	6.91
2.30E+05	43.65	84.19	156	7.19
2.40E+05	41.65	154.59	188	7.42
2.40E+05	40.61	81.29	159	7.18
2.60E+05	43.65	71.29	177	7.19
2.60E+05	53.25	84.59	64	7.72
6.30E+05	62.2	125.49	64	7.68
5.91E+05	26	150.98	48	7.78
2.40E+05	86.25	35.46	88	7.2
4.6E+05	30.2	133	112	7.72
2.50E+05	37.6	78	127	7.68

Los datos disponibles, permite corroborar que en:

- El. Coli, no cumple para ningún tipo de reusó.
- En DBO₅, los valores de la PTAR Catedral son menores a 60 Mg/L. Por lo tanto, puede ser reusado en cultivos industriales.
- En SST, varias muestras dan valores menores a 90 mg/L. Por lo tanto, puede ser reusado en cultivos industriales.

De acuerdo a estas exigencias de calidad de la normativa de Israel, se cumple a medias para el reusó en cultivos industriales. Requiere afinar un poco más, la calidad del agua en la PTAR.

4.8.13. Valoración con la Normativa de Chile

En las tablas siguientes se define la calidad de las aguas grises tratadas para cada uno de los usos definidos en el artículo 8° de la ley y 34° de este reglamento.

Tabla44. Usos urbanos

Parámetro	Unidad	Límite máximo
DBO ₅	mg/l	10
SST	mg/l	10
CF	NMP/100ml	10
Turbiedad	UNT	5
Cloro libre residual	mg/l	$0,5 \leq X \leq 2$

Fuente: Reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises. núm. 40.- Santiago, 20 de abril de 2022.

Los resultados de la PTAR Catedral no cumplen con los requisitos para reúso urbano, según la normativa de Chile.

Tabla45. Usos recreativos

parámetro	unidad	Límite máximo	
		Riego superficial	Riego subsuperficial
DBO ₅	mg/l	30	50
SST	mg/l	30	50
CF	NMP/100ml	200	1000
Cloro libre residual	mg/l	$0,5 \leq X < 2$	----
Turbiedad	UNT	10	---

Los resultados de la PTAR Catedral no cumplen con los requisitos para reúso en riego de áreas recreativas, según la normativa de Chile

Tabla46. Ornamentales

Parámetro	Unidad	Límite máximo
DBO ₅	mg/l	70
SST	mg/l	70
CF	NMP/100 ml	1000
Turbiedad	UNT	30

Los resultados de la PTAR Catedral, cumple en DBO₅, algunas muestras cumplen en SST, pero no cumple en coliformes Fecales.

Tabla 47. Usos silvoagropecuarios

Parámetro	Unidad	Límite máximo
DBO₅	mg/l	70
SST	mg/l	70
CF	NMP/100 ml	1000

mg/l: miligramos por litro

NMP/100ml: número más probable por cien mililitros

UNT: unidades nefelométricas de turbiedad

Los resultados de la PTAR Catedral, cumple en DBO₅, algunas muestras cumplen en SST, pero no cumple en coliformes Fecales. Una desinfección al final del tratamiento, podría lograr que reduzcan los coliformes, de manera que sea factible el reúso agrícola y reúso en riego de bosques.

CAPÍTULO V

5. Análisis de resultados

5.1. Análisis sobre la información disponible

La planta cuenta con registro de caudales diarios de agua residual e inyección artificial de aire. Son una cantidad de datos importantes para estudiar el comportamiento, variación y relación con otras variables.

También realiza monitoreo de la calidad del agua, cada 3 meses, en la entrada y salida de la PTAR, en los parámetros más importantes como son: DBO, DQO, SST, pH y coliformes fecales. Estos datos de muestreo son muy valiosos y dan un panorama del funcionamiento de la planta desde el inicio de su puesta en marcha. Con estos datos ha sido totalmente viable determinar las eficiencias de esta tecnología de tratamiento y analizar la posibilidad de reúso directo de estas aguas.

5.2. Análisis de la situación actual de la planta

Las instalaciones en general están en buen estado, tienen un mantenimiento constante y adecuado. Esta planta tiene una tecnología moderna y automatizada, consume bastante energía para inyectar aire a los reactores, no se siente malos olores, sus equipos de monitoreo pueden medir y almacenar la información digitalmente.

5.3. Análisis de caudal vs caudal de diseño

El caudal de diseño (Q_d) es de **1.6 L/s**. Este valor es el caudal teórico máximo que la planta de tratamiento o el sistema de alcantarillado está diseñado para manejar de manera eficiente y segura. Se calcula considerando la población futura y el período de diseño para garantizar que la infraestructura tenga la capacidad adecuada.

Los datos de caudal medidos son:

Caudal promedio (Q_{prom}): 0.62 L/s

Caudal mínimo (Q_{min}): 0.04 L/s

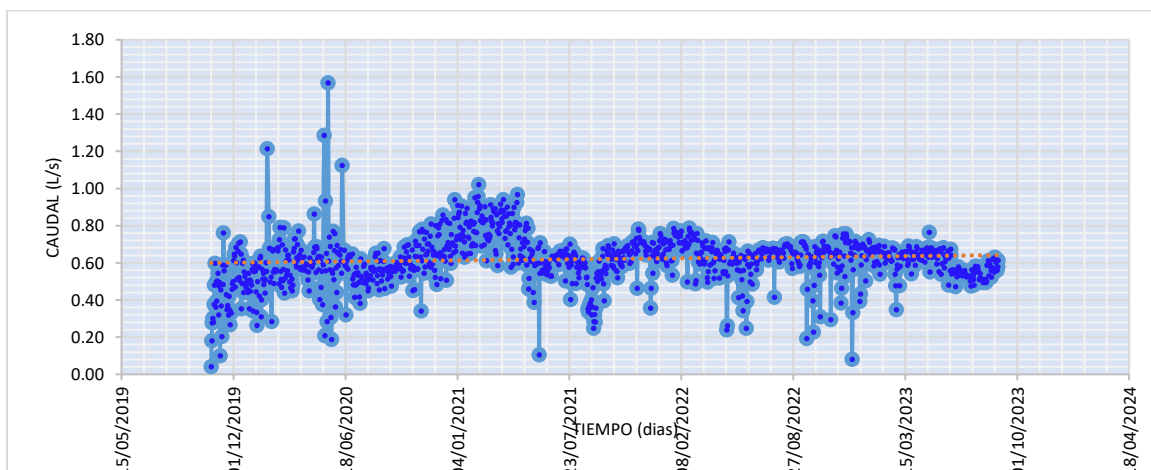
Caudal máximo (Q_{max}): 1.57 L/s

Al comparar estos valores, se observa que:

- El caudal promedio (0.62 L/s) es significativamente menor que el caudal de diseño (1.6 L/s). Esto indica que, en condiciones de operación normales, la planta está trabajando muy por debajo de su capacidad máxima. Esto puede ser una buena señal de que la planta está bien dimensionada para el uso actual, pero también podría sugerir que la población real o el consumo de agua es menor de lo proyectado, o que hay un bajo coeficiente de retorno de aguas residuales.
- El caudal máximo (1.57 L/s) es muy cercano al caudal de diseño (1.6 L/s). Esto es un punto crítico. La cercanía entre ambos valores significa que, en los momentos de mayor demanda, el sistema casi alcanza su límite de capacidad. Cualquier aumento en la población o en el consumo de agua por encima de las proyecciones podría llevar a que el caudal máximo supere el caudal de diseño, lo que podría comprometer el rendimiento de la planta y causar problemas como desbordamientos, saturación de los sistemas de bombeo, o un tratamiento ineficiente.
- El caudal mínimo (0.04 L/s) es extremadamente bajo en comparación con el caudal de diseño. Esta gran variación entre los caudales mínimos y máximos (una diferencia de aproximadamente 40 veces) es algo común en los sistemas de alcantarillado. El diseño debe ser capaz de manejar tanto los flujos mínimos (que pueden causar problemas de sedimentación) como los flujos máximos (que pueden sobrecargar la planta).

5.4. Análisis de la variación de los caudales

Figura 41. Variación del caudal en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Desde la puesta en marcha de la PTAR, no hay una tendencia notable de aumento o descenso de caudales. La planta ha sido concebida como un PILOTO para obtener información para el diseño e implementación de plantas con similares características, verificando si funciona bien en nuestro medio y para el tipo de agua residual previsto. Los valores extremos no son tendencia, por lo que no son analizados.

5.5. Análisis sobre las características de las aguas residuales urbanas.

En el siguiente cuadro extraído de la Guía de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de aguas residuales, se indica valores de principales parámetros que clasifican el agua residual en fuerte, media y débil.

	Contaminación fuerte	Contaminación media	Contaminación débil
Sólidos en suspensión (mg/L)	350	220	100
DBO ₅ (mg/L)	400	220	110
DQO (mg/L)	1.000	500	250
COT (mg/L)	290	160	80
N _T (mg N/L)	85	40	20
N _{orgánico} (mg N/L)	35	15	8
N _{amoniaco} (mgN/L)	50	25	12
P _T (m gP/L)	15	8	4
P _{orgánico} (mgP/L)	5	3	1
P _{inorgánico} (mgP/L)	10	5	3
Coliformes totales (NMP/100 mL)	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁶ -10 ⁷
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁵ -10 ⁶

A continuación, mostramos los datos de calidad del agua entrante a la PTAR Catedral:

AFLUENTE				
COLIFORMES FECALIS	DBO5	DQO	SST	ph
NMP/100ml	Mg/L	Mg/L	Mg/L	
4.40E+07	406	923	176.53	7.79
3.60E+07	142	325	168.45	8.26
6.50E+07	319	513.74	161.47	7.71
6.40E+07	296	587.14	185.23	7.81
6.30E+07	296	487.14	174.13	7.51
3.60E+07	486.5	387.15	235.95	7.03
4.30E+07	586.5	527.55	247.67	7.69
4.50E+07	516.5	417.23	237.73	7.32
4.60E+07	566.3	387.71	245.93	7.28
3.60E+07	356.2	427.51	387	7.95
4.40E+07	257	392.16	305.73	7.79
3.60E+07	375	527.46	348.92	8.01
1.10E+07	268	475.25	373.18	7.93
4.5E+07	363	459.2	219	7.95
5.60E+07	289.2	342	239	7.79

Los datos de agua entrante indican que se presenta una Contaminación que varía de Media a Fuerte.

5.6. Análisis de la relación DBO₅/DQO

La relación DBO₅/DQO con valores de ingreso a la PTAR Catedral, nos indica que predominan las aguas residuales muy biodegradables, se verifica que son aguas residuales domésticas. Existen cuatro mediciones donde la DBO es mayor a la DQO, lo cual no es común que se dé. Para este análisis estos datos no fueron tomados en cuenta.

El promedio de todas las mediciones da como resultado un valor de DBO₅/DQO igual 0.64, al ser mayor a 0.4 se pueden tratar por medios biológicos. Se verifica que la planta de tratamiento del barrio Catedral está tratando aguas residuales domesticas con alta biodegradabilidad.

5.7. Análisis y comparación de eficiencias

Demanda bioquímica de oxígeno, DBO

La PTAR del barrio Catedral, presenta eficiencias que varían desde 68% hasta 93% con una media de 87%.

Comparado estos valores con la tecnología de lodos activados convencional se puede ver que son parecidos (ver Tabla 3). Además, esta tecnología ofrece eficiencias en remoción de DBO₅ mayores a las otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Según la publicación de la empresa “AGUA SIGMA”, el sistema compacto Sigma MBBR, generalmente presenta una eliminación global de la materia orgánica (DBO₅) alrededor del 90%. El valor determinado en el presente proyecto de grado, concuerda con los datos de la empresa “AGUA SIGMA.

En la publicación de la EPA (United States Environmental Protection Agency Washington, D.C. septiembre de 1999) en el “Folleto informativo de tecnología de aguas residuales mediante Reactores secuenciales por tandas” SBR, indican que en base a sus observaciones se logra alcanzar eficiencias del 85 al 95%, pudiendo entregar efluentes con alta calidad alrededor de 10 mg/L de DBO. En la PTAR Catedral, se logró entregar hasta 26 mg/L DBO, este valor un poco por debajo de los alcanzados por la EPA.

Demanda química de oxígeno, DQO

Los datos del presente proyecto indican que la PTAR Catedral, presenta eficiencias que varían desde 63% hasta 93% con una media de 78%.

Comparado estos valores con la tecnología de lodos activados convencional (ver tabla 3) se puede ver que son parecidos. Además, esta tecnología ofrece eficiencias en remoción de DQO mayores a las otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Según la publicación de la empresa “AGUA SIGMA”, el sistema compacto Sigma MBBR, generalmente presenta una eliminación global de la DQO alrededor del 85%. Los valores determinados en el presente proyecto de grado, concuerda con los datos de la empresa “AGUA SIGMA.

Sólidos suspendidos totales, SST

Los datos del presente proyecto indican que la PTAR Catedral, presenta eficiencias que varían desde 24% hasta 86% con una media de 48 %. Comparado estos valores con la tecnología de lodos activados convencional se puede ver que la planta de tratamiento del Barrio Catedral en ocasiones presenta valores en el rango inferior muy bajos, pero, logra en otras ocasiones alcanzar valores en el rango superior parecidos al de la tecnología de lodos

activados. Respecto a otras tecnologías de tratamiento no es superior en eficiencias de remoción de SST, más bien se iguala en sus valores del rango superior.

Según la publicación de la empresa “AGUA SIGMA”, el sistema compacto Sigma MBBR, generalmente presenta una eliminación global de SST, alrededor del 87%. Los valores determinados en el presente proyecto de grado, están un poco bajo respecto a los datos de la empresa “AGUA SIGMA.

En la publicación de la EPA (United States Environmental Protection Agency Washington, D.C. septiembre de 1999) en el “Folleto informativo de tecnología de aguas residuales mediante Reactores secuenciales por tandas” SBR, indican que en base a sus observaciones el reactor SBR puede entregar un efluente de 10 mg/L de SST. Este valor por debajo de lo observado en la PTAR Catedral, ya que en esta el mejor valor es de 48 mg/L, pero aun así es muy buena eficiencia.

Coliformes fecales

Presenta eficiencias que varían desde 97.8 % hasta 99.8 % con una media de 99.3%. Esta eficiencia es afectada sobre todo por el tipo desinfección que puede variar respecto al usado en otras tecnologías. La planta de tratamiento del Barrio Catedral con su tecnología de tratamiento ofrece eficiencias en remoción de Coliformes fecales muy altos llegando casi al 100%.

Tabla48.Eficiencia de la PTAR del Barrio Catedral

Unidades de tratamiento	Eficiencia en la remoción en porcentaje						
	DBO	DQO	SS	P	N org	NH3- N	Patógenos
PTAR B. Catedral	68 - 93	63 - 93	24 - 86	Desp.	Desp.	Desp.	97.8 – 99.8

Fuente: Elaboración Propia

Tabla49. Eficiencia de remoción según diferentes autores

Unidades de tratamiento	Eficiencia en la remoción de contribuyentes, porcentaje						
	DBO	DQO	SS	P	N org	NH ₃ -N	Patógenos
Rejilla	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.
Desarenadores	0-5	0-5	0-10	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.
Sedimentadores primarios	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0	Desp.
Lodos activados (convencional)	80-95	80-95	80-90	10-25	15-20	8-15	Desp.
Filtro percolador							
Alta tasa, roca	65-80	60-80	60-80	8-12	15-50	8-15	Desp.
Súper tasa, plástico	65-85	65-85	65-85	8-12	15-50	8-15	
Cloración	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	100
Reactor UASB	65-80	60-80	60-70	30-40	---	---	Desp.
Reactor RAP	65-80	60-80	60-70	30-40	---	---	Desp.
Filtros anaerobios	65-80	60-80	60-70	30-40	---	---	Desp.
Laguna de oxidación	50-70	---	20-60	---	---	---	90-99.99
Lagunas anaerobias							
Lagunas aireadas	80-95	---	85-95	---	---	---	90-99.99
Lagunas facultativas							
Lagunas de maduración	80-90	---	63-75	30	---	---	90-99.99
	60-80	---	85-95	---	---	---	90-99.99
Ultra violeta	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	100

Fuente: Jairo Romero Rojas, Diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Nitrógeno total

La PTAR del barrio Catedral no mide este parámetro, pero al tratarse de aguas residual doméstica, puede tener una concentración media de 50 mg N / L (Guía de selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales).

En la publicación de la EPA (United States Environmental Protection Agency Washington, D.C. septiembre de 1999) en el “Folleto informativo de tecnología de aguas residuales

mediante Reactores secuenciales por tandas” SBR, indican que en base a sus observaciones el reactor SBR puede entregar un efluente entre 5 y 8 mg/L de Nitrógeno total. Este valor lo calificaría para ser agua de clase D.

El valor de 50 mg/L de nitrógeno total se considera como valor de referencia, representativo por la capacidad técnica del tratamiento secundario y cuerpos receptores no clasificados se asume el análisis debido a la ausencia de límite estricto en el anexo A-2 de la ley 1333 para efluentes no incluyen un límite específico Nitrógeno total clasificados sirve como un objeto de diseño razonable y representa como concentración promedio 40 a 60 mg/l para descargas no especializadas por lo que se adopta 50mg/l como valor de control de nitrógeno total en aguas residuales domésticas sin tratar, y es respaldada por la regulaciones y literatura internacional.

La justificación técnica del valor de Nitrógeno Total 50 mg/L como referencia para un efluente se basa en el rendimiento esperado de los tratamientos secundarios convencionales y en la caracterización típica del agua residual doméstica.

Respaldo Técnico en Ingeniería Sanitaria (Trabajos de Investigación) El valor de 50 mg/L surge de la literatura fundamental en ingeniería de aguas residuales, como los trabajos de Metcalf & Eddy: Concentraciones Típicas de Entrada: La investigación reporta que el Nitrógeno Total en el agua residual doméstica cruda varía típicamente entre 20 mg/L y 85 mg/L (Metcalf & Eddy). Un valor promedio usualmente citado para las aguas residuales municipales en América Latina y otras regiones se encuentra cerca o por encima de 50 mg/L y se adopta como valor de referencia y representativo para caracterizar el influente doméstico o la descarga bruta hacia un cuerpo receptor no clasificado.

Fósforo total

La PTAR del barrio Catedral no mide este parámetro, pero al tratarse de aguas residual doméstica, puede tener una concentración media de 8 mg.P / L (Guía de selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales).

En la publicación de la EPA (United States Environmental Protection Agency Washington, D.C. septiembre de 1999) en el “Folleto informativo de tecnología de aguas residuales mediante Reactores secuenciales por tandas” SBR, indican que en base a sus observaciones el reactor SBR puede entregar un efluente entre 1 y 2 mg/L de Fósforo Total, este contenido de fosforo es un nutriente necesario para las plantas. Este valor no lo calificaría para ser agua

de clase D, ya que requiere que sea menor a 1 mg/L. La PTAR Catedral, cuenta con la capacidad para bajar este valor a lo requerido.

Se adopta el valor de 8 mgP/L de fósforo total como referencia típica y cuando no hay grandes aportes industriales de la concentración de fósforo en aguas residuales domésticas, cuando no se dispone de datos propios o cuando cuerpo receptor no está clasificado. Este valor proviene de literatura técnica internacional y se usa para estimar cargas contaminantes, diseñar tratamientos y evaluar impactos de forma prudente y comparable.

Respaldo en Trabajos de Investigación (Metcalf & Eddy).

El trabajo de investigación citado la referencia en ingeniería del fosforo total aguas residuales proporciona el respaldo:

Metcalf & Eddy (2014) reportan que las concentraciones típicas de Fósforo Total en aguas residuales domésticas crudas varían en el rango de 4 a 15 mg/L, dependiendo de la contribución de detergentes y otras fuentes. Su referencia a 4 a 8 mg/L podría corresponder al rango bajo o a un promedio.

Al adoptar un límite de efluente de 8 mg/L, el objetivo es asegurar que la descarga no exceda la concentración esperada en el agua cruda (es decir, que al menos se cumpla con la asimilación biológica mínima o que se opere dentro de los parámetros esperados de una planta).

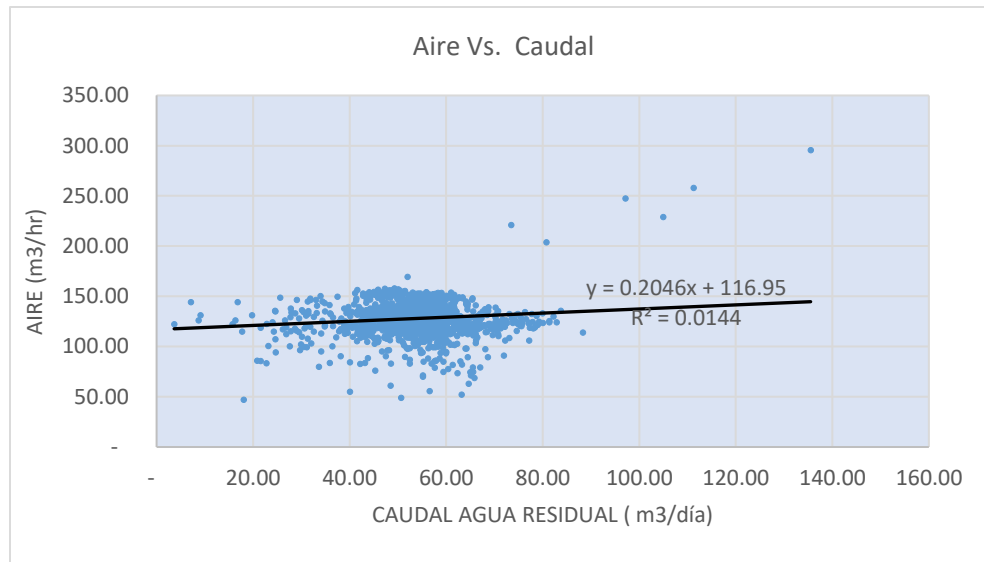
El valor de 8 mg/L es una media razonable y un límite de control de calidad para demostrar que la PTAR está operando con la eficiencia mínima esperada de un tratamiento secundario estándar, protegiendo al menos parcialmente al cuerpo receptor.

El valor de 8 mg/L para el Fósforo Total se asume de forma similar en el análisis técnico de efluentes por dos razones principales: es un límite de diseño alcanzable por la tecnología estándar y representa la concentración típica residual

Por ello, 8 mg/L representa el límite superior del rango típico, y se adopta como valor de referencia conservador cuando no existen mediciones locales.

5.8. Análisis de la variación del suministro de aire

Figura 42. Variación de la inyección de aire respecto al caudal de aguas residuales



El aire se usa para:

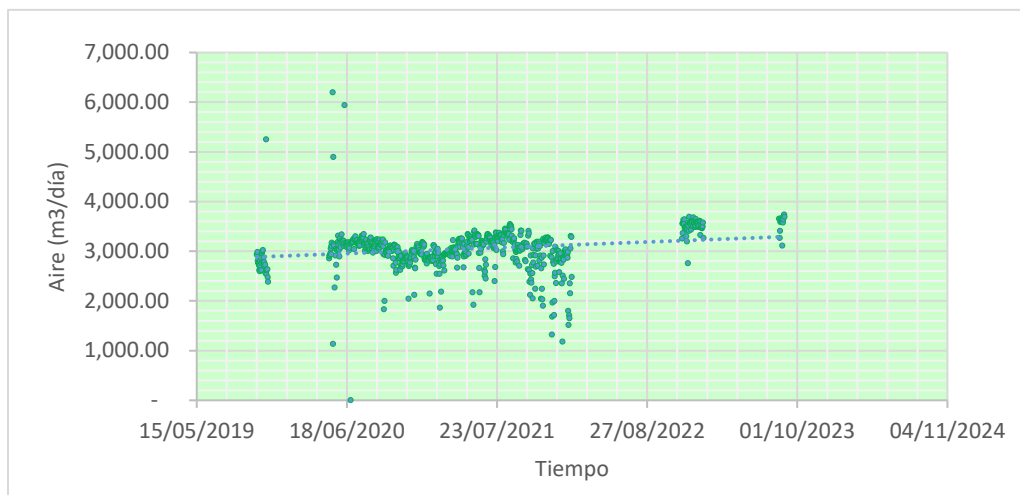
- 1.- Mantener el agua en constante movimiento. (Mezcla completa)
- 2.- Proveer de oxígeno a los microorganismos para su supervivencia.

Unos cuantos puntos esporádicos, indican una leve tendencia de que a mayor caudal se inyecta más cantidad de aire. Pero, no es representativa.

Más bien se puede decir que para caudales entre 45 a 65 m³/día de caudal se inyecta aire a una tasa de 100 a 150 m³/hr

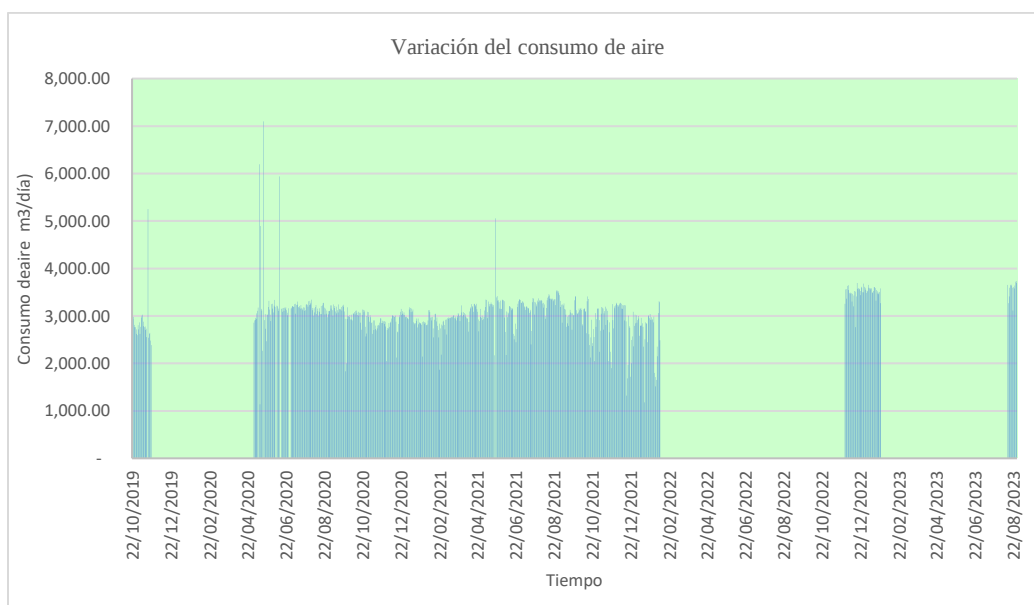
En la gráfica se puede notar que la inyección de aire es constante, casi sin importar el caudal que ingresa a la PTAR.

Figura 43. Análisis de la variación de la inyección de aire respecto al tiempo.



La variación del suministro de oxígeno respecto al tiempo tiene una tendencia en aumento, muy leve 500 m³/día. El suministro de aire es para el mejor desarrollo de los microorganismos encargados de la depuración del agua residual. La calidad del agua residual y el caudal líquido a tratar no han sufrido variaciones considerables, por lo que este incremento podría deberse a un natural desgaste de los equipos electromecánicos. Al ser un parámetro que tiene un costo económico es necesario profundizar este tema para encontrar con más precisión este leve incremento y verificar a futuro si esta tendencia va en aumento.

Figura 44. Variación del consumo de aire



Según la gráfica: el valor medio de consumo de aire por día es de 3000 m³/día.

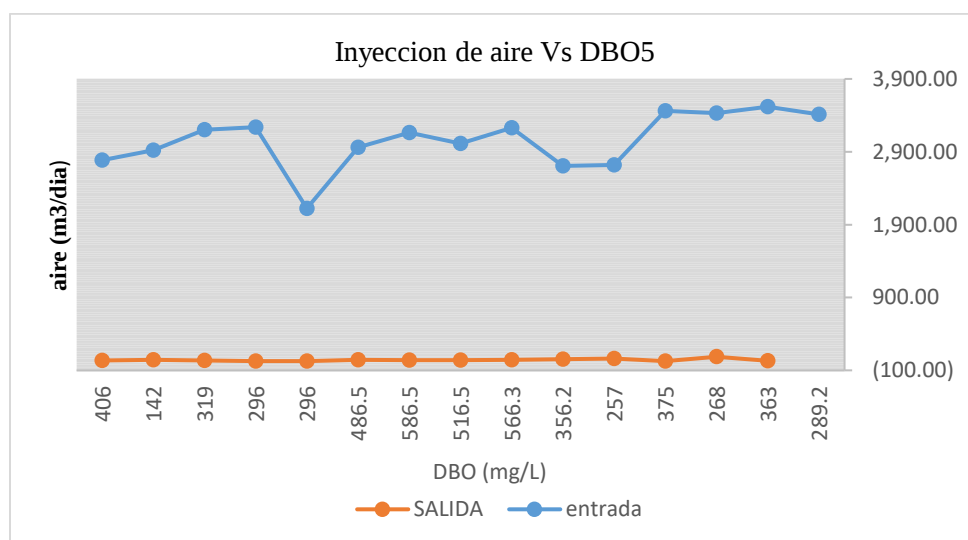
Según la gráfica: el valor máximo de consumo de aire por día es de 5000 m³/día.

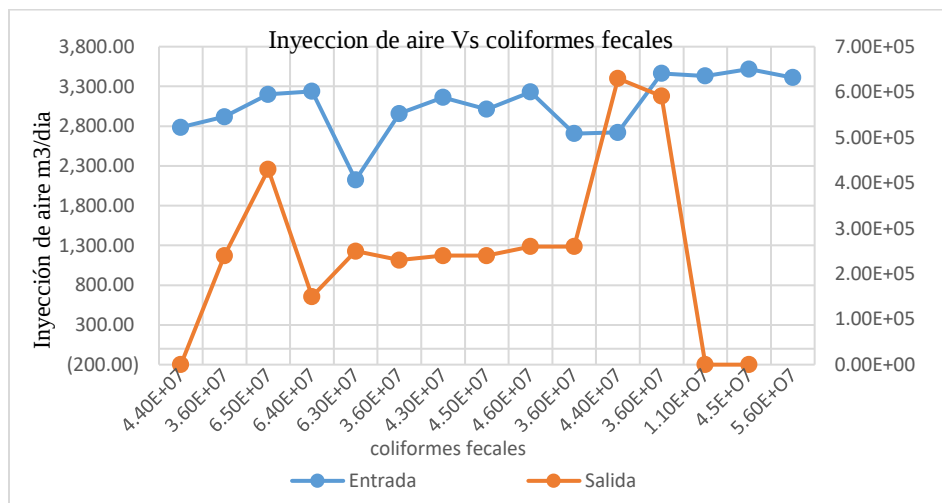
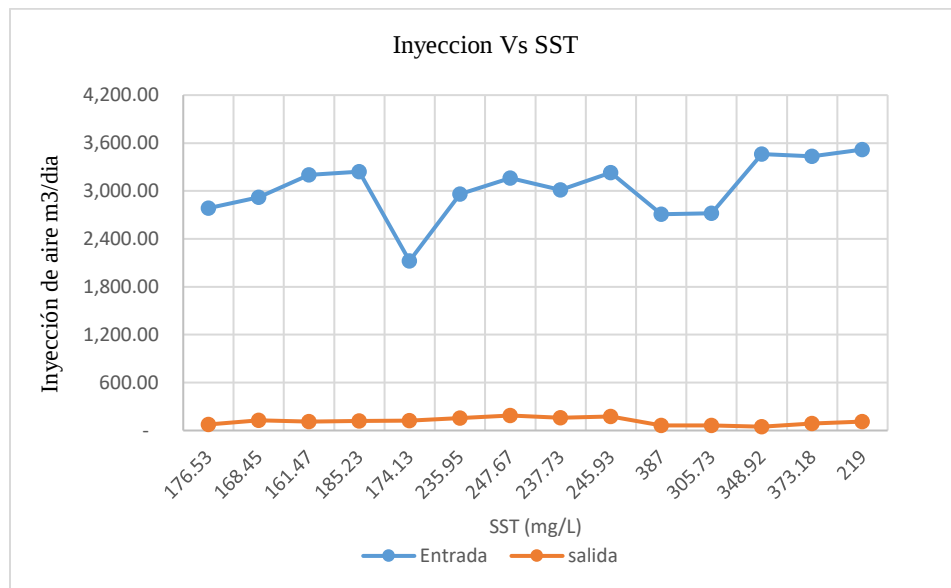
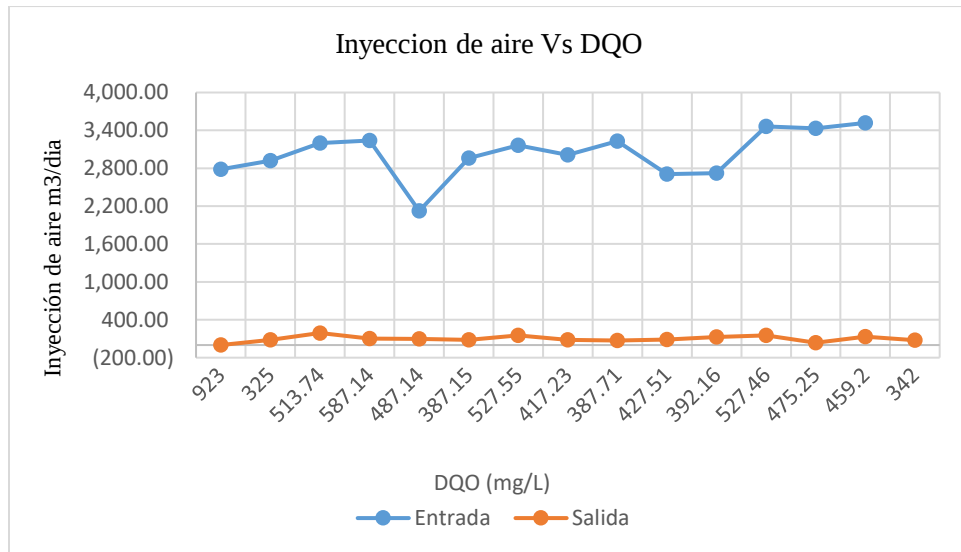
Según la gráfica: el valor mínimo de consumo de aire por día es de 1300 m³/día.

Se ha mantenido parejo o contante en 3 años de funcionamiento (2019 a 2021).

En los años 2022 y 2023 se nota un ligero incremento en el consumo de aire. (Habría que verificar si aumento el caudal, DBO₅ o DQO).

Figura 45. Análisis de la variación de la inyección de aire respecto a la DBO₅, DQO, SST y coliformes fecales

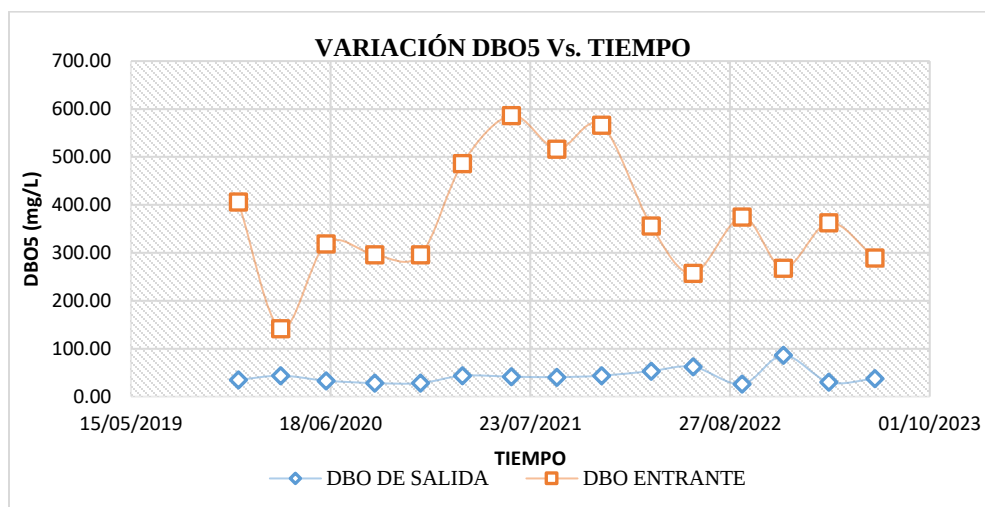




Para los cuatro parámetros que registra la PTAR del barrio Catedral hay un incremento casi imperceptible de la aireación respecto al incremento de estos parámetros. De las gráficas se puede ver que la aireación es casi constante respecto al valor de entrada, pero aun así se logra valores de salida muy variables y con altas eficiencias de remoción.

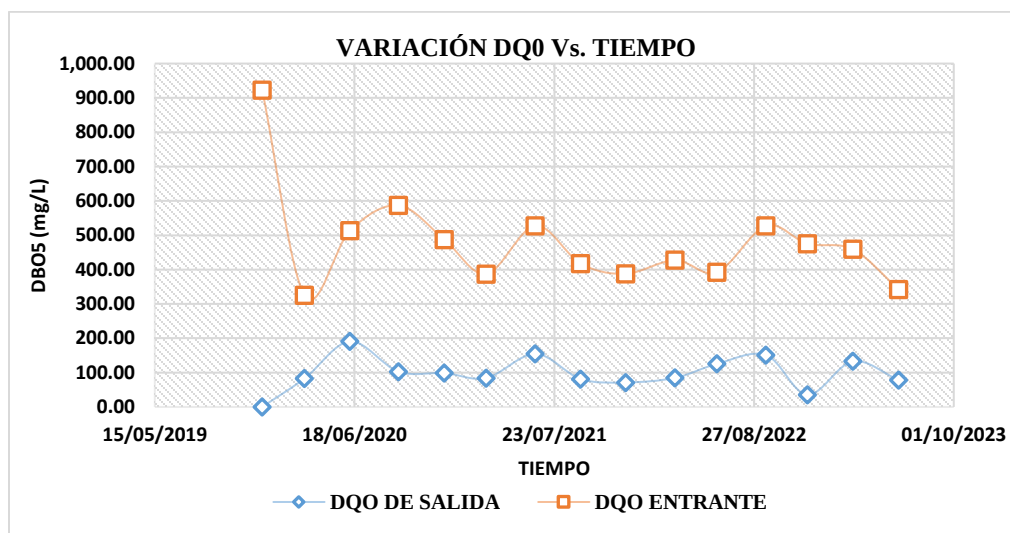
Análisis de la variación de los parámetros en el tiempo.

Figura 46. Variación de la DBO



Los valores de entrada tienen una variación notable respecto al tiempo, pero, los valores de salida presentan poca variación, lo que demuestra una gran capacidad de reducir la DBO a un valor promedio de 40 mg/L.

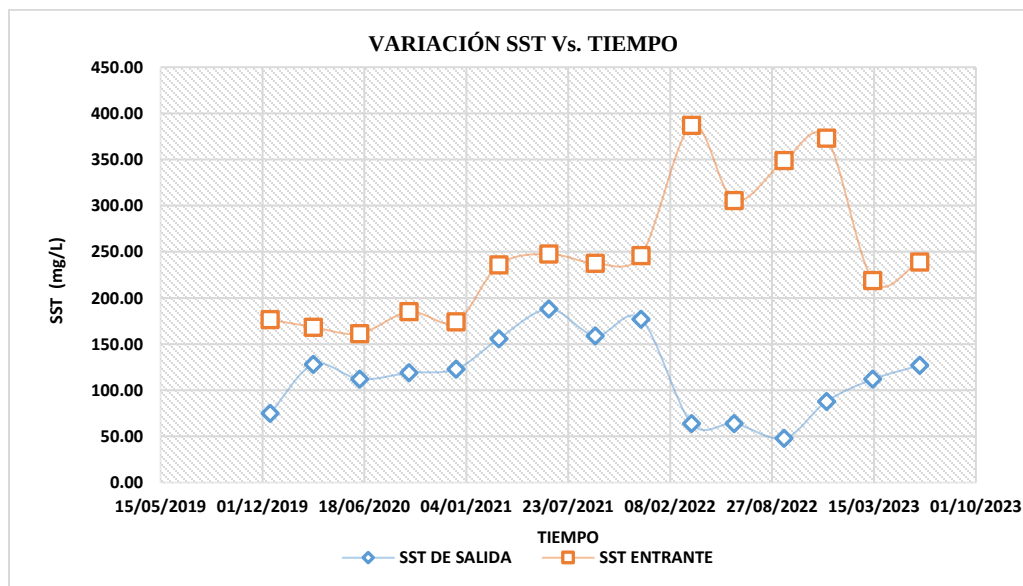
Figura 47. Variación de la DBO



Fuente: Elaboración propia

Los valores de entrada presentan variaciones no tan extremas respecto al tiempo, fluctúan entre 342 mg/L hasta 923 mg/L. Mientras que los valores de salida presentan menos variación, tiene un valor promedio de 90 mg/L.

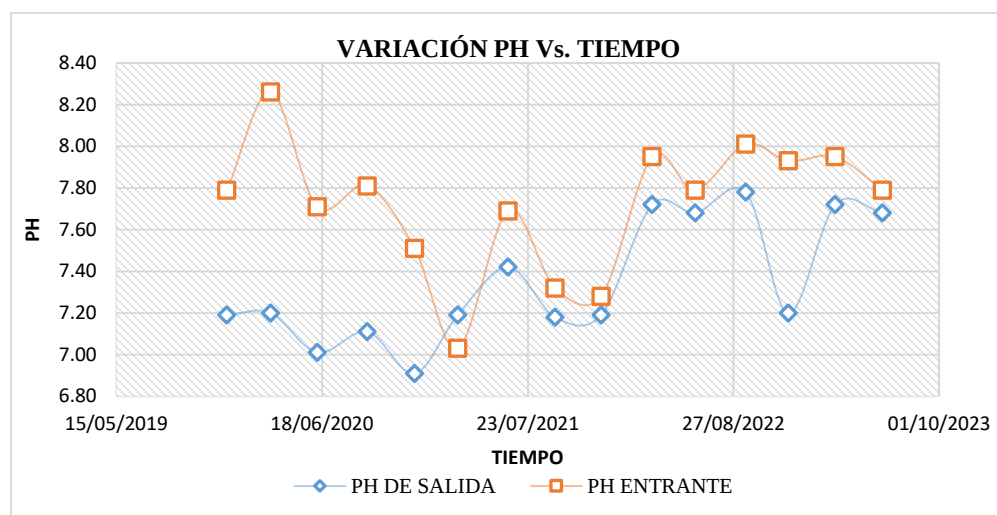
Figura 48. Variación de la SST



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la gráfica una variación muy notoria en los valores de entrada, sobre todo en los últimos años. Los valores salientes también presentan variación considerable. Para valores altos de SST se logró obtener con este tratamiento valores muy bajos a la salida. Esta tendencia sobre todo se ve en los años 2021 y 2022 volviendo a la tendencia inicial el año 2023. En los valores de salida podría explicarse por la recirculación de SSV del sedimentador secundario hacia el reactor biológico, lo cual altera la concentración de sólidos en el intermedio del proceso.

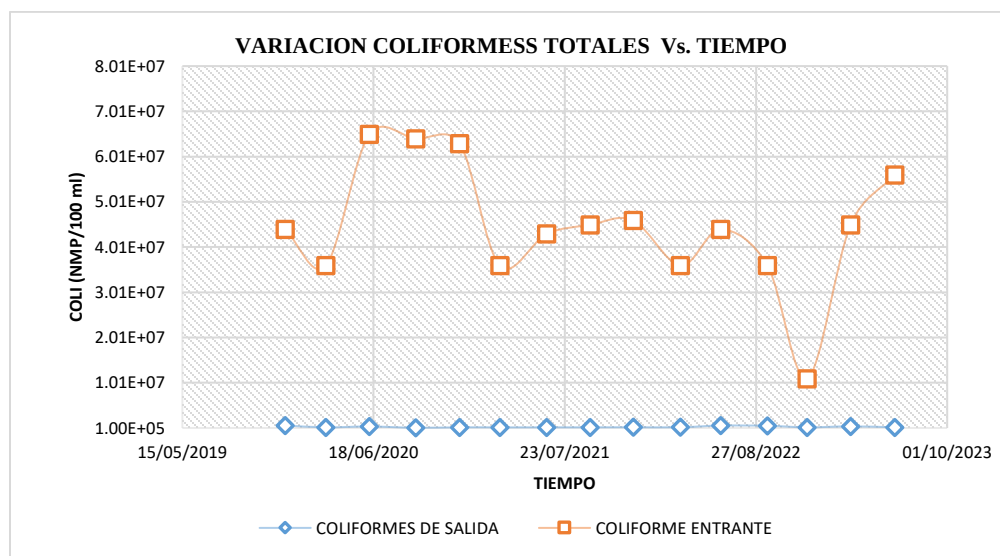
Figura 49. Variación del pH



Fuente: Elaboración propia.

En general todas las muestras indican un agua alcalina, la variación está dentro de los rangos normales. Los valores de entrada y salida presentan notable variación respecto al tiempo, en general el proceso de tratamiento baja el pH.

Figura 50. Variación de los coliformes fecales



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de entrada tienen una variación relativa, todas están a la potencia E+7. Mientras que los valores de salida presentan valores con casi nada de variación con un valor de 1 E+5 NMP/100 ml.

5.9. Análisis sobre el cumplimiento del Anexo A-1, del RMCH de la ley 1333 para clase D

El agua residual tratada que sale de la PTAR descarga a la quebrada Sagredo, el cual no tiene clasificación, está quebrada confluye al río Guadalquivir que tiene clasificación D.

El agua residual de la PTAR Catedral es muy poco (80.62 L/s), es reusado en su trayecto, se infiltra, se mezcla con otras aguas contaminadas. Por lo tanto, no se puede evaluar a cabalidad su cumplimiento con el Anexo 1, del RMCH de la ley 1333.

Si se analiza solo el caudal que sale de la PTAR Catedral sin mezclarse con el agua del río Guadalquivir, y siendo que la quebrada Sagredo no tiene caudal natural propio de agua limpia se podría decir que no cumple con los límites permisibles para cauce con clase D.

5.10. Análisis sobre el cumplimiento del Anexo A-2 del RMCH de la ley 1333

Análisis de DBO en salida de la PTAR

Cumple, ya que todos los valores de DBO están por debajo del límite permisible de 80 mg/L. Excepto una muestra que sobrepasa por poco.

Análisis de la DQO en la salida de la PTAR

Cumple, ya que todos los valores de DQO están por debajo del límite permisible de 250 mg/L. Análisis de SST en la salida de la PTAR No cumple, ya que casi todos los valores de SST están por encima del límite permisible de 60 mg/L. Se debería ajustar el sedimentador secundario. Análisis del pH en la salida de la PTAR Cumple, ya que todos los valores están dentro de los límites permisibles de 6 y 9. Análisis de los Coliformes Totales en la salida de la PTAR no Cumple, ya que todos los valores de Coliformes fecales están por encima del límite permisible de 1000 mg/L. Los valores de salida tienen un valor medio de $2.5E+5$, este se puede bajar con un ajuste en la desinfección.

5.11. Análisis sobre el reúso del agua residual tratada de la PTAR Catedral

La calidad de agua que entrega la tecnología de tratamiento de aguas residuales MBBR seguido de un SBR, es muy buena alcanzando altas eficiencias, como se vio en los anteriores análisis. Se verificó que los estándares de calidad exigidos por la normativa nacional e internacional son muy altos, lo cual se entiende, ya que tratan de eliminar todos los riesgos a la salud por el uso de aguas residuales tratadas.

Los resultados de calidad del agua efluente, fueron constatados con las normativas de Bolivia, Directrices de la OMS, Normativa de la UE, Normativa de México, Israel y Chile.

Debido a estas exigencias se observó que, al efluente de la PTAR del Barrio Catedral, le falta un poquito más afinamiento para ser considerada para su uso directo.

Se requiere que la DBO₅, este por debajo de 30 mg/L. Teniéndose actualmente valores entre 26 y 86 mg/L

Se requiere que la DQO, este por debajo de 60 mg/L. Teniéndose actualmente valores entre 61 y 190 mg/L

Se requiere que los SST, este por debajo de 30 mg/L. Teniéndose actualmente valores entre 48 y 188 mg/L.

Se requiere que los E. coli, este por debajo de 5000 NMP/100 ml. Teniéndose actualmente valores entre 15000 y 65000 mg/L. Esto con una mejor desinfección puede bajarse a valores que cumplan con las exigencias.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Sobre la información disponible

La información que genera la PTAR, de caudal y de calidad es la mínima necesaria para realizar una buena operación, es la base para saber si está funcionando bien, si se debe realizar ajustes y otro tipo de toma de decisiones. Se observa que no se mide el fósforo ni el nitrógeno, que son dos parámetros muy importantes.

La información disponible se puede emplear para ajustar la propia planta, pero su alcance mayor será cuando sus datos sirvan para diseñar nuevas plantas de tratamiento con la misma tecnología para caudales mayores.

Sobre de la situación actual de la planta

Esta planta piloto está en buen estado de funcionamiento, su funcionamiento es muy bueno, no hay malos olores y la calidad del efluente final es más que aceptable, además genera información valiosa para el diseño de plantas de tratamiento similares.

Sobre la variación de los caudales

La variación del caudal no es de consideración, la capacidad máxima de la PTAR ha sido alcanzada en algunas ocasiones, por lo general opera con un caudal medio de 0.57 L/s, llegando una máxima de 1.6 L/s

Sobre las características de las aguas residuales urbanas

El alcantarillado sanitario que alimenta a la PTAR es de uso doméstico, no se evidencia entrada de aguas de tipo industrial. Los datos de agua residual entrante indican que se presenta una contaminación que varía de Media a Fuerte.

Sobre la relación DBO₅/DQO

La relación DBO₅/DQO da como resultado valores mayores a 0.4, lo que indica que estas aguas residuales son muy biodegradables, por lo tanto, el empleo de la tecnología de tratamiento con reactores biológicos es pertinente.

Sobre las eficiencias de remoción

La planta de tratamiento del barrio Catedral con la tecnología de tratamiento mediante reactor MBBR seguido de un reactor SBR, presenta eficiencias altas en remoción de DBO, DQO y Coliformes Fecales, muy parecidas a los obtenidos en otras investigaciones y un poco mejores a lo que se obtiene en los lodos activados convencionales. En cuanto a remoción de SST presenta bajas y altas eficiencias en un rango más amplio, aun así, es competitiva respecto a las otras tecnologías en cuanto a remoción de SST. Por lo tanto, es una tecnología que vale la pena implementar en nuestro medio con toda confianza ya que se verifica que tiene buenas eficiencias de tratamiento.

Tabla 50. Eficiencia de la PTAR del Barrio Catedral

Unidades de tratamiento	Eficiencia en la remoción en porcentaje			
	DBO	DQO	SS	Patógenos
PTAR B. Catedral	68 - 93	63 - 93	24 - 86	97.8 – 99.8

Fuente: Elaboración Propia

Estos valores pueden ser usados para replicar esta tecnología.

En cuanto a la remoción de fósforo y nitrógeno, teóricamente se investigó que alcanza buena eficiencia de remoción, pero si se piensa en reusar esta agua, el fósforo y el nitrógeno tienen propiedades fertilizantes en los vegetales.

Sobre la variación del suministro de aire

Desde la puesta en marcha de la PTAR Catedral, se presenta un leve incremento en el suministro de oxígeno en 500 m³/día por causas no identificadas en este estudio. El pico más alto fue alcanzado en octubre de 2024.

Para el caudal y los cuatro parámetros (DBO, DQO, SST y Coliformes fecales) que registra la PTAR del barrio Catedral hay un incremento casi imperceptible de la aireación respecto al incremento de estos parámetros, la aireación es casi constante respecto al valor de entrada, pero aun así se logra valores de salida muy variables y con altas eficiencias de remoción.

Sobre la variación de los parámetros: DBO, DQO, SST y Coliformes fecales respecto al tiempo

La variación respecto al tiempo en la mayoría de los parámetros analizados presenta variación notable en los valores de entrada. En los valores de salida la variación respecto al tiempo es menor, lo que indica que este tipo de planta de tratamiento tiene una capacidad de tratamiento capaz de amortiguar variaciones de la calidad del agua residual de entrada y entregar una calidad del agua tratada más uniforme.

Sobre el cumplimiento del Anexo A-1, del RMCH, ley 1333 para clase D

El agua residual tratada que sale de la PTAR descarga a la quebrada Sagredo, el cual no tiene clasificación, está quebrada confluye al Rio Guadalquivir que tiene clasificación D.

El agua residual de la PTAR Catedral es muy poco (80.62 L/s), es reusado en su trayecto, se infiltra, se mezcla con otras aguas contaminadas. Por lo tanto, no se puede evaluar a cabalidad su cumplimiento con el Anexo 1, del RMCH de la ley 1333.

Si se analiza solo el caudal que sale de la PTAR Catedral sin mezclarse con el agua del rio Guadalquivir, y siendo que la quebrada Sagredo no tiene caudal natural propio de agua limpia se podría decir que no cumple con los límites permisibles para cauce con clase D

Sobre el cumplimiento del Anexo – 2 del RMCH de la ley 1333

Cumple en los parámetros de DBO, DQO y pH, pero, no cumple en los SST y coliformes fecales.

Sobre la posibilidad de reúso del agua residual tratada

El agua residual tratada de la PTAR del barrio Catedral, según la normativa nacional y directrices de otros organismos, requiere un poco más de afinación, en el proceso de tratamiento para poder ser usado directamente en la agricultura. Con los valores actuales puede usarse en riego de bosques y humedales protegidos, que no estén en contacto con los seres humanos.

Pero, podría pensarse en un reusó indirecto, o sea, que este efluente tratado se mescle con agua de un rio caudaloso, en el cual, la concentración de los contaminantes tranquilamente podría entrar en la clase C y D del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la ley de Medio Ambiente 1333, pudiendo ser usado indirectamente en el riego de vegetales de tallo alto, sin riesgos a la salud.

Sobre las eficiencias de remoción del fosforo total

Concentración del Afluente: Las concentraciones de P Total a la entrada (Promedio=14.33 mgP/l) son típicas de aguas residuales domésticas o mixtas (domésticas/industriales).

Eficiencia de Remoción: La eficiencia promedio de remoción fue deficiente (46.48%), con una operación inaceptable en la Muestra N°1. Este nivel de tratamiento es insuficiente para la remoción de nutrientes.

Cumplimiento Normativo: A pesar de no contar con un LMP directo para P Total en las fuentes primarias del RMCH, la concentración de salida promedio de 7.18 mgP/l es ambientalmente inaceptable y probablemente incumpliría los estándares estrictos de la normativa boliviana para la protección del cuerpo receptor contra la eutrofización.

Sobre las eficiencias de remoción del nitrógeno total

Eficiencia Promedio Baja: El valor de 8.49% indica que el sistema de tratamiento está eliminando una fracción muy pequeña del Nitrógeno Total que ingresa.

Concentraciones de Salida Altas: Las concentraciones de N Total a la salida (N Total Salida promedio de 90.53 mg/l) siguen siendo cercanas a las concentraciones de entrada (98.93 mg/l en promedio).

Variabilidad: Las eficiencias varían entre 3.13% y 11.87% en las muestras, lo que sugiere que la remoción no solo es ineficiente sino también inconsistente.

De acuerdo a la normativa Se tomará el valor de 50 mg/L como un límite referencial o valor de descarga exigente, pues muchas normativas modernas lo consideran para la descarga a cuerpos de agua sensibles, aunque no esté explícitamente en el Anexo A-2.

6.2. Recomendaciones

- Si bien el objetivo de las aguas residuales no es el reúso directo, se recomienda medir también los parámetros de nitrógeno y fosforo, ya que como se vio el agua está siendo reutilizada en riego lo cual es positivo para el uso óptimo del agua.
- Se recomienda promover el reúso de las aguas residuales, como una medida de optimizar el uso óptimo del agua, por lo tanto, se debe elaborar, normativa nacional más específica sobre la calidad del agua para reusó y los cuidados en su manejo.
- Se recomienda brindar todo el apoyo económico y logístico a la PTAR del barrio Catedral para mantenerlo en buen funcionamiento y que siga siendo objeto de investigación.
- Se recomienda evitar el ingreso de aguas residuales de origen industrial, ya que esto probablemente provocaría que la relación DBO_5/DQO sea inferior a 0.2 y el tratamiento con esta tecnología reducirá en eficiencia.
- Se recomienda proseguir con la medición de parámetros, evaluar las eficiencias y si fuera posible realizar ajuste para mejorar los niveles de tratamiento.
- Se recomienda estudiar a profundidad la variación del suministro de oxígeno que tiene una leve tendencia en aumento para identificar las causas verdaderas y ver si es algo normal o algo que se puede ajustar.
- Se recomienda realizar análisis adicionales para confirmar las concentraciones de nitrógeno y fósforo.