

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y EFICIENCIAS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE WARNES

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Las lagunas de oxidación han sido y aun hoy en día son ampliamente utilizadas para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en ciudades pequeñas con disponibilidad de grandes terrenos debido a sus características favorables como rendimiento satisfactorio, construcción económica, operación sencilla y sostenibilidad (Von Sperling y Chernicharo 2005).

En la actualidad, a pesar de sus ventajas, en algunos lugares se considera una opción de tratamiento menos aceptada, dado que los parámetros con los que se diseñaban años atrás respondían a ciertos estándares de calidad de agua que con el tiempo se han vuelto más exigentes (Ratsey, 2015).

Otros aspectos que ponen en desventaja el uso de lagunaje en plantas de gran escala están relacionados con la escasez sistemática de datos de rendimiento o desempeño que conllevan desafíos asociados con el diseño, dado que algunos parámetros de importancia son omitidos resultando, por una parte, en plantas de tratamiento sobredimensionadas y costosas o, por otra parte, en plantas sub-dimensionadas que no llegan a cumplir con sus objetivos de rendimiento (Espinosa, Von SPerling, Verbyla, 2017).

La planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Warnes fue construida durante los años 1995 a 1998, está en operación desde el año 2004, tiene 20 años de funcionamiento.

Warnes actualmente tiene 39,570 habitantes, de los cuales cuentan con el servicio de la red de alcantarillado 13,764 habitantes, quedando sin tratamiento de aguas residuales 25,806 habitantes, de los cuales 7,002 se encuentran en un área densamente poblada.

La operación y mantenimiento está a cargo de la COSEPW (Cooperativa de Servicios Públicos Warnes), la misma corrobora que las eficiencias de remoción tanto en contenido DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno), contenido DQO (demanda química de oxígeno), sólidos en suspensión total y coliformes fecales, presentes en los certificados de calidad de

agua realizados, demuestran que para los caudales y cargas actuales las lagunas de oxidación presentan un buen funcionamiento.

La PTAR es con tecnología de lagunas de oxidación. No cuenta con una laguna propiamente anaerobia, el agua residual ingresa directamente a las lagunas facultativas, la cual tiene las siguientes características:

1. Una zona superficial en la que habitan bacterias aerobias y algas en una relación simbiótica.
2. Una zona inferior anaerobia en la que se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaerobias.
3. Una zona intermedia, que es parcialmente aerobia y anaerobia, en la que la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas. Los sólidos de gran tamaño se sedimentan para formar una capa de fango anaerobio. Los materiales orgánicos sólidos y coloidales se oxidan por la acción de las bacterias aerobias y facultativas empleando el oxígeno generado por las algas presentes cerca de la superficie. El dióxido de carbono, que se produce en el proceso de oxidación orgánica, sirve como fuente de carbono por las algas. La descomposición anaerobia de los sólidos de la capa de fango implica la producción de compuestos orgánicos disueltos y de gases tales como el dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y el metano, que o bien se oxidan por las bacterias aerobias, o se liberan a la atmósfera

Como etapa final de tratamiento tiene cuatro lagunas de maduración, cuyo objetivo es eliminar los organismos patógenos. Las aguas tratadas son volcadas a un cauce natural cercano denominado arroyo Colorado.

Los caudales que actualmente están llegando a la planta, según aforos, fluctúan alrededor de 30 l/s. Aunque en época de lluvia este caudal de llegada es mayor.

Existe un deterioro de las estructuras de hormigón, producto de los años de funcionamiento y debido a lo agresivo que son las aguas residuales. No se evidencio malestar por malos olores, siendo perceptibles levemente solo dentro de la planta.

1.2. JUSTIFICACIÓN

1.2.1. Teórica

Los diseños de plantas de tratamiento a falta de datos medidos se realizan con parámetros medios obtenidos teóricamente de textos guía o normas extranjeras, lo cual en la mayoría de los casos no garantiza buenos resultados en el funcionamiento de plantas de tratamientos residuales mediante lagunas de oxidación. Lo ideal es obtener estos parámetros a partir de datos medidos de caudal y caracterización de calidad del agua tanto en la entrada como salida de una planta de tratamiento que esté operando vigentemente.

Las lagunas de oxidación representan un sistema natural de tratamiento de aguas residuales, con costos mínimos de operación y reconocidos a nivel mundial, pueden resolver el problema de tratamiento de aguas residuales con altas eficiencias siempre que estén bien diseñadas, operadas y mantenidas.

1.2.2. Práctica

El presente trabajo de investigación experimental, es un aporte que espera contribuir a la necesidad de contar con parámetros de operación y eficiencias reales, obtenidas a partir de datos medidos de caudal y calidad del agua. Estos valores podrán ser usados en el diseño y evaluación de plantas de tratamientos con tecnología de lagunas de oxidación en nuestro medio.

Los parámetros de diseño más necesarios son el tiempo de retención hidráulico, carga superficial, tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias y coliformes fecales, las eficiencias de remoción más necesarias de conocer son la eficiencia de remoción de DBO₅, DQO, SST, todos estos se pueden obtener a partir de datos medidos de caudal y caracterización del agua.

1.2.3. Relevancia social

Los valores obtenidos beneficiarán mucho a todas las personas que de alguna manera están relacionadas con la operación, planificación y/o diseño de lagunas de oxidación para el tratamiento de aguas residuales, en zonas con clima similar al del área de estudio.

1.3. DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Descripción del problema

Las lagunas de oxidación son un método fácil y eficiente para el tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales, pero cuando el diseño no es adecuado puede provocar el funcionamiento inadecuado de las mismas cuando estén en operación, esto conlleva a la degradación del medio ambiente ya que la planta de tratamiento al no funcionar de manera óptima y eficiente compromete la calidad del agua tratada a la salida de la misma, que no cumplirá con las Normas vigentes en materia de contaminación hídrica, generando así un descontento social por la posible generación de malos olores, provocando contaminación de suelos y fuentes de agua, además que se pone en riesgo el rehusó de las aguas tratadas en abastecimiento industrial y/o doméstico, para su aplicación en actividades como la agricultura, debido al contenido elevado de sólidos suspendidos que pueden ocasionar problemas en el suelo a la hora de regar el cultivo.

Por otro lado la aplicación de tecnología mediante lagunas de oxidación en plantas de tratamiento de gran escala, tiene una relación con la carencia sistemática de datos de rendimientos o eficiencias de remoción como así también de desempeño, que conducen a desafíos asociados con el diseño, ya que algunos parámetros de diseño de vital importancia son omitidos, resultando, por una parte, en plantas de tratamiento sobredimensionadas y de alto costo o, por otra parte, en plantas sub-dimensionadas que no llegan a cumplir con sus objetivos de rendimiento y remoción.

1.3.2. Planteamiento del Problema

- ¿Las lagunas de la PTAR de Warnes, tienen parámetros acordes a los límites recomendados por las normas y guías de diseño de una PTAR con tecnología de lagunas de oxidación?
- ¿La calidad del agua tratada presenta valores de los parámetros que se encuentren dentro de lo permisible por la normativa vigente?
- ¿Las eficiencias de remoción estarán acordes a este tipo de tecnología de tratamiento?
- ¿Los datos medidos serán suficientes para determinar los parámetros de operación?

Los diseños de plantas de tratamiento con procesos biológicos de lagunas de oxidación, en el país a falta de datos medidos, se diseñan con parámetros medios obtenidos teóricamente

de textos guía o normas extranjeras, que no necesariamente son acordes a las condiciones locales de Bolivia. Este proceder, en los diseños, pone en riesgo el buen funcionamiento de este tipo de plantas de tratamiento de aguas residuales. Lo ideal es obtener estos parámetros a partir de datos experimentales, es decir, mediciones de caudal y caracterización del agua, tanto en la entrada como en la salida de la planta de tratamiento.

Los parámetros de operación y eficiencias de remoción para cada tipo de tratamiento, son los que determinan los procesos de tratamiento, si estos valores en etapa de diseño no son correctos, se corre el riesgo de un mal funcionamiento de la planta de tratamiento cuando la misma se encuentre ya operando.

Los parámetros y eficiencias más necesarios para un buen diseño y operación de lagunas de oxidación son:

- El tiempo de retención hidráulica, carga orgánica superficial, coeficiente de decaimiento bacteriano, eficiencias de DBO_5 , DQO, SST, coliformes fecales y otros parámetros en las lagunas facultativas.
- El tiempo de retención hidráulico, tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias, coeficiente de eliminación de la DBO_5 y la eficiencia de remoción de coliformes y otros parámetros en las lagunas de maduración I y II.

1.4. HIPÓTESIS

Es posible determinar los parámetros de operación y eficiencias de remoción de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de WARNES, para evaluar su funcionamiento y así poder recomendar valores confiables que podrán ser usados en futuros diseños de este tipo de tecnología de tratamiento dentro del contexto de Bolivia.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general.

Analizar y evaluar la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de WARNES mediante la determinación de los parámetros de operación, eficiencias de remoción y cumplimiento de normativas.

1.5.2. Objetivos específicos

- ❖ Analizar la situación actual de funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de WARNES por medio de una sistematización de la caracterización del agua y caudales aforados.
- ❖ Calcular los parámetros de operación y eficiencias de remoción de las lagunas facultativas y lagunas de maduración que componen el sistema de tratamiento.
- ❖ Analizar y comentar los resultados experimentales obtenidos y compararlos con otros resultados calculados con fórmulas simplificadas.

1.6. ALCANCE

El presente trabajo considera la obtención y análisis de datos de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Warnes, ubicada en el departamento de Santa Cruz de la Sierra, provincia Ignacio Warnes.

El periodo abarcado de observación y desarrollo del presente trabajo, de acuerdo a los certificados de calidad de agua y aforo de caudales es desde el 19 de noviembre de 2018 hasta 19 de agosto de 2022.

Se realizó un diagnóstico de la PTAR con tecnología de lagunas de oxidación de la ciudad de WARNES, con la finalidad de conocer las características actuales de funcionamiento con la que opera la misma, dicho diagnóstico ha abarcado la caracterización de la geometría de la planta de tratamiento, caudales y datos de calidad de agua, tanto a la entrada como a la salida de la planta de tratamiento. Esta actividad se ejecutó mediante la sistematización de datos proporcionados por la EPSA de WARNES.

Se analizó los valores de salida de la DBO₅, DQO, SST, coliformes fecales, fósforo y nitrógeno, aceites y grasas, amonio, hierro, coliformes fecales y totales para verificar si la PTAR de Warnes cumplía con los estándares de calidad exigidos por la legislación boliviana.

Se analizó y sistematizó todos los datos obtenidos del diagnóstico, para el cálculo de parámetros y eficiencias.

Se obtuvieron los parámetros de operación de tiempo de retención hidráulica, carga superficial, coeficiente de eliminación de la DBO, como también las eficiencias de remoción

en coliformes fecales, DBO₅, DQO, SST y otros parámetros, tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias, para cada tipo de tratamiento que comprende el sistema general en las lagunas de oxidación de la PTAR de la ciudad de WARNES.

Se realizó la comparación de los resultados obtenidos con parámetros teóricos de diseño y eficiencias de remoción de la “Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales de Bolivia”, para constatar si los mismos están dentro del rango adecuado o presenten variaciones.

Se redactaron las conclusiones y se emite recomendaciones en función a los análisis realizados.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Lagunas de estabilización u oxidación

Las lagunas oxidación, son depósitos construidos mediante la excavación y compactación de la tierra que almacenan agua de cualquier calidad por un periodo determinado. El manejo sencillo del agua residual y la eficiencia energética, son su principal característica. (Conrado Franqui, 2016).

Una laguna de oxidación, funciona básicamente por la actividad bacteriana y las relaciones simbióticas con algas y otros organismos. Cuando el agua llega, se genera en forma espontánea un proceso de auto purificación o estabilización natural, en el que tienen lugar fenómenos de tipo físico, químico y biológico. (Conrado Franqui, 2016)

Las lagunas tienen como objetivos:

- Remover de las aguas residuales la materia orgánica que ocasiona la contaminación.
- Eliminar microorganismos patógenos que representan un grave peligro para la salud.
- Utilizar su efluente para reutilización, con otras finalidades, como agricultura.

La eliminación de la materia orgánica (expresada como DBO₅) es realizada mediante procesos biológicos aerobios y anaerobios. Dependiendo del proceso predominante, las lagunas son aerobias (de maduración o de pulimento), anaerobias o facultativas.

La eficiencia de la depuración del agua residual en lagunas de estabilización depende ampliamente de las condiciones climáticas de la zona, temperatura, radiación solar, frecuencia y fuerza de los vientos locales, y factores que afectan directamente a la biología del sistema (Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades, p. 46).

2.1.1. Tipos de lagunas de estabilización.

2.1.1.1. Lagunas anaerobias:

Las lagunas anaerobias se construyen para el tratamiento de residuos líquidos con alto contenido de materia orgánica, generalmente aguas residuales de industrias ubicadas en zonas rurales apartadas. Estas lagunas no cuentan con zonas aerobias, su profundidad oscila entre 3 a 5 m. (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Los objetivos básicos que buscan lograr estas lagunas son los siguientes:

- I. La reducción de la materia en suspensión (sedimentable y flotante) presente en las aguas residuales afluentes.
- II. La estabilización, vía anaerobia, de los lodos que se van acumulando en su fondo.

Las elevadas cargas de DBO_5 por unidad de volumen con las que operan este tipo de lagunas, conllevan a que en ellas imperen condiciones de ausencia de oxígeno (anaerobiosis), salvo en una fina capa de agua superficial, por lo que los microorganismos que proliferan en las mismas son, casi exclusivamente, bacterias anaerobias (Rojo, 1988; Romero 1999).

Como resultado de las reacciones anaerobias se genera biogás, mezcla de metano y dióxido de carbono, principales responsables de los olores desagradables que se desprenden. (Guía Técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales, 2021).

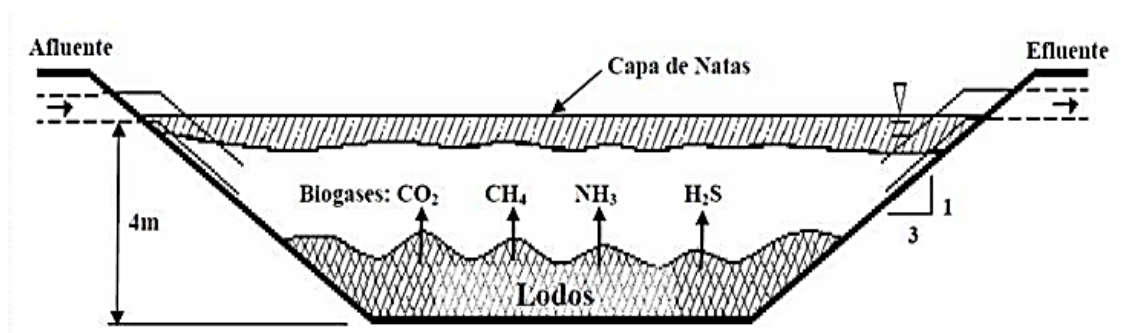


Figura 2.1. Esquema de una Laguna Anaerobia

Fuente: Stewart M. Oakley (2005)

2.1.1.2. Lagos facultativas

Son aquellas que poseen una zona aerobia y una anaerobia, siendo respectivamente en superficie y fondo. El principal objetivo que se persigue en este tipo de lagunas es la biodegradación, fundamentalmente vía aerobia, de la materia orgánica presente en las aguas residuales a tratar, una reducción en el contenido en nutrientes y bacterias coliformes, gracias al oxígeno aportado por la actividad fotosintética de las microalgas que en ellas se desarrollan y, en menor medida, por fenómenos de reaeración superficial, promovidos por el viento.

La DBO₅ soluble y la finamente particulada se estabilizan vía aerobia por la acción de bacterias heterotróficas dispersas en el medio, mientras que la DBO₅ particulada tiende a sedimentar, transformándose vía anaerobia por las bacterias que proliferan en el fondo.

En la zona aerobia se establece un equilibrio entre la producción y el consumo de oxígeno y de dióxido de carbono, a través de un ciclo simbiótico microalgas/bacterias, de modo que la respiración bacteriana consume oxígeno y libera dióxido de carbono, mientras que las microalgas, mediante procesos fotosintéticos, generan oxígeno y consumen dióxido de carbono. Este ciclo simbiótico es el verdadero “motor” de este tipo de lagunas (Guía Técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales, 2021, p. 367) (figura 2.2).

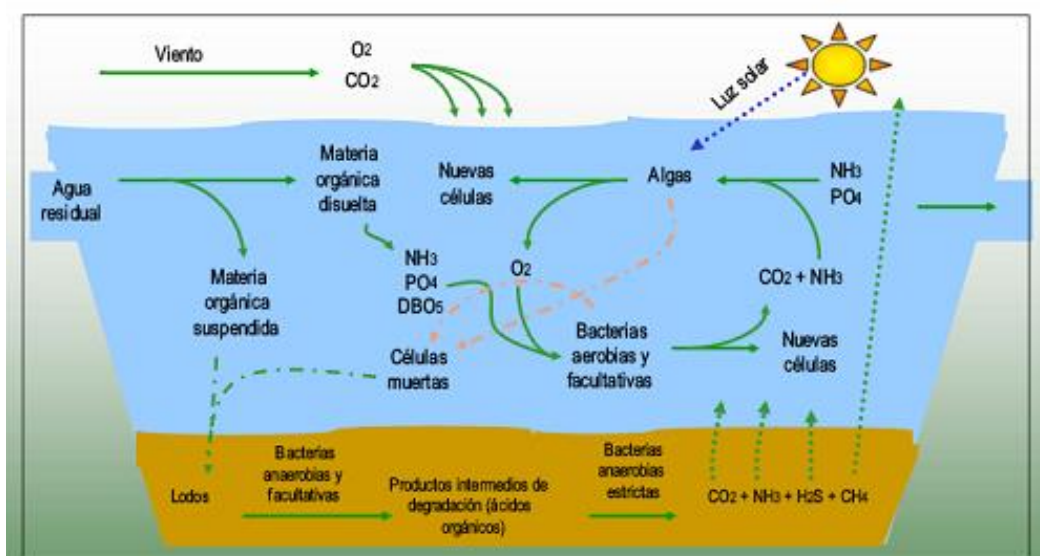


Figura 2.2. Ciclo simbiótico microalgas-bacterias en Lagunas Facultativas.

Fuente: Tratamiento del agua. s/f.

En una laguna facultativa existen tres zonas (Figura 2.3):

4. Una zona superficial en la que existen bacterias aerobias y algas en una relación simbiótica, como se ha descrito anteriormente.
5. Una zona inferior anaerobia en la que se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaerobias.
6. Una zona intermedia, que es parcialmente aerobia y anaerobia, en la que la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas. Los sólidos de gran tamaño se sedimentan para formar una capa de fango anaerobio. Los materiales orgánicos sólidos y coloidales se oxidan por la acción de las bacterias aerobias y facultativas empleando el oxígeno generado por las algas presentes cerca de la superficie. El dióxido de carbono, que se produce en el proceso de oxidación orgánica, sirve como fuente de carbono por las algas. La descomposición anaerobia de los sólidos de la capa de fango implica la producción de compuestos orgánicos disueltos y de gases tales como el dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y el metano, que o bien se oxidan por las bacterias aerobias, o se liberan a la atmósfera (Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades, p. 51).

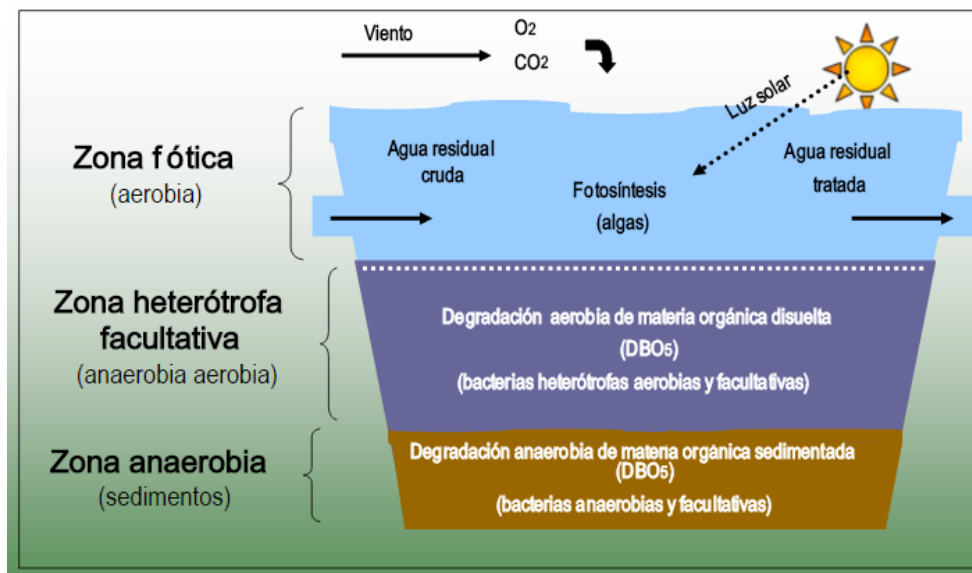


Figura 2.3. Esquema de una Laguna Facultativa.

Fuente: Tratamiento del agua. s/f.

2.1.1.3. Lagunas de maduración

Forman la última etapa en el sistema de tratamiento, por lo que están sometidas a bajas cargas orgánicas, dándose en ellas condiciones propicias para la penetración en profundidad de la radiación solar.

Este tipo de laguna tiene como objetivo fundamental la eliminación de bacterias patógenas. Además de su efecto desinfectante, las lagunas de maduración cumplen otros objetivos, como son la nitrificación del nitrógeno amoniacal, cierta eliminación de nutrientes, clarificación del efluente y consecución de un efluente bien oxigenado (Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades, p. 52).

Las lagunas de maduración suelen constituir la última etapa del tratamiento, por medio de una laguna facultativa primaria o secundaria o de una planta de tratamiento convencional, debido a la eliminación de agentes patógenos, si se reutiliza el agua depurada

Para mejorar la eliminación de organismos patógenos, la etapa de maduración suele estar constituida por varias lagunas dispuestas en serie. En este tipo de lagunas se establece un equilibrio entre los organismos productores de biomasa (microalgas), los consumidores (zooplancton) y los descomponedores (bacterias) (Figura 2.4).

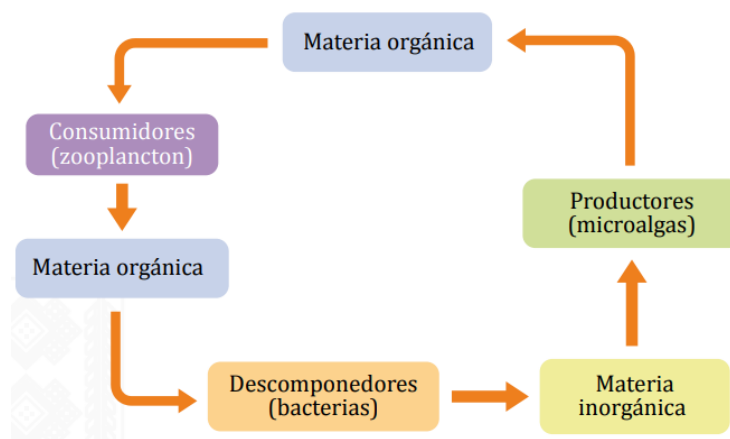


Figura 2.4. Relación entre productores, consumidores y descomponedores en Lagunas de Maduración.

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

2.1.2. Dimensionamiento

2.1.2.1. Dimensionamiento de lagunas facultativas

Los principales parámetros para el dimensionamiento de las Lagunas Facultativas son:

Carga superficial

La carga superficial aplicable a las Lagunas Facultativas viene dada por la formula siguiente:

$$\lambda_s = \frac{Q * C_a}{S} \quad (1)$$

Donde:

λ_s : carga superficial (kg DBO₅/hab/d).

Q: caudal de aguas residuales a tratar (m³/d).

C_a : concentración DBO₅ de las aguas afluentes a Laguna Facultativa (kg DBO₅/m³).

S: superficie de lámina de agua de la Laguna Facultativa (ha).

Profundidad

En lo referente a la profundidad útil en este tipo de lagunas, el rango habitual es de 1,5 -2,0 m.

Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El tiempo de retención hidráulica (TRH) viene dado por la expresión:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

Donde:

TRH: tiempo de retención hidráulica (d).

V: volumen útil de la Laguna Facultativa (m³).

Q: caudal de aguas a tratar (m³/d).

El TRH requerido para la oxidación de la materia orgánica varía con las condiciones locales, especialmente con la temperatura.

Geometría (relación longitud/ancho)

Para este tipo de lagunas, en el caso de las Lagunas Facultativas Primarias se recomiendan relaciones largo/ancho de entre 2 y 4, con el fin de no sobrecargar la zona de alimentación. Para las Lagunas Facultativas Secundarias esta relación es más flexible.

2.1.2.2. Dimensionamiento de lagunas de maduración

Los principales parámetros para el dimensionamiento de las Lagunas de Maduración son:

Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El tiempo de retención hidráulica (TRH) viene dado por la fórmula:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

Donde:

TRH: tiempo de retención hidráulica (d).

V: volumen útil de la Laguna de Pulimiento o Maduración (m³).

Q: caudal de aguas a tratar (m³/d).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO, 1987) recomienda un TRH mínimo de cinco días en el caso de que se haga uso de una única Laguna de Maduración y, en el caso de recurrirse al empleo de varias lagunas dispuestas en serie, el tiempo en cada una de ellas será al menos de tres días.

Carga superficial

La carga superficial aplicable a las Lagunas de Maduración viene dada por la siguiente fórmula:

$$\lambda_s = \frac{Q * C_a}{S} \quad (1)$$

Donde:

λ_s : carga superficial (kg DBO₅/hab/d).

Q: caudal de aguas residuales a tratar (m³/d).

C_a : concentración DBO_5 de las aguas afluentes a Laguna de Maduración ($kg\ DBO_5/m^3$).

S: superficie de lámina de agua de las Lagunas de Maduración (ha).

Profundidad

La profundidad útil habitual en este tipo de lagunas es de 0,8-1,2 m, si bien, se tienen experiencias positivas en la zona boliviana de los Llanos operando con profundidades útiles de hasta 1,5 m.

Geometría (relación largo/ancho)

En lo referente a la geometría, en las Lagunas de Maduración se trabaja con relaciones largo/ancho que van desde 1 hasta 5, en el caso de lagunas dispuestas en serie, y que son superiores a 10 en el caso de operar con lagunas tabicadas.

Para el caso de las lagunas tabicadas el cálculo de la relación longitud/ancho (L/A) se determina haciendo uso de las siguientes expresiones, en el caso de que los tabiques se dispongan paralelamente al ancho, o paralelamente a la longitud, respectivamente.

Siendo:

$$L/A = \frac{A}{L} * (n + 1)^2 \quad (4)$$

$$L/A = \frac{L}{A} * (n + 1)^2 \quad (5)$$

L: longitud de la laguna (m)

A: ancho de la laguna (m)

n: número de divisiones internas en las lagunas (adimensional).

2.1.3. Rendimientos

2.1.3.1. Rendimientos de eliminación de la materia carbonada en lagunas facultativas y de maduración.

Para determinar el rendimiento de eliminación de la materia carbonada en las Lagunas Facultativas y de Maduración se pueden emplear tanto modelos de flujo pistón, como de mezcla completa y de flujo disperso. En general se recomienda utilizar el modelo de flujo disperso. Este modelo emplea la fórmula:

$$C_{es} = C_a \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}} \quad (6)$$

Donde:

C_{es} : concentración de DBO₅ soluble en el efluente de la laguna (mg/l)

C_a : concentración de DBO₅ total en el afluente de la laguna (mg/l)

a : coeficiente (adimensional)

e : base de los logaritmos neperianos (2,72)

d = número de dispersión (adimensional)

El coeficiente “ a ” se determina mediante la fórmula:

$$a = \sqrt{1 + 4K * TRH * d} \quad (7)$$

Donde:

K : coeficiente de eliminación de DBO₅ a la temperatura de operación (d^{-1})

TRH : tiempo de retención hidráulica (d)

d : número de dispersión (adimensional)

El coeficiente K se calcula para diferentes temperaturas mediante la fórmula:

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)} \quad (8)$$

Donde:

K_T : coeficiente de eliminación de DBO₅ a la temperatura T (d^{-1})

K_{20} : constante de reacción a 20 °C (d^{-1})

θ : coeficiente adimensional, con un valor de 1,035 (Arceivala, 1981)

T : temperatura media del agua residual en el mes más frío (°C).

En este caso no se aplica la temperatura del aire. La constante de reacción a 20 °C puede calcularse haciendo uso de la carga superficial con la que opera la laguna, de acuerdo con la ecuación de Arceivala (1981):

$$K_{20} = 0,132 * (\log \lambda_s) - 0,146 \quad (9)$$

Donde:

λ_s : carga superficial con la que opera la laguna (kg DBO₅/ha/d)

Por último, el número de dispersión “d” se calcula mediante la fórmula propuesta por von Sperling (1999):

$$d = \frac{1}{(L/A)} \quad (10)$$

Donde:

L: longitud de la laguna (m)

A: ancho de la laguna (m)

Para pasar de concentración de DBO_{5soluble} (C_{es}) a concentración de DBO_{5total} (C_e) en el efluente de las Lagunas Facultativas, se hace uso de la fórmula:

$$C_e = C_{es} + C_p \quad (11)$$

Donde:

C_p : concentración de la DBO₅ particulada (mg/L). Para su cálculo se asume que 1 mg/L de los sólidos en suspensión totales presentes en el efluente de una Laguna Facultativa se corresponde con una DBO₅ de 0,35 mg/L. Por lo que la concentración de C_e vendrá dada por:

$$C_e = C_{es} + (C_{SST} * 0,35) \quad (12)$$

Donde:

C_{SST} : concentración de sólidos en suspensión en el efluente de la Laguna Facultativa (mg/L). Se suele adoptar un valor de 60-100 mg/l.

2.1.3.2. Rendimientos de eliminación de organismos patógenos

Para determinar el rendimiento de eliminación de organismos patógenos en las Lagunas Facultativas se pueden emplear tanto modelos de flujo pistón, como de mezcla completa y de flujo disperso. En general se recomienda utilizar el modelo de flujo disperso.

En el caso de las Lagunas de Maduración se recomienda también emplear el modelo de flujo disperso.

Esta modelo específica que:

$$N_e = N_a \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}} \quad (13)$$

Donde:

N_e : concentración de coliformes en el efluente de la laguna (NMP/100 mL)

N_a : concentración de coliformes en el afluente de la laguna (NMP/100 mL)

a : coeficiente (adimensional)

e : base de los logaritmos neperianos (2,72)

d = número de dispersión (adimensional)

El coeficiente “ a ” se determina mediante la fórmula:

$$a = \sqrt{1 + 4K_b * TRH * d} \quad (14)$$

Donde:

K_b : coeficiente de muerte bacteriana a 20 °C (d^{-1})

TRH: tiempo de retención hidráulica (d)

d : número de dispersión (adimensional)

El coeficiente de muerte bacteriana a 20 °C, K_b , puede determinarse haciendo uso de la fórmula propuesta por von Sperling (2016).

$$K_b = 0,549 * h^{-1,456} \quad (15)$$

Donde:

h : profundidad efectiva de la laguna (m)

El autor aconseja que el valor que se obtiene de K_b se reduzca del orden de un 5-15% en el caso de las Lagunas Facultativas y, que se incremente en la misma proporción, en el caso de las Lagunas de Maduración.

Para corregir el valor de K_b en función de la temperatura se emplea la fórmula:

$$K_{bT} = K_{b20} * \theta^{(T-20)} \quad (16)$$

Donde:

K_{bT} : coeficiente de muerte bacteriana a la temperatura T (d^{-1})

θ : coeficiente de temperatura (suele adoptar un valor 1,07. Von Sperling y Chernicharo, 2005).

T: temperatura media del agua en el mes más frío ($^{\circ}C$).

El número de dispersión “d” se calcula mediante la fórmula propuesta por von Sperling (1999):

$$d = \frac{1}{(L/A)} \quad (17)$$

Donde:

L: longitud de la laguna (m)

A: ancho de la laguna (m)

Finalmente, el rendimiento de eliminación de coliformes en las Lagunas Facultativas y de Maduración se determina haciendo uso de la fórmula:

$$r_c = \frac{N_a - N_e}{N_a} * 100 \quad (18)$$

Donde:

r_c : rendimiento de eliminación de coliformes (%)

N_a : concentración de coliformes en el afluente de la laguna (NMP/100 ml)

N_e : concentración de coliformes en el efluente de la laguna (NMP/100 ml)

En el caso de varias Lagunas de Maduración, de iguales dimensiones y dispuestas en serie, el rendimiento global de eliminación de coliformes viene dado por la fórmula:

$$r_{tc} = |1 - (1 - r_n)^n| * 100 \quad (19)$$

Donde:

r_{tc} : rendimiento global de eliminación (%)

r_n : rendimiento de eliminación en cada Laguna de Maduración de la serie (%)

n : número de Lagunas de Maduración en serie

Y la concentración de coliformes en la última laguna de la serie será:

$$N = N_a * (1 - r_n) \quad (20)$$

Donde n es el número de Lagunas de Maduración dispuestas en serie.

Si las Lagunas de Maduración dispuestas en serie no presentan las mismas dimensiones, el cálculo del rendimiento de abatimiento de organismos patógenos debe hacerse de forma individualizada, laguna por laguna.

2.1.4. Aforo de caudales

2.1.4.1. Medición de caudal en canales abiertos

En canales abiertos la medición de caudal se lleva a cabo, normalmente, en vertederos (rectangulares o triangulares), o en canales tipo Parshall (Figura 2.5).

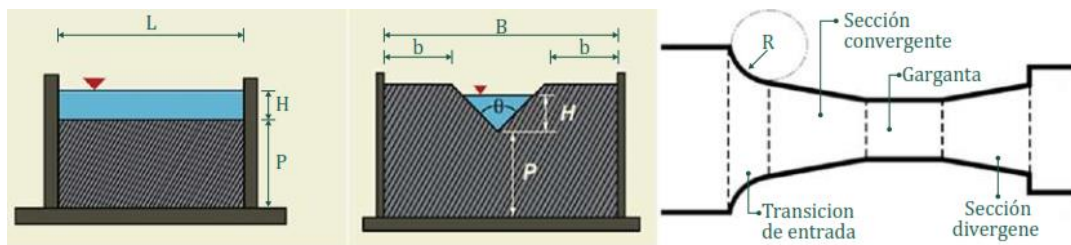


Figura 2.5. Vertedero rectangular, triangular y canal Parshall (Ponce, 2013).

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

Estos elementos suelen contar con una reglilla para la medición del nivel del agua y, en el caso de los canales Parshall, también es frecuente que la medición del nivel de agua se efectúe con el auxilio de un flotador, que se dispone el mismo canal, o en una pileta

construida al lado del canal y comunicada con él, por su parte inferior. Los operadores de las PTAR disponen de tablas, que traducen las medidas de nivel efectuadas a caudales instantáneos de las aguas residuales circulantes, en función del tipo de elemento de medida seleccionado.

De los medidores de caudal en canales el canal Parshall es el más eficaz, siempre que sus dimensiones sean las correctas. Dada las dificultades de construir durante la obra un medidor de estas características, se recomienda, siempre que sea posible, instalar canales Parshall prefabricados (Figura 2.6).



Figura 2.6. Canal Parshall prefabricado (EINAR S.A.).

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

2.1.5. Calidad del agua

2.1.5.1. Principales características de las aguas residuales.

Estas características de las aguas residuales son parámetros importantes para el tipo de tratamiento, así como para la gestión técnica de la calidad ambiental.

A. Características físicas.

- **Temperatura.**

La temperatura de las aguas residuales es mayor que la de las aguas no contaminadas, debido a la energía liberada en las reacciones bioquímicas, que se presentan en la degradación de la materia orgánica.

- **Turbidez.**

La turbidez, medida de la propiedad de transmisión de la luz del agua, es otro ensayo utilizado para indicar la calidad de los vertidos de aguas residuales con respecto a la materia suspendida.

- **Color.**

El agua residual reciente suele ser gris; sin embargo, a medida que los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce y el color cambia a negro. En esta condición, se dice que el agua residual es séptica.

- **Olor.**

El olor es debido a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica, sobre todo, a la presencia de ácido sulfhídrico y otras sustancias volátiles. El agua residual reciente tiene un olor peculiar algo desagradable, pero más tolerable que el del agua residual séptica.

- **Sólidos Totales.**

Se clasifican según su tamaño o presentación en sólidos suspendidos y sólidos filtrables.

Sólidos suspendidos: son las partículas flotantes, y aquellas otras que también son perceptibles a simple vista y tienen posibilidades de ser separadas del líquido.

Dentro de los sólidos suspendidos se pueden distinguir los sólidos sedimentables.

Sólidos filtrables: esta fracción se compone de sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal consiste en partículas con un diámetro aproximado que oscila entre 10^{-3} y 1 micra (figura 2.7). Esta fracción no puede eliminarse por sedimentación. Los sólidos disueltos se componen de moléculas orgánicas, moléculas inorgánicas e iones que se encuentran disueltos en el agua.

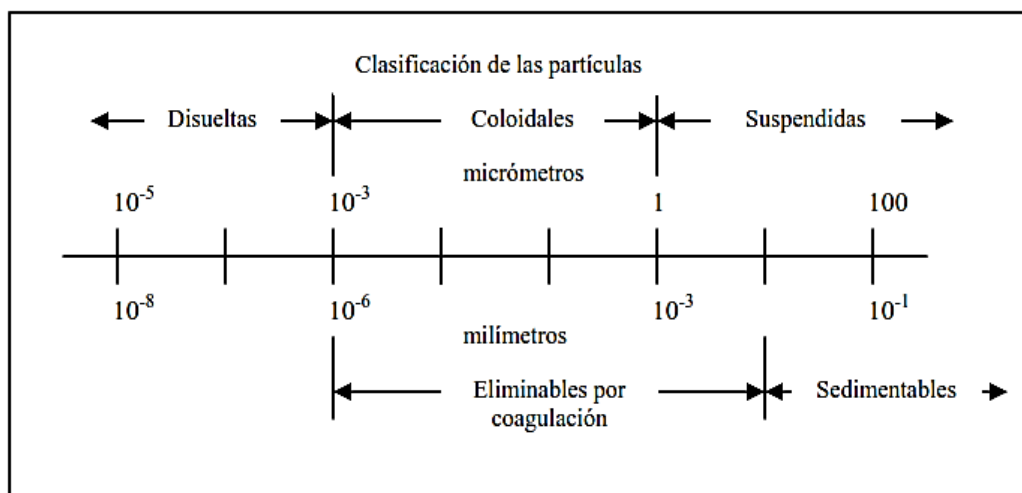


Figura 2.7. Clasificación de las partículas sólidas contenidas en un agua residual, según su diámetro.

Fuente: Evaluación y rediseño del sistema de lagunas de estabilización de la Universidad de Piura. 2004.

B. Características químicas.

Estarán dadas, en función de los desechos que ingresan al agua servida.

- **Materia Orgánica.**

La materia orgánica está compuesta en un 90% por carbohidratos, proteínas, grasas y aceites provenientes de excrementos y orina de seres humanos, restos de alimentos y detergentes. Estos contaminantes son biodegradables, es decir, pueden ser transformados en compuestos más simples por la acción de microorganismos naturales presentes en el agua, cuyo desarrollo se ve favorecido por las condiciones de temperatura y nutrientes de las aguas residuales domésticas.

- **Materia inorgánica.**

Se incluyen en este grupo todos los sólidos de origen generalmente mineral, como son sales minerales, arcillas, lodos, arenas y gravas no biodegradables.

En la tabla 1 se presenta la relación entre algunos constituyentes inorgánicos y el agua residual.

Tabla 2.1. Relación entre algunos constituyentes inorgánicos y el agua residual.

Elemento	Relación con el agua residual
----------	-------------------------------

Hidrógeno (pH)	El intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y crítico. El agua residual con una concentración adversa de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos. Por lo general, el pH óptimo para el crecimiento de los organismos se encuentra entre 6,5 y 7,5.
Cloruros	Proceden de la disolución de suelos y rocas que los contienen y que están en contacto con el agua, intrusión del agua salada (zonas costeras), agua residual doméstica, agrícola e industrial. Suministra información sobre el grado de concentración del agua residual.
Nitrógeno	Nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Básico para síntesis de proteínas.
Fósforo	Incrementa la tendencia de proliferación de algas en el receptor. Íntimamente ligado, igual que el nitrógeno, al problema de la eutrofización.
Azufre	Requerido en la síntesis de las proteínas y liberado en su degradación.

Fuente: Evaluación y rediseño del sistema de lagunas de estabilización de la Universidad de Piura. 2004.

- **Gases.**

Las aguas residuales contienen diversos gases con diferente concentración.

Oxígeno disuelto: es el más importante, y es un gas que va siendo consumido por la actividad química y biológica. La presencia de oxígeno disuelto en el agua residual evita la formación de olores desagradables.

Ácido sulfhídrico: se forma por la descomposición de la materia orgánica que contiene azufre o por la reducción de sulfitos y sulfatos minerales. Su presencia, que se manifiesta fundamentalmente por los olores que produce.

Anhídrido carbónico: se produce en la fermentación de los compuestos orgánicos de las aguas residuales negras.

Metano: se forma en la descomposición anaerobia de la materia orgánica por la reducción bacteriana del CO₂.

Otros gases: se producen además gases malolientes, como ácidos grasos volátiles y otros derivados del nitrógeno.

C. Características Biológicas.

Estas características están definidas por la clase de microorganismos presentes en el agua, entre los cuales tenemos:

- **Bacterias.**

Juegan un papel fundamental en la descomposición y estabilización de la materia orgánica.

Pueden clasificarse, en base a su metabolismo, en heterótrofas y autótrofas. En el tratamiento biológico de las aguas residuales, las bacterias heterótrofas constituyen el grupo más importante, por su necesidad de compuestos orgánicos para el carbono celular. Las bacterias autótrofas y heterótrofas pueden dividirse, a su vez, en anaerobias, aerobias, o facultativas, según su necesidad de oxígeno.

- ❖ Bacterias anaerobias: son las que consumen oxígeno procedente de los sólidos orgánicos e inorgánicos y la presencia de oxígeno disuelto no les permite subsistir. Los procesos que provocan son anaerobios, caracterizados por la presencia de malos olores.
- ❖ Bacterias aerobias: son aquellas que necesitan oxígeno procedente del agua para su alimento y respiración. Las descomposiciones y degradaciones que provocan sobre la materia orgánica son procesos aerobios, caracterizados por la ausencia de malos olores.
- ❖ Bacterias facultativas: algunas bacterias aerobias y anaerobias pueden llegar a adaptarse al medio opuesto, es decir, las aerobias a medio sin oxígeno disuelto y las anaerobias a aguas con oxígeno disuelto.
- ❖ Bacterias coliformes: bacterias que sirven como indicadores de contaminantes y patógenos. Son usualmente encontradas en el tracto intestinal de los seres humanos y otros animales de sangre caliente

- **Algas.**

En los estanques de estabilización, son un valioso elemento porque producen oxígeno a través del mecanismo de la fotosíntesis.

Las algas, al igual que sucede con otros microorganismos, requieren compuestos inorgánicos para reproducirse. Las algas pueden presentar el inconveniente de reproducirse rápidamente, debido al enriquecimiento del agua (eutrofización) y crear grandes colonias flotantes originando problemas a las instalaciones y al equilibrio del sistema.

- **Demanda química de oxígeno (DQO).**

Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente los materiales orgánicos presentes en una muestra de agua. Esta oxidación degrada el material orgánico biodegradable y no biodegradable (Evaluación y rediseño del sistema de lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, 2004, p. 8).

- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).**

El parámetro de polución orgánica más utilizado y aplicable a las aguas residuales y superficiales es la DBO a los 5 días (DBO_5). Supone esta determinación la medida del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de materia orgánica biodegradable. La medida de la DBO es importante en el tratamiento de aguas residuales y para la gestión técnica de la calidad de agua porque se utiliza para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica (Evaluación y rediseño del sistema de lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, 2004, p. 8).

2.1.5.2. Calidad exigida al efluente tratado.

Los requisitos exigibles en Bolivia a los efluentes tratados en las PTAR se recogen en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), que reglamenta la Ley de Medio Ambiente N° 1333 de 27 de abril de 1992, en lo referente a la prevención y control de la contaminación hídrica en el marco del Desarrollo Sostenible, 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

Este reglamento contiene en su Anexo A, algunas características técnicas de calidad de agua que se deben cumplir, entre ellos están:

- Límites máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores
- Cuadro N°1: Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso (4 Clases).
- Cuadro N°A-1: Valores máximos admisibles para parámetros en cuerpos receptores (80 parámetros).
- Anexo A-2 Límites permisibles para descargas líquidas en mg/L (25 parámetros).

Respecto a reúso de aguas, este reglamento en el Capítulo V, Art. 67, establece que el reúso de aguas residuales crudas o tratadas por terceros, será autorizado por el Prefecto (actualmente Gobernador) cuando el interesado demuestre que estas aguas satisfacen las condiciones de calidad establecidas en el Reglamento.

A. Clasificación de los cuerpos de agua

ARTICULO 4° La clasificación de los cuerpos de agua, según las clases señaladas en el Cuadro N° 1 - Anexo A del presente reglamento, basada en su aptitud de uso y de acuerdo con las políticas ambientales del país en el marco del desarrollo sostenible, será determinada por el MDSMA.

Para ello, las instancias ambientales dependientes del prefecto deberán proponer una clasificación, adjuntando la documentación suficiente para comprobar la pertinencia de dicha clasificación. Esta documentación contendrá como mínimo: Análisis de aguas del curso receptor a ser clasificado, que incluya al menos los parámetros básicos, fotografías que documenten el uso actual del cuerpo receptor, investigación de las condiciones de contaminación natural y actual por aguas residuales crudas o tratadas, condiciones biológicas, estudio de las fuentes contaminantes actuales y la probable evolución en el futuro en cuanto a la cantidad y calidad de las descargas.

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, o con simple desinfección bacteriológica en los casos necesarios verificados por laboratorio.

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

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

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

En caso de que la clasificación de un cuerpo de agua afecte la viabilidad económica de un establecimiento, el Representante Legal de éste podrá apelar dicha clasificación ante la autoridad ambiental competente, previa presentación del respectivo análisis costo – beneficio.

Cuadro N°2.2. Clasificación de los cuerpos receptores de agua según su aptitud de uso

Orden	Usos	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
1	Para abastecimiento domestico de agua potable después de:				
	a) Sólo una desinfección y ningún tratamiento	Si	No	No	No
	b) Tratamiento solamente físico y desinfección	No necesario	Si	No	No
	c) Tratamiento físico-químico, completo: coagulación, floculación, filtración y desinfección.	No necesario	-	Si	No
	d) Almacenamiento prolongado o presedimentación, seguidos de tratamiento, al igual que c).	No necesario	No necesario	No necesario	Si
2	Para recreación de contacto primario: natación, esquí, inmersión.	Si	Si	Si	No

3	Para protección de los recursos hidrobiológicos	Si	Si	Si	No
4	Para riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cáscara delgada, que sean ingeridas crudas sin remoción de ella	Si	Si	No	No
5	Para abastecimiento industrial	Si	Si	Si	Si
6	Para la cría natural y/o intensiva (acuicultura) de especies destinadas a la alimentación humana	Si	Si	Si	No
7	Para abrevadero de animales	No (*)	Si	Si	No
8	Para la navegación	No (**)	Si	Si	Si

Fuente: Reglamento en materia de contaminación hídrica (1992).

Tabla N° 2.3. Cuadro A-1

Valores máximos admisibles en parámetros de cuerpos receptores

N°	Parámetros	Unidad	Cancerígenos	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"
1	2	3	4	5	6	7	8
1	PH	°C	NO	6.0 a 8.5	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0
2	Temperatura	mg/l		+/- 3°C de C receptor	+/- 3°C de C receptor	+/- 3°C de C receptor	+/- 3°C de C receptor
3	Solidos disueltos totales	mg/l		1000	1000	1500	1500
4	Aceites y Grasas	mg/l	NO	Ausentes	Ausente	0.3	1
5	DBO5	mg/l	NO	<2	<5	<20	<30
6	DQO	mg/l	NO	<5	<10	<40	<60
7	NMP Coliformes fecales NMP	N/100ml	NO	<50 y <5 en 80% de muestras	<1000 y <200 en 80 % de muestras	<5000 y <1000 en 80% de muestras	<50000 y <5000 en 80% de muestras
8	Parámetros	N/l		<1	<1	<1	<1
9	Color mg Pt/l	mg/l	NO	<10	<50	<100	<200
10	Oxígeno disuelto	mg/l	NO	>80% sat.	>70% sat.	>60% sat.	>50 % sat
11	Turbidez	UNT	NO	<10	<50	<100 <2000 ***	<200 - 10000***
12	Solidos Sedimentables	mg/l-ml/l	NO	<10 mg/l	<30 mg/l - 0.1 ml/l	<50 mg/l - <1 ml/l	100 - <1 ml/l
13	Aluminio	mg/l		0.2 c. Al	0.5 c. Al	1.0 c. Al	1.0 c. Al
14	Amoniaco	mg/l	NO	0.05 c. NH3	1.0 c. NH.	2 c. NH3	4 c. Nh3
15	Antimonio	mg/l	NO	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb	0.0 c. Sb	0.01 c. Sb
16	Arsénico total	mg/l	SI	0.05 c. As	0.05 c. As	0.05 C. Be	0.1 c. As
17	Benceno	ug/l	SI	2.0 c. Be	6.0 c. Be	10.0 c. Be	10
18	Bario	mg/l	NO	1.0 0.06 c. Ba	1.0 c. Ba	2.0 c. Ba	5.0 c. Ba
19	Berilio	mg/l	SI	0.001 c. B	0.001 c. Be	0.001 c. Be	0.001 c. Be
20	Boro	mg/l		1.0 c. B	1.0 c. Ba	1.0 c. Bo	1.0 c. B
21	Calcio	mg/l	NO	200	300	300	400
22	Cadmio	mg/l	NO	0.005	0.005	0.005	0.005
23	Cianuros	mg/l	NO	0.02	1	0.2	0.2

Nº	Parámetros	Unidad	Cancerígenos	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"
1	2	3	4	5	6	7	8
24	Cloruros	mg/l	NO	250 c. Cl	300 c. Cl	400 c. Cl	500 c. Cl
25	Cobre	mg/l	NO	0.05 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu
26	Cobalto	mg/l		0.1 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co
27	Cromo Hexavalente	mg/l	SI	0.05 c. Cr total	0.05 c. Cr+6	0.05 c. Cr+6	0.05 c. Cr+6
28	Cromo Trivalente	mg/l	NO		0.6 c. Cr+3	0.6 c. Cr+3	1.1 c. Cr+3
29	1.2 Diloroteno	ug/l	SI	10	10	10	10
30	1.1 Dicloroteno	ug/l	SI	0.3	0.3	0.3	0.3
31	Estaño	mg/l	NO	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn
32	Fenoles	ug/l	NO	1e. C6H5OH	1 c. C6H5OH	5 c. C6H5OH	10 c. C6H5OH
33	Fierro Soluble	mg/l	NO	0.3 c. Fe	0.3 c. Fe	1.0 C. Fe	1.0 c. Fe
34	Fluoruros	mg/l	NO	0.6 - 1.7 c. F	0.6 - 1.7 c. F	0.6 - 1.7 c. F	0.6 - 1.7 c. F
35	Fosfato Total	mg/l	NO	0.4 c. Orthofosf	0.5 c. Orthofosf.	1.0 c. Orthofosf	1.0 c. Orthofosf
36	Magnesio	mg/l	NO	100 c. Mg	100 c. Mg	150 c. Mg	150 c. Mg
37	Manganeso	mg/l	NO	0.5 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0 c. Mn
38	Mercurio	mg/l	NO	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg
39	Litio	mg/l		2.5 c. Li	2.5 c. Li	2.2 c. Li	5 c. Li
40	Niquel	mg/l	SI	0.05 c. Ni	0.05 c. Ni	0.5 c. Ni	0.5 c. Ni
41	Nitrato	mg/l	NO	20.0 c. N03	50.0 c. N03	50.0 c. N03	50.0 c. N03
42	Nitrito	mg/l	NO	<1.0 c. N	1.0 c. N	1.0 c. N	1.0 c. N
43	Nitrógeno Total	mg/l	NO	5 c. N	12 c. N	12 c. N	12 c. N
44	Plomo	mg/l	NO	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.1 c. PB
45	Plata	mg/l	NO	0.05 C. Ag	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag
46	Pentaclorofenol	ug/l	SI	5	10	10	10
47	Selenio	mg/l	NO	0.01 c. Se	0.01 c Se	0.01 c. Se	0.05 c. Se
48	Sodio	mg/l	NO	200	200	200	200
49	Sólidos flotantes			Ausentes	Ausentes	Ausentes	<ret.malla 1 mm^2
50	Sulfatos	mg/l	NO	300 c. SO4	400 c. SO4	400 c. SO4	400 c. SO4

Nº	Parámetros	Unidad	Cancerígenos	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"
1	2	3	4	5	6	7	8
51	Sulfuros	mg/l	NO	0.1	0.1	0.5	1
52	S.A.A.M (Detergentes)	mg/l		0.5	0.5	0.5	0.5
53	Tetracloroetano	ug/l	NO	10	10	10	10
54	Tricloroetano	ug/l	SI	30	30	30	30
55	Tetracloruro de carbono	ug/l	SI	3	3	3	3
56	2.4.6 Triclorefenol	ug/l	SI	10	10	10	10
57	Uranio Total	mg/l		0.02 c. U	0.02 c. U	0.02 c. U	0.02 c. U
58	Vanadio	mg/l	NO	0.1 c. V	0.1 c. V	0.1 c. V	0.1 c. V
59	Zinc	mg/l	NO	0.2 C. Zn	0.2 c. Zn	5.0 c. Zn	5.0 c. Zn
	PLAGUICIDAS	ug/l					
60	Aldrin - Dieldrin @	ug/l	SI	0.03	0.03	0.03	0.03
61	Clordano @	ug/l	SI	0.3	0.3	0.3	0.3
62	D.D.T @	ug/l	SI	1	1	1	1
63	Endrin @	ug/l	NO		@		@
64	Endosulfan @	ug/l	NO	70	70	70	70
65	Heptacloro y heptacloripoxido @	ug/l	SI	0.1	0.1	0.1	0.1
66	Lindano (Gama - BMC) @	ug/l	SI	3	3	3	3
67	Metoxicloro	ug/l	NO	30	30	30	30
68	Bifenilas Policloradas	ug/l		2			
69	(PCB's):	ug/l	SI		0.001	0.001	0.001
70	Toxafeno @	ug/l	SI	0.01	0.01	0.01	0.05
71	Demeton:	ug/l	NO	0.1	0.1	0.1	0.1
72	Gution:	ug/l	NO	0.01	0.01	0.01	0.01
73	Malation	ug/l	NO	0.04	0.04	0.04	0.04
74	Paration @	ug/l	NO	@	@		@

N°	Parámetros	Unidad	Cancerígenos	Clase "A "	Clase "B"	Clase "C "	Clase "D "
1	2	3	4	5	6	7	8
75	Carbaril: Comp. Organofosforados y Carbamatos totales:	ug/l			0.02	0.02	0.02
76	2.4 - D: Herbicida: Chlorophanoxy	ug/l	SI	100	100	100	100
77	2.4.5 - TP: Herbicida: Chlorophanox	ug/l	SI	10	10	10	10
78	2.4.5 - T: @ RADIACIÓN	ug/l	SI	2	2	2	2
79	Radiación Alfa global	Bg/l	SI	0.1	0.1	0.1	0.1
80	Radiación beta global	Bg/l	SI	1	1	1	1

Fuente: Reglamento en materia de contaminación hídrica (1992).

El Anexo A-2 recoge los límites permisibles para 25 parámetros. Debe hacerse constar que en este caso se trata de valores de emisión, es decir, 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 bolivianas, 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.

Cuadro 2.4. Anexo A-2. Límites permisibles para descargas líquidas.

Norma Parámetros	Propuesta	
	Diario	Mes
Cobre	1.0	0.5
Zinc	3.0	1.5
Plomo	0.6	0.3
Cadmio	0.3	0.15
Arsénico	1.0	0.5
Cromo + 3	1.0	0.5
Cromo + 6	0.1	0.05
Mercurio	0.002	0.001
Fierro	1.0	0.5
Antimonio (&)	1.0	
Estaño	2.0	1.0
Cianuro libre (a)	0.2	0.10
Cianuro libre (b)	0.5	3.0
PH	6.9	6.9
Temperatura (*)	± 5°C	± 5°C
Compuestos fenólicos	1.0	0.5
Sólidos Susp. Totales	60.0	
Colifecales (NMP/100 ml)	1000.0	
Aceite y Grasas ©	10.0	
Aceites y Grasas (d)	20.0	
DBO5	80.0	
DQO €	250.0	
DQO (f)	300.0	
Amonio como N	4.0	2.0
Sulfuros	2.0	1.0

Fuente: Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (1992).

Cuando no exista las necesidades de reutilización de las aguas se debe prever su descarga en un cauce natural, para esto se debe cumplir el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333 de Medio Ambiente el cual da valores máximos permisibles de los principales contaminantes que traen las aguas residuales domésticas.

Tabla 2.5. Límites permisibles para descargas líquidas según 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/100ml)	1000.0	

Nota: en la tabla, la columna con el epígrafe “DÍARIO” 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 la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales, (2021).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO

3.1. Marco espacial

El presente trabajo de investigación, se desarrolla en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Warnes, ubicada en el departamento de Santa Cruz de la Sierra, provincia Ignacio Warnes.

3.2. Marco temporal

La presente investigación comprende el periodo, de acuerdo a los certificados de calidad de agua y aforo de caudales el periodo de observación es desde el 19 de noviembre de 2018 hasta 19 de agosto de 2022.

3.3. Marco Metodológico

Para conseguir los objetivos trazados se realizó la siguiente metodología:

- En base a la bibliografía existente Guía Técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales (2021), se describieron las características más importantes del funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de tecnología de lagunas de oxidación.

- Se solicitó los planos de construcción de la planta de tratamiento a la Cooperativa de Servicios Públicos Warnes (COSEPW), y ya se cuentan con los mismos, mediante los cuales se verificó la geometría que posee cada laguna, para posteriormente emplear dichos datos en los cálculos de parámetros de operación.
- Se solicitó los datos de caudales aforados tanto de entrada como de salida de la planta de tratamiento a la Cooperativa de Servicios Públicos de Warnes (COSEPW) y se cuenta con los mismos.
- Se solicitó los datos de calidad del agua de la planta de tratamiento de Warnes, a la Cooperativa de Servicios Públicos de Warnes (COSEPW), quienes nos proporcionaron los certificados de la calidad del agua de diferentes parámetros, avalados por un laboratorio autorizado. Se analizará los certificados de calidad del agua en función a los valores que indiquen los mismos para constatar que estén dentro de lo permisible a lo que indica el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), que reglamenta la Ley de Medio Ambiente N° 1333 de 27 de abril de 1992.
- Se determinó los parámetros de operación en la laguna facultativa mediante las siguientes formulas

Carga superficial

$$\lambda_s = \frac{Q * C_a}{S}$$

Donde:

λ_s : carga superficial (kg DBO₅/hab/d).

Q: caudal de aguas residuales a tratar (m³/d).

C_a: concentración DBO₅ de las aguas afluentes a Laguna Facultativa (kg DBO₅/m³).

S: superficie de lámina de agua de la Laguna Facultativa (ha).

Tempo de retención hidráulica (TRH)

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Donde:

TRH: tiempo de retención hidráulica (d).

V: volumen útil de la Laguna Facultativa (m³).

Q: caudal de aguas a tratar (m³/d).

- Se determinó las eficiencias de remoción en la laguna facultativa mediante las siguientes formulas

Eficiencia de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO

$$E_{DBO} = \frac{C_a - C_e}{C_a} * 100$$

Donde:

E_{DBO}: eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno en la laguna facultativa (%)

C_a: concentración DBO₅ de las aguas afluentes a Laguna Facultativa (kg DBO₅/m³).

C_e: concentración DBO₅ de las aguas efluentes a Laguna Facultativa (kg DBO₅/m³).

Rendimiento de eliminación de coliformes

$$r_c = 100 - 100 * \frac{1}{K_{BF}(R + 1)}$$

Donde:

r_c: rendimiento de eliminación de coliformes (%)

R: tiempo de retención hidráulica para el caudal medio (d).

K_{BF}: constante de decaimiento para la laguna facultativa.

Remoción de coliformes

$$N_e = N_a - N_a * \frac{r_c}{100}$$

Donde:

N_e : número de coliformes del efluente entrante a Laguna (NMP/100ml).

N_a : número de coliformes del afluente saliente de la Laguna (NMP/100ml).

r_c : rendimiento de eliminación de coliformes (%)

Esta metodología se repite nuevamente para la laguna facultativa número 2

- Se determinó los parámetros de operación de la laguna de maduración mediante las siguientes formulas.

Tiempo de retención hidráulica (TRH)

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Donde:

TRH: tiempo de retención hidráulica (d).

V: volumen útil de la Laguna de Pulimiento o Maduración (m³).

Q: caudal de aguas a tratar (m³/d).

- Obtener las eficiencias de tratamiento de la laguna de maduración mediante las siguientes formulas.

Eficiencia de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO

$$E_{DBO} = \frac{C_a - C_e}{C_a} * 100$$

Donde:

E_{DBO} : eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno en la Laguna de Maduración (%)

C_a: concentración DBO₅ de las aguas afluentes a Laguna de Maduración (kg DBO₅/m³).

C_e: concentración DBO₅ de las aguas efluentes a Laguna de Maduración (kg DBO₅/m³).

Remoción de coliformes

De la siguiente ecuación despejamos la variable K_b, para obtener la Tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias.

$$N_e = \frac{N_a}{(1 + K_b * t)}$$

Donde:

N_e: número de coliformes del efluente entrante a Laguna de Maduración (NMP/100ml).

N_a: número de coliformes del afluente saliente de la Laguna (NMP/100ml).

K_b: tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias.

t: tiempo de retención hidráulica (d).

Rendimiento de eliminación de coliformes

En las Lagunas de Maduración se determina haciendo uso de la fórmula:

$$r_c = \frac{N_a - N_e}{N_a} * 100$$

Donde:

r_c: rendimiento de eliminación de coliformes (%)

N_a: concentración de coniformes en el afluente de la laguna (NMP/100 ml)

N_e: concentración de coliformes en el efluente de la laguna (NMP/100 ml)

Esta metodología se repite nuevamente para la laguna de pulimiento o maduración número 2.

- Realizar cuadros comparativos de los resultados obtenidos y resultados de otros estudios o bibliografías locales y extranjeras. Comentar, discutir sobre los valores obtenidos y recomendar.

3.4. MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN

3.4.1. Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación es del tipo experimental.

3.4.2. Unidad de análisis

- ❖ Parámetros de operación de una planta de tratamiento de aguas residuales con tecnología de lagunas de oxidación.
- ❖ Eficiencias de remoción de las distintas lagunas de oxidación.

3.4.3. Análisis de variables

3.4.3.1. Variable independiente

- ❖ Caudal del agua residual
- ❖ Parámetros de calidad del agua (en coliformes fecales, contenido DBO₅, contenido DQO, tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias, sólidos en suspensión totales)

3.4.4. Variable dependiente

- ❖ Tiempo de retención hidráulica
- ❖ Carga superficial
- ❖ Eficiencias o rendimientos de remoción (en coliformes fecales, contenido DBO₅, contenido DQO, sólidos en suspensión totales)

3.4.5. Variable interviniente

- ❖ Geometría de las lagunas de oxidación.

3.4.6. Población y muestra

3.4.6.1. Población

Habitantes del municipio de Warnes los cuales son beneficiarios de este proyecto.

3.4.7. Muestras

Muestreo no probabilístico, por conveniencia:

- ❖ Aforo de caudales en la entrada como también en la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales Warnes, provenientes de la Cooperativa de Servicios Públicos de Warnes (COSEPW).
- ❖ 45 certificados de calidad del agua de la planta de tratamiento de Warnes provenientes de la Cooperativa de Servicios Públicos de Warnes (COSEPW).

3.4.8. Técnicas e instrumentos para recolección de información

Observación experimental en base a muestras representativas de datos de aforos de caudales medidos a la entrada como también en la salida de la planta de tratamiento y caracterización del agua en base a certificados de la calidad de la misma de diferentes parámetros, los cuales deberán estar debidamente certificados por un laboratorio autorizado.

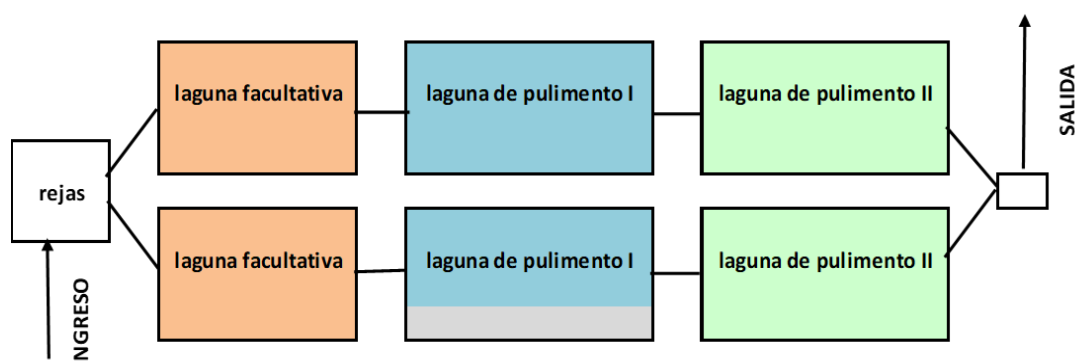
CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Descripción de la PTAR

4.1.1. Ficha técnica

FICHA TÉCNICA DE LA PTAR WARNES	
Municipio: Warnes	Población: 39,570.00 Habitantes
Cuenca inmediata: Mamoré	Fecha: 22 de octubre de 2022
	
Vista PTAR	
Existe PTAR: Si	En funcionamiento: Si
Caudal PTAR: 29.28 l/s	Antigüedad: 20 años

Población conectada a la red de alcantarillado: 13,764.00 habitantes	Contaminantes predominantes : Domésticos
Cuerpo receptor: Río Chane o Grande	
Tecnología de tratamiento : Lagunas de oxidación	Pre tratamiento: Rejillas
	Tratamiento Secundario: Laguna Facultativa Laguna de Maduración I Laguna de Maduración II



Esquema de la PTAR



Imagen satelital de la actual planta de tratamiento

Ubicación PTAR	Latitud	17°29`35.99``S	Longitud	63°9`29.96`` O	Zona	20K
	X	483192.38 m E	Y	8065862.11 m S		
Superficie	4.73 Ha		Perimetro		0.98 km	
Rehuso de aguas tratadas: No						

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Descripción y situación actual de los componentes de la PTAR

La PTAR Warnes se compone de una cámara de ingreso con reja gruesa y partidor de caudal, tiene en funcionamiento 2 trenes de tratamiento compuestas de laguna facultativa – laguna de maduración I – laguna de maduración II y estructura de salida.



Figura 4.1. Google Earth de la planta de tratamiento Warnes.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.1. Canal de ingreso

Desgaste en sus paredes interiores, fisuras superficiales y deterioro en el canal y tapas.

Tapas y canal con fierros de armadura a vista por el desgaste, presencia de manchas de humedad en la parte exterior del canal. Faltan algunas tapas del canal.

4.1.2.2. Cámara de ingreso con rejilla y partidor de caudal

Recibe las aguas del emisario. Es una cámara de hormigón, sirve como cámara de rejillas y cámara partidora de caudal.

No cuenta con compuerta metálica, solo se puede ver una estructura metálica que divide el flujo de ingreso. Tiene fisuras superficiales del hormigón, hay acumulación de grasa, desgaste de la sección del fierro, presenta oxido y suciedad.



Figura 4.2 y 4.3. Rejilla y cámara partidora.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.3. Lagunas facultativas

Son dos lagunas que funcionan en paralelo. Estas lagunas operan, en su estrato superior como lagunas aeróbicas, en su estrato inferior como lagunas anaerobias, y en el estrato intermedio, con la presencia de bacterias facultativas se crea un estrato particular llamada zona facultativa.

4.1.2.4. Laguna facultativa I

Laguna con presencia visible de sedimento en la esquina de ingreso y en sus extremos, presenta taludes con poca inclinación y desgaste con presencia de vegetación. El agua es verduzca con algo de presencia de mal olor.



Figura 4.4. Laguna facultativa I.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.5. Laguna facultativa II

Laguna algo colmatada de sedimento en la esquina de ingreso y en sus extremos, taludes con presencia de vegetación. El agua es verduzca con algo de presencia de mal olor.



Figura 4.5. Laguna facultativa II.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.6. Lagunas de pulimento III y IV (también llamadas lagunas de maduración)

Las lagunas de maduración, también operan en paralelo, se usan para mejorar el efluente de las lagunas facultativas, tienen como objetivo principal la de reducir la concentración de bacterias patógenas. Estas lagunas generalmente son el último paso del tratamiento antes de volcar las aguas tratadas en los receptores finales.

Una vez que la DBO ha sido degradada a niveles aceptables para su descarga a corrientes de agua, la concentración de los coliformes fecales por lo común es muy alta ($1.00E+06$ o $1.00E+07$). En este caso se recurre al uso de lagunas de maduración que además pueden servir de criadero de peces.

4.1.2.7. Laguna de pulimento III

Laguna algo colmatada de sedimento en la esquina derecha del tubo de salida, taludes con poca inclinación y presencia de vegetación, agua de color verduzco.



Figura 4.6. Laguna de maduración III.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.8. Laguna de pulimiento IV

Laguna con presencia de sedimento en sus 4 esquinas y en el tubo de ingreso, taludes con presencia de vegetación. Agua de color verduzco con presencia de olor muy leve.



Figura 4.7. Laguna de maduración IV.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.9. Lagunas de pulimento V y VI

Su función es idéntica a las anteriores, afinan aún más el agua residual.

Los coliformes fecales se eliminan mejor colocando lagunas de maduración en serie, es por eso que este sistema cuenta con 2 lagunas de pulimento una a continuación de la otra.

4.1.2.10. Laguna de pulimiento V

Presencia de mucho sedimento en el tubo de ingreso y salida de la laguna. Salida por un canal vertical que se une a una cámara de salida ultima de PTAR.



Figura 4.8. Laguna de maduración V.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.11. Laguna de pulimiento VI

Presencia de mucho sedimento en el tubo de ingreso y salida de la laguna. Salida por un canal vertical que se une a una cámara de salida ultima de PTAR, el agua es de color verduzco con presencia de mal olor muy leve.



Figura 4.9. Laguna de maduración VI.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.12. Estructura de salida

Recibe el agua de los dos trenes de tratamiento, es un canal de hormigón que descarga el agua hacia un arroyo natural, aparentemente en buenas condiciones, no presenta fisuras, con manchas de humedad en sus paredes exteriores.



Figura 4.10. Canal de descarga a la salida de la PTAR.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Cuerpo receptor

El cuerpo receptor es un cauce pequeño denominado Arroyo Colorado con caudal variable durante todo el año, antes de la descarga del agua de la PTAR Warnes ya presenta signos de contaminación, el agua es negra verdusca con mal olor.

Figura 4.11. Cuerpo receptor.



Fuente: Elaboración propia

No hay evidencia que los pocos pobladores de aguas abajo usen esta agua. El arroyo pasa a través de pantanos naturales de agua para seguir su curso hacia el río Chane.

Figura 4.12. Cuerpo receptor.



Fuente: Elaboración propia.

El cuerpo receptor de las aguas residuales tratadas de la PTAR Warnes es el arroyo Colorado, el cual en fecha 23 de octubre del 2018, por acción de la Autoridad Ambiental Competente Nacional mediante oficio MMAyA/VMABCCGDF N° 1899/18, remite la Resolución Administrativa VMABCCGDF N° 032/18, de aprobación de la clasificación del río Piráí y principales afluentes, ya que la misma cumple con los requisitos mínimos establecidos en el artículo 4 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

Cuadro 4.1. Clasificación de los efluentes secundarios

Afluentes principales	Cuenca río Piráí	Clasificación
Arroyo Los Sauces	Cuenca Baja	D
Arroyo Colorado	Cuenca Baja	D
Río Bibosi	Cuenca Baja	D
Río Toro	Cuenca Baja	D
Arroyo Mil Varas	Cuenca Baja	D

Fuente: Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz.

4.1.4. Afectación a terceros

En lo que respecta a la planta de tratamiento no existe afectación a terceros porque el terreno donde se ubica la planta de tratamiento es propio de la Cooperativa COSEPW, funciona desde el año 2004 sin registro de quejas.

No hay viviendas en los alrededores, la descarga es hacia un cauce natural que se denomina Arroyo Colorado que ya tiene agua propia.

4.1.5. Resumen climatológico de la ciudad de Warnes

Los efectos de la temperatura en los procesos meramente físicos, son mínimos, únicamente provocados por la variación de la densidad del agua residual. En cambio, la influencia de la temperatura en los rendimientos obtenidos en los procesos biológicos es más acusada, por afectar al crecimiento y desarrollo de los microorganismos responsables de la depuración biológica. Influye en gran parte de los parámetros, tales como la edad del fango, la producción de lodos, etc. Se ha comprobado que el efecto puede ser tal que puede llegar a "congelar" el desarrollo microbiano, inhibiendo el proceso de depuración biológica.

La temperatura es un factor determinante en la medición de oxígeno, a mayor temperatura menor es la capacidad del agua para disolver gases. No existe un valor límite de vertido para estos parámetros.

En Warnes, los veranos son largos, cálidos, opresivos y mayormente nublados; los inviernos son cortos, cómodos, húmedos y parcialmente nublados y está mojado durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 16 °C a 31 °C y rara vez baja a menos de 10 °C o sube a más de 35 °C.

En base a la puntuación de turismo, la mejor época del año para visitar Warnes para actividades de tiempo caluroso es desde finales de abril hasta mediados de septiembre

Las temperaturas y el clima caluroso de la ciudad de Warnes en general son favorables para casi todas las tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Las eficiencias de tratamiento por encima de los 15°C según varias experiencias son altas.

Temperatura promedio en Warnes

La temporada calurosa dura 6,3 meses, del 9 de septiembre al 20 de marzo, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 30 °C. El mes más cálido del año en Warnes es enero, con una temperatura máxima promedio de 30 °C y mínima de 22 °C.

La temporada fresca dura 2,4 meses, del 15 de mayo al 26 de julio, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 26 °C. El mes más frío del año en Warnes es julio, con una temperatura mínima promedio de 16 °C y máxima de 26 °C.

Cuadro 4.2. Temperaturas de Warnes

Temperatura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Máxima (°C)	30	30	30	28	26	25	26	28	30	31	31	30
Media (°C)	26	25	25	24	21	20	20	22	24	25	26	26
Mínima (°C)	22	22	22	20	18	17	16	17	19	21	22	22

Fuente: SENAMHI Bolivia

4.2. Recopilación de la información

4.2.1. Certificados de calidad de agua

a) PRIMERA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

Se realizó análisis de pruebas compuestas en la entrada y salida de la actual planta de tratamiento en fechas 22/12/2020 y 17/02/2021:

- 2 pruebas en el afluente (entrada a la PTAR)
- 2 pruebas en el efluente (salida de la PTAR)

Tabla 4.3. Resumen de los resultados de calidad del agua residual Campaña N° 1.

N°	PARÁMETRO	SINBOLO	UNIDAD	WARNES ingreso canal PTAR COSEPW	WARNES ingreso canal PTAR	WARNES salida canal PTAR	WARNES tubería, salida PTAR
				22/12/2020	17/2/2021	22/12/2020	17/2/2021
				10:03	12:00	10:25	11:41
	Análisis Físicos						
3	Temperatura	T	°C				(***)
4	pH	Ph					(***)

5	Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	156	290	104	61
6	Sólidos Totales Disueltos	TDS	mg/l				
7	Sólidos Sedimentables		mg/l				
8	Sólidos Totales		mg/l				
9	Conductividad	CE	uS/cm				
10	Turbiedad		NTU				
	Análisis Químico						
11	Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/l	296	377	47.9	38
12	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	535.9	612.8	239.1	133.7
13	Aceites y Grasas		mg/l	41.6	60.3	2.4	1.4
14	Fósforo total (como P)		mg/l				
15	Amonio (como N)		mg/l	83.75	56.16	20.95	16
16	Nitratos (como N)	NO ₃ -	mg/l				
17	Nitritos (como N)		mg/l				
18	Nitrógeno Total (como N)		mg/l				
19	Sulfuros Total		mg/l	<0.1	1.5	<0.1	<0.01
21	Plomo Total		mg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
22	Antimonio		mg/l	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
23	Arsénico		mg/l	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
24	Cadmio		mg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.005
25	Cloruro libre		mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
26	Cobre		mg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
27	Cromo +3		mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
28	Cromo +6		mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
29	Estaño		mg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.05
30	Fenoles		mg/l	<0.05	0.06	<0.05	<0.05
31	Hierro		mg/l	0.55	1.92	0.14	0.18
32	Mercurio (3) (**)		mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
33	Zinc		mg/l	<0.05	0.2	<0.05	(***)

	Análisis Bacteriológico						
34	Coliformes totales		NMP/100ml	1.10E+08	9.30E+07	1.10E+05	2.40E+05

Fuente: Elaboración propia.

b) SEGUNDA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

Se realizó análisis de pruebas compuestas en varios componentes de la actual planta de tratamiento en fecha 2/08/2021:

- 1 prueba en la entrada a la planta de tratamiento.
- 1 prueba a la salida de laguna facultativa lado derecho.
- 1 prueba en la salida de laguna de Pulimiento I lado derecho.
- 1 prueba en la salida de laguna de Pulimiento II lado derecho.
- 2 pruebas en el curso de agua receptor del agua tratada (antes y después de la confluencia del agua tratada con el agua del arroyo Colorado).

Tabla 4.4. Resumen de los resultados de calidad del agua residual Campaña N° 2.

PARÁMETRO	SIMBOLO	UNIDAD	Ingreso PTAR COSEPW	Salida Laguna Facultativa PTAR COSEPW	Salida Laguna de Pulimiento I PTAR COSEPW	Salida Laguna de Pulimiento II PTAR COSEPW	Arroyo Descarga aguas arriba antes de confluencia	Arroyo Descarga aguas debajo de la confluencia
			YACULAB	YACULAB	YACULAB	YACULAB	YACULAB	YACULAB
			2/8/2021	2/8/2021	2/8/2021	2/8/2021	2/8/2021	2/8/2021
Análisis Físicos								
Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	193	172	437	349	188	136
Análisis Químico								
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/l	249.34	111.15	98.74	98.74	127.6	83.4
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	283.6	171	151.9	151.9	196	128
Amoniaco (como N)		mg/l	14.3	6.25	6	5.5	5.5	1.32
Análisis Bacteriológico								

Coliformes Fecales		NMP/100ml	2.10E+10	2.30E+08	4.30E+06	4.30E+05	4.30E+05	4.30E+04
-----------------------	--	-----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Fuente: Elaboración propia.

c) TERCERA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

Se realizó análisis de pruebas compuestas en todos los componentes de la actual planta de tratamiento en fecha 28/12/2021:

- 1 prueba en la entrada a la planta de tratamiento.
- 1 prueba en la entrada a laguna facultativa lado derecho.
- 1 prueba en la entrada a laguna facultativa lado izquierdo
- 1 prueba en la entrada a laguna de Pulimiento I lado derecho.
- 1 prueba en la entrada a laguna de Pulimiento I lado izquierdo
- 1 prueba en la entrada a laguna de Pulimiento II lado derecho
- 1 prueba en la entrada a laguna de Pulimiento II lado izquierdo
- 1 prueba en la salida de la planta de tratamiento (efluente)
- 2 pruebas en el curso de agua receptor del agua tratada (antes y después de la confluencia del agua tratada con el agua del arroyo Colorado).

Tabla 4.5. Resumen de los resultados de calidad del agua residual – Campaña N° 3.

N°	PARÁMETRO	SIMBOL O	UNIDAD	Ingreso PTAR	Salida Laguna Facult. lado derecho	Salida Laguna Facult. lado izquierdo	Salida Lag. Maduració n I lado derecho	Salida Lag. Maduració n I lado izquierdo	Salida Lag. Maduració n II lado derecho	Salida Lag. Maduració n II lado izquierdo	Salida PTAR	Arroyo Descarga aguas arriba	Arroyo Descarga aguas abajo
				LAB. U.A.G.R. M.	LAB. U.A.G.R. M.	LAB. U.A.G.R. M.	LAB. U.A.G.R.M .	LAB. U.A.G.R.M .	LAB. U.A.G.R.M .	LAB. U.A.G.R.M .	LAB. U.A.G.R. M.		LAB. U.A.G.R. M.
				28/12/202 1	28/12/202 1	28/12/202 1	28/12/202 1	28/12/202 1	28/12/202 1	28/12/202 1	28/12/202 1	28/12/202 1	28/12/202 1
	Análisis Físicos												
3	Temperatura	T	°c	23.4	22.00	22.00	22.10	22.10	25.50	21.00	21.40	21.90	21.8
4	pH	Ph		7.58	8.52	8.12	8.42	8.40	8.87	8.30	8.46	8.00	8.29
5	Sólidos Suspendidos Totales a 105 °C		mg/l	172	84	64.00	50.00	36.00	34.00	16.00	18.00	50.00	22
	Análisis Químico												
1 1	Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅ Total	mg/l	355	99.5	89.3	76.90	50.60	63.30	35.10	48.30	21.10	39.9
1 2	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	526.7	250.7	194	184.00	137.30	164.00	104.00	130.70	59.30	120.7
1 3	Aceites y Grasas		mg/l	71.8	4.9	6.4	4.90	2.90	2.30	1.10	3.70	1.00	2.7

1 4	Fósforo total (como P)	P	mg/l	6.48	3.83	4.75	3.52	3.24	3.10	3.37	3.08	0.76	3.02
1 5	Amoniaco (como N)		mg/l										
1 6	Nitratos (como N)	NO3-	mg/l										
1 7	Nitritos (como N)		mg/l										
1 8	Nitrógeno Total (como N)	N	mg/l	94.4	46.3	52.9	41.50	43.90	36.60	43.40	39.40	13.00	40.1
1 9	Compuestos fenólicos		mg/l										
2 0	Sulfuros (S ⁻²)		mg/l										
2 1	Arsénico Total		ug/l										
2 2	Plomo Total		ug/l										
2 3	Antimonio		mg/l										
2 4	Arsénico		mg/l										
	Análisis Bacteriológico												
2 3	Coliformes totales		NMP/100m l										
2 4	Coliformes Fecales		NMP/100m l	2.40E+0 7	1.10E+0 6	2.40E+0 6	4.60E+05	4.60E+05	4.60E+04	3.21E+04	4.30E+0 4	1.10E+0 6	1.50E+0 4

Fuente: Elaboración propia.

d) CUARTA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

Se realizó análisis de pruebas compuestas en todos los componentes de la actual planta de tratamiento en fecha 23/06/2022:

- 1 prueba en la entrada a la planta de tratamiento.
- 1 prueba en la salida de la planta de tratamiento (efluente)
- 4 pruebas en el curso de agua receptor del agua tratada (antes y después de la confluencia del agua tratada con el agua del arroyo Colorado).

Tabla 4.6. Resumen de los resultados de calidad del agua residual Campaña N° 4.

N°	PARÁMETRO	SINBOL O	UNIDAD	Ingreso PTAR	Salida PTAR	Arroyo aguas abajo fabricas	Arroyo aguas arriba intersección	Arroyo aguas abajo intersección	Arroyo aguas abajo lagunas artificiales
				LAB. U.A.G.R. M.	LAB. U.A.G.R. M.	LAB. U.A.G.R. M.	LAB. U.A.G.R. M.	LAB. U.A.G.R. M.	LAB. U.A.G.R. M.
				23/6/2022	23/6/2022	24/6/2022	24/6/2022	24/6/2022	24/6/2022
	Análisis Físicos								
3	Temperatura	T	°C	24.90	22.80	21.00	21.00	21.00	21
4	pH	Ph		7.60	8.09	7.98	7.12	8.14	8.09
5	Sólidos Suspendidos Totales a 105 °C		mg/l	320.00	100.00	45.00	39.00	91.00	67
	Análisis Químico								
6	Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅ Total	mg/l	451.00	109.20	25.00	121.00	114.00	45.8
7	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	729.70	251.20	90.30	230.70	264.00	157.3
8	Aceites y Grasas		mg/l	175.10	6.90	3.40	5.10	6.60	5.2
9	Fósforo total (como P)	P	mg/l	9.25	7.87	0.61	1.68	3.90	4.5
10	Amoniaco (como N)		mg/l						
11	Nitratos (como N)	NO ₃ -	mg/l						
12	Nitritos (como N)		mg/l						
13	Nitrógeno Total (como N)	N	mg/l	139.50	93.30	7.80	15.70	46.10	51.7
14	Compuestos fenólicos		mg/l						
15	Sulfuros (S ⁻²)		mg/l						

1 6	Arsénico Total		ug/l						
1 7	Plomo Total		ug/l						
1 8	Antimonio		mg/l						
1 9	Arsénico		mg/l						
	Análisis Bacteriológico								
2 1	Coliformes totales		NMP/100ml						
2 2	Coliformes Fecales		NMP/100ml	2.40E+07	2.99E+05	4.60E+04	1.10E+05	9.30E+04	3.90E+04

Fuente: Elaboración propia.

e) QUINTA CAMPAÑA DE MEDICION

Se realizó análisis de pruebas compuestas en todos los componentes de la actual planta de tratamiento en fecha 04/08/2022:

- 1 prueba en la entrada a la planta de tratamiento.
- 1 prueba en la salida de la planta de tratamiento (efluente)
- 4 pruebas en el curso de agua receptor del agua tratada (antes y después de la confluencia del agua tratada con el agua del arroyo Colorado).

Tabla 4.7. Resumen de los resultados de calidad del agua residual Campaña N° 5.

N°	PARÁMETRO	SIMB.	UNI	Emisario Ingreso PTAR	Salida PTAR	Arroyo Colorado	Arroyo Colorado
				LAB. QUEBRACHO.	LAB. QUEBRACHO.	Aguas arriba de la descarga	Aguas abajo de la descarga
				04/08/2022	04/08/2022	04/08/2022	04/08/2022
	Análisis Organolépticos						
1	Aspecto						
2	Olor						
	Análisis Físicos						
3	Temperatura	T	°C		25.00	24.30	23.90
4	pH	Ph		7.13	7.94	7.97	7.88
5	Sólidos Suspendidos Totales a 105 °C		mg/l	300.00	222.00	120.00	102.00
	Análisis Químico						
6	Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅ Total	mg/l	382.00	73.00	58.00	55.00

7	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	1530.00	294.00	234.00	220.00
8	Aceites y Grasas		mg/l	44.10	< 0.1	< 0.1	< 0.1
9	Fósforo total (como P)	P	mg/l				
10	Amoníaco (como N)		mg/l	47.20	29.60	5.27	16.20
11	Nitratos (como N)	NO ₃ -	mg/l				
12	Nitritos (como N)		mg/l				
13	Nitrógeno Total (como N)	N	mg/l				
14	Sulfuros (S ⁻²)		mg/l	3.86	0.225	0.090	0.163
15	Arsénico Total		ug/l				
16	Plomo Total		ug/l		< 0.3	< 0.3	< 0.3
17	Antimonio		mg/l				
18	Arsénico		mg/l		< 0.005	< 0.005	< 0.005
19	Cobre		mg/l		< 0.04	< 0.04	< 0.04
20	Zinc		mg/l		< 0.01	0.07	< 0.01
21	Cadmio		mg/l		< 0.005	< 0.005	< 0.005
22	Cromo, Cr+3		mg/l		< 0.01	< 0.01	< 0.01
23	Cromo, Cr+6		mg/l		< 0.01	< 0.01	< 0.01
24	Mercurio		mg/l		< 0.001	< 0.001	< 0.001
25	Hierro Total		mg/l		0.43	0.88	0.62
26	Antimonio		mg/l		< 0.3	< 0.3	< 0.3
27	Estaño		mg/l		< 0.5	< 0.5	< 0.5
28	Cloruro libre		mg/l		< 0.002	0.01	< 0.002
29	Fenoles		mg/l		0.01	0.01	0.01
	Análisis Bacteriológico						
30	Coliformes totales		UFC/100ml				
31	Coliformes Fecales		UFC/100ml	DNPSC	DNPSC	DNPSC	DNPSC
32	Escherichia Coli		UFC/100ml				
33	Heterotrofos		UFC/100ml				

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Aforo de caudales

Tabla 4.8. Resumen de caudales aforados en la entrada a la PTAR Warnes.

N°	Fecha	Hora	Caudal L/s
1	lunes, 19 de noviembre de 2018	10:00	29.94
2	lunes, 19 de noviembre de 2018	11:00	27.17
3	lunes, 19 de noviembre de 2018	12:00	27.59
4	lunes, 19 de noviembre de 2018	13:00	24.9

5	lunes, 19 de noviembre de 2018	14:00	26.64
6	lunes, 19 de noviembre de 2018	15:00	27.24
7	lunes, 19 de noviembre de 2018	16:00	29.81
8	lunes, 19 de noviembre de 2018	17:00	26.20
9	lunes, 19 de noviembre de 2018	18:00	27.06
10	lunes, 19 de noviembre de 2018	19:00	24.81
11	viernes, 30 de julio de 2021	13:00	31.63
12	viernes, 30 de julio de 2021	17:00	26.57
13	miércoles, 20 de octubre de 2021	9:22	26.09
14	miércoles, 20 de octubre de 2021	13:50	36.31
15	miércoles, 20 de octubre de 2021	18:20	33.66
16	jueves, 21 de octubre de 2021	8:15	26.00
17	jueves, 21 de octubre de 2021	13:54	33.1
18	jueves, 21 de octubre de 2021	18:20	39.8
19	viernes, 22 de octubre de 2021	8:25	25.83
20	viernes, 22 de octubre de 2021	13:54	32.09
21	viernes, 22 de octubre de 2021	18:37	32.42
Promedio			29.28

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis del caudal

Los caudales de entrada a la planta de tratamiento son variables, de los aforos realizados en la gestión 2021 se tiene que estos están alrededor de 29.28 L/s.

La planta de tratamiento Warnes fue diseñada en el año 1995, para un periodo de diseño de 20 años que se cumplió el año 2015. A partir de esa fecha controlaron el ingreso del caudal de manera que la planta no trabaje sobrecargada. Las nuevas conexiones de alcantarillado sanitario ya no descargan a esta planta de tratamiento.

A continuación, se realizará el cálculo del caudal medio con la población actual servida de 13,764 habitantes, que de acuerdo a la cooperativa COSEPWA corresponde a la población de diseño del proyecto original.

Para la situación actual con población de 13,764 habitantes que descarga sus aguas residuales a la planta de tratamiento se calculó el caudal correspondiente siguiendo lineamientos de la norma boliviana NB688.

Tabla 4.9. Cálculo del caudal medio (Situación actual)

Población =	13,764	hab
Aporte agua potable =	220.00	L/hab-día

Coefic. Retorno =	0.80			
Aporte aguas residuales	176.00	L/hab-día		
Caudal medio =	28.04	L/s	2,422.5	m3/día 100.94 m3/hr
M =	2.38			
Caudal máximo =	66.73	L/s	5,765.46	m3/día 240.23 m3/hr
Caudal mínimo =	11.78	L/s	1,017.84	m3/día 42.41 m3/hr
Caudal infiltración=	10.93	L/s		
Caudal conexiones herr=	32.64	L/s		
Caudal de instituciones	2.91	Lt/seg		
Caudal medio + Caudal de instituciones =	30.95	Lt/seg	2,673.9	m3/día 111.41 m3/hr
Caudal max + infiltr. + conex.herr + instit =	113.21	L/s	9,781.34	m3/día 407.56 m3/hr

Fuente: Elaboración propia

El caudal medio de 28.04 l/s que está calculado a partir de la población, y a partir de una dotación la cual esta calibrada de manera que este caudal medio sea similar con el caudal promedio de los aforos de 29.28 l/s que actualmente se tiene, por lo tanto, este valor de dotación o aporte de agua potable que se ha empleado es el que más se acerca al valor real para proporcionar un valor de caudal medio que se asemeja al promedio de los aforados.

Tabla 4.10. Producción mensual de agua potable “año 2021”

Vol. en m³	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Producción (m³)	180,475	166,750	186,817	173,532	177,522	161,101	168,293	178,506	179,745	181,095	174,799	181,342
Total de conexiones	6412.00	6436.00	6451.00	6465.00	6502.00	6536.00	6570.00	6594.00	6628.00	6447.00	6711.00	6734.00
m³/conex/mes	28.15	25.91	28.96	26.84	27.30	24.65	25.62	27.07	27.12	28.09	26.05	26.93
m³/conex/día	0.94	0.86	0.97	0.89	0.91	0.82	0.85	0.90	0.90	0.94	0.87	0.90
m³/hab/día	0.19	0.17	0.19	0.18	0.18	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.17	0.18
L/hab/día	187.64	172.73	193.06	178.95	182.02	164.32	170.77	180.47	180.79	187.27	173.64	179.53

Fuente: Elaboración propia

Dotación calculada con producción total de agua dividido entre cada habitante:

193.1 L/hab/día

Por recomendación de la COSEPW se trabajó con: 220 L/hab/día

Por otro lado, la dotación de 220 L/hab/día, es un valor muy coherente si analizamos la tabla de dotación media diaria de la NB689 para el tamaño de población y zona geográfica.

Tabla 4.11. Dotación media (L/hab/día)

Zona	Población (hab)					
	hasta 500	De 501 a 2,000	De 2,001 a 5,000	De 5,001 a 20,000	de 20,001 a 100,000	Mas a 100,000
Del Altiplano	30 a 50	30 a 70	50 a 80	80 a 100	100 a 150	150 a 200
De los Valles	50 a 70	50 a 90	70 a 100	100 a 140	150 a 200	200 a 250
De los Llanos	70a 90	70 a 110	90 a 120	120 a 180	200 a 250	250 a 350

Fuente: Norma Boliviana NB689

Para verificar si la PTAR trabajando a su máxima capacidad se calculó el caudal que esta planta puede tratar a partir de la carga superficial máxima que una laguna facultativa puede tratar:

Cálculo del caudal medio a partir de la carga superficial

Carga superficial máxima recomendable en Laguna Facultativa

En función de la temperatura.

$$T_{min} = \boxed{15.1}^{\circ}\text{C} \quad \text{Estación: Aerop. Viru.}$$

Según varios autores:

Método 1

$$\lambda_s = 250 * (1,085)^{T-20}$$

Yaenz

$$\lambda_s = \boxed{167.62} \text{ kg DBO/ha día}$$

Método 2

$$C_s = 60,26 * (1,099)^T$$

McGarry y Pescod

$$C_s = \boxed{251} \text{ kg DBO/ha día}$$

Método 3

$$C_s = 40,35 * (1,099)^T$$

Método 4

$$C_{smax} = 20T - 20$$

Mara, 1976

$$Cs = \boxed{167.85} \text{ kg DBO/ha día}$$

McGarry y Pescod

$$Cs = \boxed{282} \text{ kg DBO/ha día}$$

Método 5

De acuerdo con Mara (1997), la máxima carga superficial (kgDBO5/hsb/d) con la que pueden trabajar las lagunas facultativas, en función de la temperatura del aire con la que operan, viene dada por la expresión:

$$\lambda_s = 350 * (1,107 - 0,002T)^{T-25}$$

Donde:

T = temperatura del aire (°C). Se toma la temperatura media del aire en el mes más frío

$$Cs = \quad 168.24 \quad \text{kg DBO/ha día}$$

Adoptamos la Carga Superficial de:

$Cs = \quad 251 \quad \text{kg DBO/ha día}$	Por condiciones favorables de clima.
---	--------------------------------------

Asumimos que probablemente este valor recomendado se usó para diseño de laguna facultativa.

Caudal para no superar la carga superficial máxima:

Para la verificación del caudal que corresponde a esta carga máxima recomendable aplicamos la formula general de carga superficial.

$$Cs = \frac{Si * Q}{A}$$

A =	10859.41	m ²	1.086	ha	Área de una laguna facultativa
Si =	210	mg DBO/L	0.000210413	kg DBO/L	DBO en el afluente (valor medio)

$$Q = 1293682 \text{ L/día}$$

$$Q = 14.97 \text{ L/s} \quad \text{Por laguna}$$

Para que la laguna facultativa funcione con buenas eficiencias el caudal no debería superar el caudal calculado.

Como son 2 lagunas facultativas en paralelo, el caudal de diseño recomendable será:

Q	29.95	L/s
---	-------	-----

El resultado de este cálculo da un caudal de 29.95 L/s. De acuerdo a estos datos la planta de tratamiento de Warnes probablemente está trabajando a su máxima capacidad de tratamiento con un caudal de 29.28 L/s (caudal medio de los aforos). Este caudal y esta situación de funcionamiento se emplearán para determinar los parámetros de operación y eficiencias en las lagunas de oxidación.

4.4. Diagnóstico del cuerpo receptor respecto al cumplimiento con Anexo A-1, del RMCH de la ley 1333 para clase D

La clasificación del cuerpo receptor Arroyo Colorado, otorgada en noviembre de 2018, tiene una clasificación clase D.

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

Primera campaña de medición

En la primera campaña no se analizó la calidad del agua en el cuerpo receptor.

Segunda campaña de medición

Tabla 4.12. Resultados de calidad del agua residual Campaña N° 2

PARÁMETRO	SIMB.	UNIDAD	Salida Laguna de Pulimiento II PTAR COSEPW	Arroyo Descarga aguas arriba antes de confluencia	Arroyo Descarga aguas debajo de la confluencia	Límites permisibles LEY 1333 ANEXO A-1 Clase D
			YACULAB	YACULAB	YACULAB	
			2/8/2021	2/8/2021	2/8/2021	

Análisis Físicos						
Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	349	188	136	
Análisis Químico						
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/l	98.74	127.6	83.4	< 30
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	151.9	196	128	< 60
Amoniaco (como N)		mg/l	5.5	5.5	1.32	4.00
Análisis Bacteriológico						
Coliformes Fecales		NMP/100 ml	4.30E+05	4.30E+05	4.30E+04	< 50000

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros DBO₅ y DQO en el cuerpo receptor, antes y después de la descarga de la planta de tratamiento no cumple con los límites permisibles en el Anexo A-1. El amoníaco antes de la confluencia no cumple, pero después de la confluencia con la descarga sí cumple. Los coliformes fecales están dentro de lo permisible para un cauce de Categoría D.

Tercera campaña de medición

Tabla 4.13. Resultados de calidad del agua residual – Campaña N° 3

N°	PARÁMETRO	SIMB.	UNIDAD	Salida PTAR	Arroyo Descarga aguas arriba	Arroyo Descarga aguas abajo	Límites permisibles LEY 1333 ANEXO A-1 Clase D
				LAB. U.A.G.R.M.	LAB. U.A.G.R.M.	LAB. U.A.G.R.M.	
				28/12/2021	28/12/2021	28/12/2021	
	Análisis Físicos						
3	Temperatura	T	°C	21.40	21.90	21.8	+/-3 °C receptor
4	pH	Ph		8.46	8.00	8.29	6 a 9
5	Sólidos Suspendidos Totales a 105 °C		mg/l	18.00	50.00	22	
	Análisis Químico						
11	Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅ Total	mg/l	48.30	21.10	39.9	< 30
12	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	130.70	59.30	120.7	< 60
13	Aceites y Grasas		mg/l	3.70	1.00	2.7	1

14	Fósforo total (como P)	P	mg/l	3.08	0.76	3.02	1
18	Nitrógeno Total (como N)	N	mg/l	39.40	13.00	40.1	12
	Análisis Bacteriológico						
23	Coliformes totales		NMP/100ml				
24	Coliformes Fecales		NMP/100ml	4.30E+04	1.10E+06	1.50E+04	< 50000

Fuente: Elaboración propia

En los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Aceites – Grasas y Fósforo total el cuerpo receptor antes de mezclarse con el efluente de la PTAR cumple con Anexo A-1, pero al mezclarse sus valores aumentan y ya no cumple.

El Nitrógeno total sobrepasa el límite permisible tanto en el efluente de la PTAR como en el cauce receptor. Los coliformes fecales cumplen con los límites permisibles.

Cuarta campaña de medición

Tabla 4.14. Resultados de calidad del agua residual Campaña N° 4

N°	PARÁMETRO	SINB.	UNIDAD	Salida PTAR	Arroyo aguas arriba intersección	Arroyo aguas abajo intersección	Arroyo aguas abajo lagunas artificiales	Límites permisibles LEY 1333 ANEXO A-1 Clase D
				LAB. U.A.G.R.M.	LAB. U.A.G.R.M.	LAB. U.A.G.R.M.	LAB. U.A.G.R.M.	
				23/6/2022	24/6/2022	24/6/2022	24/6/2022	
	Análisis Físicos							
3	Temperatura	T	°C	22.80	21.00	21.00	21	
4	pH	Ph		8.09	7.12	8.14	8.09	6 a 9
5	Sólidos Suspendidos Totales a 105 °C		mg/l	100.00	39.00	91.00	67	
	Análisis Químico							
6	Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅ Total	mg/l	109.20	121.00	114.00	45.8	< 30
7	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	251.20	230.70	264.00	157.3	< 60
8	Aceites y Grasas		mg/l	6.90	5.10	6.60	5.2	1
9	Fósforo total (como P)	P	mg/l	7.87	1.68	3.90	4.5	1
13	Nitrógeno Total (como N)	N	mg/l	93.30	15.70	46.10	51.7	12

22	Análisis Bacteriológico Coliformes Fecales		NMP/100ml	2.99E+05	1.10E+05	9.30E+04	3.90E+04	< 50000
----	--	--	-----------	----------	----------	----------	----------	---------

Fuente: Elaboración propia.

En el efluente de la PTAR y en el cauce receptor tanto aguas arriba y aguas debajo de la mezcla los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, aceites y grasas, fósforo total y nitrógeno total sobrepasan los límites permisibles del ANEXO A-1 para Clase D. Los coliformes fecales no sobrepasan estos límites.

Quinta campaña de medición

Tabla 4.15. Resultados de calidad del agua residual Campaña N° 5

N°	PARÁMETRO	SIMB.	UNID.	Salida PTAR	Arroyo Colorado Aguas arriba de la descarga	Límites permisibles CLASE D
				04/08/2022	04/08/2022	A-1 RMCH
3	Temperatura	T	°c	25.00	24.30	,+/-3 °C receptor
4	pH	Ph		7.94	7.97	6 a 9
5	Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	222.00	120.00	
1	Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/l	73.00	58.00	< 30
2	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	294.00	234.00	< 60
3	Aceites y Grasas		mg/l	< 0.1	< 0.1	1
4	Amoníaco (como N)		mg/l	29.60	5.27	4
5	Sulfuros (S ⁻²)		mg/l	0.225	0.090	1
6	Plomo Total		ug/l	< 0.3	< 0.3	0.1 c. Pb.
7	Arsénico		mg/l	< 0.005	< 0.005	0.1 c. As.
8	Cobre		mg/l	< 0.04	< 0.04	1 c. Cu.
9	Zinc		mg/l	< 0.01	0.07	5 c. Zn.
10	Cadmio		mg/l	< 0.005	< 0.005	0.005
11	Cromo, Cr+3		mg/l	< 0.01	< 0.01	1.15 c.Cr+3
12	Cromo, Cr+6		mg/l	< 0.01	< 0.01	0.05 c.Cr+6
13	Mercurio		mg/l	< 0.001	< 0.001	0.001
14	Hierro Total		mg/l	0.43	0.88	1 c. Fe.
15	Antimonio		mg/l	< 0.3	< 0.3	0.01 c. Sb
16	Estaño		mg/l	< 0.5	< 0.5	2 c. Sn

17	Cloruro libre		mg/l	< 0.002	0.01	500 c. Cl
18	Fenoles		mg/l	0.01	0.01	10 c. C₆H₅OH
31	Coliformes Fecales		UFC/100ml	DNPSC	DNPSC	< 50000

DNPSC = Demasiado numerosas para ser contados.

Fuente: Elaboración propia.

En el efluente de la PTAR y en el cauce receptor tanto aguas arriba de la mezcla los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, aceites y grasas, fósforo total y nitrógeno total sobrepasan los límites permisibles del ANEXO A-1 para Clase D. Los coliformes fecales si sobrepasan estos límites teniendo valores demasiados numerosos para ser contados.

4.5. Diagnóstico de la situación actual de tratamiento respecto al cumplimiento con el Anexo – 1 del RMCH de la ley 1333

Antes La clasificación del cuerpo receptor Arroyo Colorado, desde el año 2018 es de clase D.

4.5.1. Análisis de la 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.

Cuadro 4.16. Biodegradabilidad del agua residual

DBO₅/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 Warnes se analizó la relación:

Tabla 4.17. Relación DBO₅/DQO

Fecha	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	DBO ₅ /DQO
22/12/2020	296	536	0.55
17/2/2021	377	613	0.62
2/8/2021	249	284	0.88
28/12/2021	355	526	0.67
23/6/2022	451	730	0.62
4/8/2022	382	1530	0.25
Valor promedio	352	703	0.50

Fuente: Elaboración propia

La relación DBO₅/DQO con valores de ingreso a la PTAR de Warnes nos indica que predominan las aguas residuales muy biodegradables, se verifica que son aguas residuales domésticas. Una muestra tiene un valor de 0.25 que esta entre 0.2 y 0,4 lo que indica que tiene una biodegradabilidad media.

El promedio de todas las mediciones da como resultado un valor de DBO₅/DQO igual 0.5, al ser mayor a 0.4 se pueden tratar por medios biológicos. Se verifica que la planta de tratamiento de Warnes está tratando aguas residuales domesticas con alta y media biodegradabilidad.

El empleo de la tecnología de lagunas facultativas seguidas de lagunas de maduración en la situación actual es pertinente.

4.5.2. Análisis de DBO₅ en la salida de la PTAR

Tabla 4.18. DBO₅ en salida de PTAR

FECHA	DBO ₅ mg/L	CLASE "D" CUADRO N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	47.90	<30
17/02/2021	38.00	
02/08/2021	98.74	
28/12/2021	48.30	
23/06/2022	109.20	

04/08/2022	73.00	
Valor promedio	69.19	<30

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida en DBO₅ de las 6 muestras realizadas, están por encima de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (< 30 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, teniendo un valor promedio de 69.19 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes no cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la Segunda campaña de medición el cuerpo receptor denominado Arroyo Colorado tiene 127.6 mg/L de DBO₅ antes de recibir aguas de la planta de tratamiento y después de la descarga es de 83.4 mg/L. Este valor está por encima del límite permisible (< 30 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, no cumple con la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la tercera campaña el cuerpo receptor Arroyo Colorado tiene 21.1 mg/L de DBO₅ antes de recibir aguas de la planta de tratamiento y después de la descarga es de 39.9 mg/L. Este valor está por encima del límite permisible (< 30 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, no cumple con la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la cuarta campaña el cuerpo receptor tiene 121 mg/L de DBO₅ antes de recibir aguas de la planta de tratamiento y después de la descarga es de 45.8 mg/L. Este valor está por encima del límite permisible (< 30 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, no cumple con la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la quinta campaña el cuerpo receptor tiene 58 mg/L de DBO₅ antes de recibir aguas de la planta de tratamiento y después de la descarga es de 55 mg/L. Este valor está por encima del límite permisible (< 30 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, no cumple con la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.3. Análisis de DQO en la salida de la PTAR

Tabla 4.19. DQO en salida de PTAR

Fecha	DQO mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	239.10	<60
17/2/2021	133.70	
2/8/2021	151.90	
28/12/2021	130.70	
23/6/2022	251.20	
4/8/2022	294.00	
Valor promedio	200.10	<60

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida en DQO de las 6 muestras realizadas, están muy por encima de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (< 60 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes no cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la Segunda campaña de medición el cuerpo receptor denominado Arroyo Colorado tiene 196 mg/L de DQO antes de recibir aguas de la planta de tratamiento y después de la descarga es de 128 mg/L. Este valor está por encima del límite permisible (< 60 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, no cumple con la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la tercera campaña el cuerpo receptor Arroyo Colorado tiene 59.30 mg/L de DQO antes de recibir aguas de la planta de tratamiento y después de la descarga es de 120.7 mg/L. Este valor está por encima del límite permisible (< 60 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, no cumple con la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la cuarta campaña el cuerpo receptor tiene 230.6 mg/L de DQO antes de recibir aguas de la planta de tratamiento y después de la descarga es de 264 mg/L. Este valor está muy por encima del límite permisible (< 60 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, no cumple con la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la quinta campaña el cuerpo receptor tiene 234 mg/L de DQO antes de recibir aguas de la planta de tratamiento y después de la descarga es de 220 mg/L. Este valor está muy por encima del límite permisible (< 250 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, no cumple con la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-2 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.4. Análisis de SST en la salida de la PTAR

Tabla 4.20. SST en salida de PTAR

Fecha	SST mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	104.00	
17/2/2021	61.00	
2/8/2021	349.00	
28/12/2021	18.00	
23/6/2022	100.00	
4/8/2022	222.00	
Valor promedio	142.33	

Fuente: Elaboración propia.

La Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica no da valores límites para los sólidos en suspensión totales.

Pero si analizamos los valores de este parámetro podemos observar que los mismos demuestran un alto contenido en sólidos en suspensión totales, esto puede deberse sobre todo a la aparición de algas acuáticas en las lagunas, lo cuales en cierta medida son parte del proceso de purificación. Para reducir estos valores en la bibliografía se recomienda colocar al final de las lagunas una operación de filtración mediante arena, con lo cual reducirá bastante los sólidos suspendidos totales.

4.5.5. 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"

Tabla 4.21. pH en salida de PTAR

FECHA	pH	CLASE "D" CUADRO N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020		de 6 a 9

17/02/2021		
02/08/2021		
28/12/2021	8.46	
23/06/2022	9.09	
04/08/2022	7.94	
Valor promedio	8.50	de 6 a 9

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida en pH de las muestras realizadas, están dentro del rango permisible para valores máximos admisibles del anexo A-1 (≥ 6.00 y ≤ 9.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, teniendo un valor promedio de 8.5, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

Todos los pH son mayores a 7, por lo tanto, el agua residual en la salida de la PTAR es alcalina

El agua con pH alto (alta alcalinidad) puede causar formación de sarro, manchas de metal, agua turbia, mala eficiencia del cloro y también puede causar irritación de la piel y los ojos. Si el agua va a estar en contacto con seres vivos se recomienda mantenerse dentro del rango 7.4 - 7.6 para evitar esos problemas.

4.5.6. Análisis de aceites y grasas en la salida de la PTAR

Tabla 4.22. Aceites y grasas en salida de PTAR

Fecha	Aceites y grasas mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	2.40	1.00
17/2/2021	1.40	
2/8/2021		
28/12/2021	3.70	
23/6/2022	6.90	
4/8/2022	0.10	
Valor promedio	2.90	1.00

Fuente: Elaboración propia

De las 5 muestras 4 valores de salida en contenido de aceites y grasas están muy por encima de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (<1.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores y solo una muestra presenta un valor por debajo del límite permisible en

el mes de agosto, teniendo un valor promedio de 2.90 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes no cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.7. Análisis de fósforo total en la salida de la PTAR

Tabla 4.23. Fósforo total en salida de PTAR

Fecha	Fósforo total mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020		1.00
17/2/2021		
2/8/2021		
28/12/2021	3.08	
23/6/2022	7.87	
4/8/2022		
Valor promedio	5.48	1.00

Fuente: Elaboración propia

Los valores de salida de la PTAR de fósforo en las 2 muestras que se tomó están por encima de 1 mg/L, por lo tanto, no estaría cumpliendo con el Anexo a-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Pero en el trayecto que recorre el arroyo Colorado y confluye con el Río Chane es de esperarse que este valor reduzca.

Se requiere otros procesos adicionales para reducir el fósforo en el agua residual, que de ser necesario debe incluirse en la planta de tratamiento.

4.5.8. Análisis de amonio en la salida de la PTAR

Tabla 4.24. Amonio en salida de PTAR

Fecha	Amonio total mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	20.95	4.00
17/2/2021	16.00	
2/8/2021	5.50	
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	29.60	
Valor promedio	18.01	4.00

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida en amonio de las 4 muestras realizadas, están muy por encima de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (4.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes no cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.9. Análisis de Nitrógeno Total en la salida de la PTAR

Tabla 4.25. Nitrógeno total en salida PTAR

Fecha	Nitrógeno total mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020		12.00
17/2/2021		
2/8/2021		
28/12/2021	39.40	
23/6/2022	93.30	
4/8/2022		
Valor promedio	66.35	12.00

Fuente: Elaboración propia,

Los valores de salida de la PTAR de nitrógeno total están por encima de 12 mg/L, por lo tanto, no estaría cumpliendo con el Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Pero en el trayecto que recorre el arroyo Colorado hasta la confluencia con el Río Chane es de esperarse que este valor reduzca.

Se requiere otros procesos para reducir el nitrógeno en el agua residual, que de ser necesario debe incluirse en la planta de tratamiento.

En el cuerpo receptor Arroyo Colorado el nitrógeno total antes de recibir aguas de la planta de tratamiento y después de mezclarse tampoco tiene valores menores al de la salida de la PTAR, pero aun supera los 12 mg/L.

4.5.10. Análisis de Sulfuro Total en la salida de la PTAR

Tabla 4.26. Sulfuro total en salida de PTAR

Fecha	Sulfuro total mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.1	1.00
17/2/2021	<0.01	
2/8/2021		

28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	0.225	
Valor promedio	0.23	1.00

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida en sulfuro de las diferentes muestras realizadas, están por debajo de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (1.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, teniendo un valor promedio de 0.23 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.11. Análisis de Plomo Total en la salida de la PTAR

Tabla 4.27. Plomo total en salida de PTAR

Fecha	Plomo total mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	< 0.05	0.10
17/2/2021	< 0.05	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.3	
Valor promedio	< 0.3	0.10

Fuente: Elaboración propia

Dos de los valores de salida de plomo total, de las muestras realizadas, están por debajo de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (0.10 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, y solo una muestra presenta valores por encima al límite permisible, pero el valor promedio que se tiene es de < 0.3 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes no cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.12. Análisis de Antimonio en la salida de la PTAR

Tabla 4.28. Antimonio en salida de PTAR

Fecha	Antimonio mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.002	0.01

17/2/2021	<0.002	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.3	
Valor promedio	<0.002	0.01

Fuente: Elaboración propia.

Dos de los valores de salida de antimonio, de las muestras realizadas, están por debajo de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (0.01 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, y solo una muestra presenta valores por encima al límite permisible en el mes de agosto, pero el valor promedio que se tiene es de < 0.002 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.13. Análisis de Arsénico o en la salida de la PTAR

Tabla 4.29. Arsénico en salida de PTAR

Fecha	Arsénico mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.002	0.10
17/2/2021	<0.002	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.005	
Valor promedio	<0.002	0.10

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida de arsénico, de las diferentes muestras realizadas, están por debajo de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (0.1 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, el valor promedio que se tiene es de < 0.002 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.14. Análisis del cadmio en la salida de la PTAR

Tabla 4.30. Cadmio en salida de PTAR

Fecha	Cadmio	
-------	--------	--

	mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.05	0.005
17/2/2021	<0.005	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.005	
Valor promedio	< 0.005	0.005

Fuente: Elaboración propia

Dos de los valores de salida de cadmio, de las tres muestras realizadas, están dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (0.005 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, y solo una muestra presenta valores por encima al límite permisible en el mes de diciembre, pero el valor promedio que se tiene es de < 0.005 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Esto indica que no hay presencia de descargas industriales de consideración.

4.5.15. Análisis del cloruro libre en la salida de la PTAR

Tabla 4.31. Cloruro libre en salida de PTAR

Fecha	Cloruro libre mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.01	
17/2/2021	<0.01	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.002	
Valor promedio	<0.01	

Fuente: Elaboración propia

La Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica no da valores límites para los sólidos en cloruro.

4.5.16. Análisis del cobre en la salida de la PTAR

Tabla 4.32. Cobre en salida de PTAR

Fecha	Cobre	
-------	-------	--

	mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.05	1.0
17/2/2021	<0.05	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.04	
Valor promedio	< 0.04	1.0

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida de cobre, de las diferentes muestras realizadas, están dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (1.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.17. Análisis del Cromo +3 en la salida de la PTAR

Tabla 4.33. Cromo +3 en salida de PTAR

Fecha	Cromo +3 mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.05	
17/2/2021	<0.05	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.01	
Valor promedio	< 0.01	

Fuente: Elaboración propia

La Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica no da valores límites para los sólidos en cromo +3.

4.5.18. Análisis del Cromo +6 en la salida de la PTAR

Tabla 4.34. Cromo +6 en salida PTAR

Fecha	Cromo +6 mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.01	
17/2/2021	<0.01	
2/8/2021		

28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.01	
Valor promedio	< 0.01	

Fuente: Elaboración propia

La Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica no da valores límites para los sólidos en cromo +6.

4.5.19. Análisis del Estaño en la salida de la PTAR

Tabla 4.35. Estaño en salida de PTAR

Fecha	Estaño mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.5	2.0
17/2/2021	<0.05	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022		
Valor promedio	<0.05	2

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida de estaño, de las diferentes muestras realizadas, están dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (2.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, teniendo un valor promedio de < 0.05 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Esto indica que no hay presencia de descargas industriales de consideración.

4.5.20. Análisis de Fenoles en la salida de la PTAR

Tabla 4.36. Fenoles en salida de PTAR

Fecha	Fenoles mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.05	1.00
17/2/2021	<0.05	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	0.01	

Valor promedio	0.01	1.00
----------------	------	------

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida de fenoles, de las diferentes muestras realizadas, están dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (1.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, teniendo un valor promedio de 0.01 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.21. Análisis del Hierro en la salida de la PTAR

Tabla 4.37. Hierro en salida de PTAR

Fecha	Hierro mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	0.14	1.0
17/2/2021	0.18	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	0.43	
Valor promedio	0.25	1.0

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida de hierro, de las diferentes muestras realizadas, están dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (1.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, teniendo un valor promedio de < 0.25 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.22. Análisis del Mercurio en la salida de la PTAR

Tabla 4.38. Mercurio (3) en salida de PTAR

Fecha	Mercurio mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.001	0.001
17/2/2021	<0.001	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.001	

Valor promedio	< 0.001	0.001
----------------	---------	-------

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida de mercurio (3), de las diferentes muestras realizadas, están dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (0.001mg/L) para descargas en cuerpos receptores, teniendo un valor promedio de < 0.001 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.23. Análisis de Zinc en la salida de la PTAR

Tabla 4.39. Zinc en salida de PTAR

Fecha	Zinc mg/L	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	<0.05	5.0
17/2/2021	(***)	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		
4/8/2022	< 0.01	
Valor promedio	< 0.01	5.0

Fuente: Elaboración propia

Todos los valores de salida de zinc, de las diferentes muestras realizadas, están dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (5.0 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, teniendo un valor promedio de < 0.01 mg/L, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.5.24. Análisis de Coliformes fecales y totales en la salida de la PTAR

Tabla 4.40. Coliformes totales en salida de PTAR

Fecha	Coliformes totales NMP/100ml	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020	1.10E+05	
17/2/2021	2.40E+05	
2/8/2021		
28/12/2021		
23/6/2022		

4/8/2022		
Valor promedio	1.75E+05	

Fuente: Elaboración propia.

La Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica no da valores límites para los sólidos en coliformes totales.

Tabla 4.41. Coliformes fecales en salida de PTAR

Fecha	Coliformes fecales NMP/100ml	Clase "D" Cuadro N° 1 A-1 RMCH
22/12/2020		<50000 y <5000 80% de las muestras
17/2/2021		
2/8/2021	4.30E+05	
28/12/2021	4.30E+04	
23/6/2022	2.99E+05	
4/8/2022	DNPSC	
Valor promedio	4.30E+04	<50000 y <5000 80% de las muestras

DNPSC = Demasiado numerosas para ser contados.

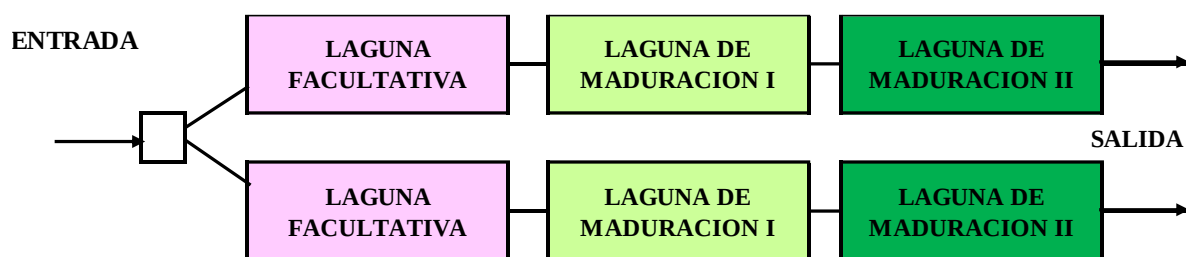
Fuente: Elaboracion propia.

. Solo uno de los valores de salida de coliformes fecales, de las cuatro muestras realizadas, está dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (< 50,000 NMP/100ml) para descargas en cuerpos receptores, pero si analizamos el valor promedio de 43,000 NMP/100ml, podemos concluir que la planta de tratamiento de Warnes si cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

Es necesario incluir un sistema de desinfección con el cual se podría bajar el nivel de patógenos por debajo de 1000 NMP/100ml. Actualmente no tiene ningún tipo de desinfección.

4.6. Determinación de eficiencias de tratamiento en las lagunas

Figura 4.12. Componentes del sistema de tratamiento



Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de eficiencias de remoción se empleó la siguiente formula:

$$\% \text{Remocion} = \frac{\text{Concentracion } A_f - \text{Concentracion } E_f}{\text{Concentracion } A_f} * 100$$

Nota: Af: afluente; Ef: Efluente

A continuación, se realizará el cálculo de la eficiencia de remoción de DBO_5

$$\% \text{Remocion } \text{DBO}_5 = \frac{\text{Concentracion } \text{DBO}_{5Af} - \text{Concentracion } \text{DBO}_{5Ef}}{\text{Concentracion } \text{DBO}_{5Af}} * 100$$

$$\% \text{Remocion } \text{DBO}_5 = \frac{296 - 47.9}{296} * 100 = 83.8\%$$

El resto de los cálculos se repiten para las concentraciones en los diferentes parámetros restantes y se los registra en las siguientes tablas resumen.

4.6.1. Eficiencia de remoción de DBO_5

Tabla 4.42. Eficiencia de remoción de DBO_5 en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Eficiencia
22/12/2020	296.00	47.90	83.8%
17/2/2021	377.00	38.00	89.9%
2/8/2021	249.34	98.74	60.4%
28/12/2021	355.00	48.30	86.4%
23/6/2022	451.00	109.20	75.8%
4/8/2022	382.00	73.00	80.9%
	351.72		
Valor Mínimo			60.40%
Valor Promedio			79.53%
Valor Máximo			89.92%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.43. Eficiencia de remoción de DBO₅ en Laguna Facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	249.34	111.15	55.4%
28/12/2021	355.00	99.50	72.0%
28/12/2021	355.00	89.30	74.8%
23/6/2022			
4/8/2022			
Valor Mínimo			55.42%
Valor promedio			67.41%
Valor Máximo			74.85%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.44. Eficiencia de remoción de DBO₅ en Laguna de Maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	111.15	98.74	11.2%
28/12/2021	99.50	76.90	22.7%
28/12/2021	89.30	50.60	43.3%
23/6/2022			
4/8/2022			
Valor Mínimo			11.17%
Valor Promedio			25.74%
Valor Máximo			43.34%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.45. Eficiencia de remoción de DBO₅ en Laguna de Maduración II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	98.74	98.74	0.0%
28/12/2021	76.90	63.30	17.7%
28/12/2021	50.60	35.10	30.6%
23/6/2022			
4/8/2022			
75.41 65.71			
Valor Mínimo			0.00%

Valor Promedio	16.11%
Valor Máximo	30.63%

Fuente: Elaboración propia

La eficiencia de remoción de la DBO₅ en el día 22/12/2020 es del 84% y la eficiencia de remoción de la DBO₅ en el día 28/12/2021 es 86%. De acuerdo a la bibliografía estas se encuentran dentro del rango permisible de eficiencias lo que nos indica un buen funcionamiento de las lagunas.

La eficiencia total en remoción de DBO₅ es del 90%, siendo este el valor más alto presente en los certificados de calidad de agua. El valor de salida de la PTAR en DBO₅ es 38.00 mg/L, estando por encima del valor 30.00 mg/L de los valores máximos admisibles para descargas en cuerpos receptores del Anexo A-1 que indica el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH). De acuerdo a la bibliografía estas eficiencias indican un funcionamiento poco eficiente por parte de las lagunas en cuanto a la eliminación de materia orgánica, por lo que se recomendaría incrementar las dimensiones de las lagunas para mejorar la eliminación de este parámetro.

4.6.2. Eficiencia de remoción de DQO en la salida de la PTAR

Tabla 4.46. Eficiencia de remoción de DQO en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Eficiencia
22/12/2020	535.90	239.10	55.4%
17/2/2021	612.80	133.70	78.2%
2/8/2021	283.60	151.90	46.4%
28/12/2021	526.70	130.70	75.2%
23/6/2022	729.70	251.20	65.6%
4/8/2022	1,530.00	294.00	80.8%
Valor Mínimo			46.44%
Valor Promedio			66.92%
Valor Máximo			80.78%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.47. Eficiencia de remoción de DQO en Laguna Facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	Eficiencia
22/12/2020			

17/2/2021			
2/8/2021	283.60	171.00	39.7%
28/12/2021	526.70	250.70	52.4%
28/12/2021	526.70	194.00	63.2%
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	39.70%
Valor Promedio	51.76%
Valor Máximo	63.17%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.48. Eficiencia de remoción de DQO en Laguna de Maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	171.00	151.90	11.2%
28/12/2021	250.70	184.00	26.6%
28/12/2021	194.00	137.30	29.2%
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	11.17%
Valor Promedio	22.33%
Valor Máximo	29.23%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.49. Eficiencia de remoción de DQO en Laguna de Maduración II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	151.90	151.90	0.0%
28/12/2021	184.00	164.00	10.9%
28/12/2021	137.30	104.00	24.3%
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	0.00%
Valor Promedio	11.71%
Valor Máximo	24.25%

Fuente: Elaboración propia

La eficiencia de remoción de la DQO en el día 22/12/2020 es del 55% y la eficiencia de remoción de la DQO en el día 17/02/2021 es del 78%. De acuerdo a la bibliografía estas eficiencias están dentro del rango de capacidad de tratamiento de este parámetro, indican un buen funcionamiento de las lagunas de oxidación.

La eficiencia total en remoción de DQO es del 81%. El valor de salida de la PTAR en DQO es 294.00 mg/L, estando por muy encima del valor < 60.00 mg/L del límite permisible para descargas líquidas según Anexo A-2 de los valores máximos admisibles para descargas en cuerpos receptores del Anexo A-1 que indica el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH). De acuerdo a la bibliografía estas eficiencias indican un funcionamiento poco eficiente por parte de las lagunas en cuanto a la eliminación de materia orgánica, esto puede deberse a que la laguna estaría trabajando de manera sobrecargada con caudales máximos.

4.6.3. Eficiencia de remoción de SST en la salida de la PTAR

Tabla 4.50. Eficiencia de remoción de SST en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Eficiencia
22/12/2020	156.00	104.00	33.3%
17/2/2021	290.00	61.00	79.0%
2/8/2021	193.00	349.00	
28/12/2021	172.00	18.00	89.5%
23/6/2022	320.00	100.00	68.8%
4/8/2022	300.00	222.00	26.0%
Valor Mínimo			26.00%
Valor Promedio			59.32%
Valor Máximo			89.53%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.51. Eficiencia de remoción de SST en Laguna Facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	193.00	172.00	10.9%
28/12/2021	172.00	84.00	51.2%
28/12/2021	172.00	64.00	62.8%

23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	10.88%
Valor Promedio	41.61%
Valor Máximo	62.79%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.52. Eficiencia de remoción de SST en Laguna de Maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	172.00	437.00	
28/12/2021	84.00	50.00	40.5%
28/12/2021	64.00	36.00	43.8%
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	40.48%
Valor Promedio	42.11%
Valor Máximo	43.75%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.53. Eficiencia de remoción de SST en Laguna de Maduración II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	437.00	349.00	20.1%
28/12/2021	50.00	34.00	32.0%
28/12/2021	36.00	16.00	55.6%
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	20.14%
Valor Promedio	35.90%
Valor Máximo	55.56%

Fuente: Elaboración propia

La Ley 1333 de Medio Ambiente - Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica no da valores límites para los sólidos en suspensión totales.

La eficiencia total en remoción de SST es del 90%.

Haciendo un análisis de lo que establece el Anexo A-1, el valor de salida de la PTAR en SST es 18 mg/L, estando por debajo del valor 60.00 mg/L del límite permisible para descargas líquidas según Anexo A-2 que indica el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH). De acuerdo a la bibliografía esta eficiencia indica un buen funcionamiento de las lagunas de oxidación.

4.6.4. Variación de pH

Tabla 4.54. Variación de pH en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Variación
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	7.58	8.46	0.9
23/6/2022	7.60	8.09	0.5
4/8/2022	7.13	7.94	0.8
Valor Mínimo			0.49
Valor Promedio			0.73
Valor Máximo			0.88

Fuente: Elaboración propia.

El valor de salida de la PTAR en pH es 8.46 mg/L, están dentro del rango permisible para valores máximos admisibles del anexo A-1 (≥ 6.00 y ≤ 9.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores. por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes cumple con esta exigencia, que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

Todos los pH son mayores a 7, por lo tanto, el agua residual en la salida de la PTAR es alcalina

El agua con pH alto (alta alcalinidad) puede causar formación de sarro, manchas de metal, agua turbia, mala eficiencia del cloro y también puede causar irritación de la piel y los ojos. Si el agua va a estar en contacto con seres vivos se recomienda mantenerse dentro del rango 7.4 - 7.6 para evitar esos problemas.

4.6.5. Eficiencia de remoción de aceites y grasas

Tabla 4.55. Eficiencia de remoción de Aceites y Grasas en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Eficiencia
22/12/2020	41.60	2.40	94.2%
17/2/2021	60.30	1.40	97.7%
2/8/2021			
28/12/2021	71.80	3.70	94.8%
23/6/2022	175.10	6.90	96.1%
4/8/2022	44.10	0.10	99.8%
Valor Mínimo			94.23%
Valor Promedio			96.52%
Valor Máximo			99.77%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.56. Eficiencia de remoción de Aceites y Grasas en Laguna Facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	71.80	4.90	93.2%
28/12/2021	71.80	6.40	91.1%
23/6/2022			
4/8/2022			
Valor Mínimo			91.09%
Valor Promedio			92.13%
Valor Máximo			93.18%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.57. Eficiencia de remoción de Aceites y Grasas en Laguna de Maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	4.90	4.90	0.0%
28/12/2021	6.40	2.90	54.7%
23/6/2022			
4/8/2022			
Valor Mínimo			0.00%

Valor Promedio	27.34%
Valor Máximo	54.69%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.58. Eficiencia de remoción de Aceites y Grasas en Laguna de Maduración II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	4.90	2.30	53.1%
28/12/2021	2.90	1.10	62.1%
23/6/2022			
4/8/2022			
Valor Mínimo			53.06%
Valor Promedio			57.57%
Valor Máximo			62.07%

Fuente: Elaboración propia

Podemos notar que los valores de eficiencias que tiene son superiores al 90% en todos los registros presentes, lo que demuestra una gran capacidad del sistema de lagunas para remover este parámetro contaminante. El valor de salida de la PTAR en Aceites y grasas es 6.90 mg/L, estando muy por encima del valor 1.00 mg/L del límite permisible para descargas en cuerpos receptores según Anexo A-1 que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.6.6. Eficiencia de remoción de fósforo total

Tabla 4.59. Eficiencia de remoción de Fósforo total en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	6.48	3.08	52.5%
23/6/2022	9.25	7.87	14.9%
4/8/2022			
Valor Mínimo			14.92%
Valor Promedio			33.69%
Valor Máximo			52.47%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.60. Eficiencia de remoción de Fósforo total en Laguna Facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	6.48	3.83	40.9%
28/12/2021	6.48	4.75	26.7%
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	26.70%
Valor Promedio	33.80%
Valor Máximo	40.90%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.61. Eficiencia de remoción de Fósforo total en Laguna de Maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	3.83	3.52	8.1%
28/12/2021	4.75	3.24	31.8%
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	8.09%
Valor Promedio	19.94%
Valor Máximo	31.79%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.62. Eficiencia de remoción de Fósforo total en Laguna de Maduración II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	3.52	3.08	12.5%
28/12/2021	3.24	3.37	
23/6/2022			

4/8/2022			
Valor Mínimo			12.50%
Valor Promedio			12.50%
Valor Máximo			12.50%

Fuente: Elaboración propia

El valor de Fósforo total al ingreso a la PTAR es 6.48 mg/L, El valor de salida es de 3.08 mg/L. Tiene una eficiencia total del 52%, lo que demuestra que el sistema de lagunas puede remover este parámetro.

Aun así, el valor de salida de fosforo de la PTAR, está muy por encima del valor 1.00 mg/L del límite permisible para descargas en cuerpos receptores según Anexo A-1 que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, lo que indicaría que habría que hacer unos ajustes en la planta para cumplir con la exigencia de este parámetro.

4.6.7. Eficiencia de remoción de Amonio

Tabla 4.63. Eficiencia de remoción de Amonio en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Eficiencia
22/12/2020	83.75	20.95	75.0%
17/2/2021	56.16	16.00	71.5%
2/8/2021	14.30	5.50	61.5%
28/12/2021			
23/6/2022			
4/8/2022	47.20	29.60	37.3%
Valor Mínimo			37.29%
Valor Promedio			61.33%
Valor Máximo			74.99%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.64. Eficiencia de remoción de Amonio en Laguna Facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	14.30	6.25	56.3%
28/12/2021			
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	56.29%
Valor Promedio	56.29%
Valor Máximo	56.29%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.65. Eficiencia de remoción de Amonio en Laguna de Maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	6.25	6.00	4.0%
28/12/2021			
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	4.00%
Valor Promedio	4.00%
Valor Máximo	4.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.66. Eficiencia de remoción de Amonio en Laguna de Maduración II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	6.00	5.50	8.3%
28/12/2021			
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	8.33%
Valor Promedio	8.33%
Valor Máximo	8.33%

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de remoción en Amonio es del 62%, de acuerdo a la bibliografía esta eficiencia indica un buen funcionamiento de las lagunas de oxidación. El valor de salida de la PTAR en Amonio es 5.50 mg/L, estando por encima del valor 4.00 mg/L del límite permisible para descargas en cuerpos receptores según Anexo A-1 que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Lo que demuestra que el

sistema de lagunas tiene limitaciones para remover este parámetro contaminante, siendo recomendable un reajuste para mejorar la calidad de agua para la descarga de este parámetro.

4.6.8. Eficiencia de remoción de Nitrógeno Total

Tabla 4.67. Eficiencia de remoción de Nitrógeno total en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	94.40	39.40	58.3%
23/6/2022	139.50	93.30	33.1%
4/8/2022			
Valor Mínimo			33.12%
Valor Promedio			45.69%
Valor Máximo			58.26%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.68. Eficiencia de remoción de Nitrógeno total en Laguna Facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	94.40	46.30	51.0%
28/12/2021	94.40	52.90	44.0%
23/6/2022			
4/8/2022			
Valor Mínimo			43.96%
Valor Promedio			47.46%
Valor Máximo			50.95%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.69. Eficiencia de remoción de Nitrógeno total en Laguna Maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	46.30	41.50	10.4%
28/12/2021	52.90	43.90	17.0%
23/6/2022			

4/8/2022			
Valor Mínimo			10.37%
Valor Promedio			13.69%
Valor Máximo			17.01%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.70. Eficiencia de remoción de Nitrógeno total en Laguna de Maduración II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021			
28/12/2021	41.50	36.60	11.8%
28/12/2021	43.90	43.40	1.1%
23/6/2022			
4/8/2022			
Valor Mínimo			1.14%
Valor Promedio			6.47%
Valor Máximo			11.81%

Fuente: Elaboración propia.

El valor de Nitrógeno total al ingreso a la PTAR es 94.4 mg/L, El valor de salida es de 39.4 mg/L. Tiene una eficiencia total del 58%, estando dentro del rango permisible de eficiencias. lo que demuestra que el sistema de lagunas opera con limitaciones para remover este parámetro contaminante.

Los valores de salida de la PTAR de nitrógeno total están por encima de 12 mg/L, por lo tanto, no estaría cumpliendo con el Anexo A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, se requiere otros procesos para reducir el nitrógeno en el agua residual.

4.6.9. Eficiencia de remoción de Hierro

Tabla 4.71. Eficiencia de remoción de Hierro en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR mg/L	Salida de PTAR mg/L	Eficiencia
22/12/2020	0.55	0.14	74.5%
17/2/2021	1.92	0.18	90.6%
2/8/2021			
28/12/2021			
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	74.55%
Valor Promedio	82.59%
Valor Máximo	90.63%

Fuente: Elaboración propia.

El valor de Nitrógeno total al ingreso a la PTAR es 1.92 mg/L, el valor de salida es de 0.18 mg/L. Tiene una eficiencia total del 91.00%, estando dentro del rango permisible de eficiencias, lo que demuestra que el sistema de lagunas opera en muy buenas condiciones para remover este parámetro contaminante.

Todos los valores de salida de hierro, están dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (1.00 mg/L) para descargas en cuerpos receptores, cumpliendo lo que establece la Ley 1333 de Medio Ambiente - Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, por lo tanto, la planta de tratamiento de Warnes ejecuta la remoción correcta de esta exigencia y se ve reflejado en los valores de salida que el sistema de lagunas puede remover este parámetro satisfactoriamente.

4.6.10. Eficiencia de remoción de Coliformes fecales y totales

Tabla 4.72. Eficiencia de remoción de Coliformes totales en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR NMP/100ml	Salida de PTAR NMP/100ml	Eficiencia
22/12/2020	1.10E+08	1.10E+05	99.90%
17/2/2021	9.30E+07	2.40E+05	99.74%
2/8/2021			
28/12/2021			
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	99.74%
Valor Promedio	99.82%
Valor Máximo	99.90%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.73. Eficiencia de remoción de Coliformes Fecales en todo el sistema

Fecha	Ingreso a PTAR NMP/100ml	Salida de PTAR NMP/100ml	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	2.10E+10	4.30E+05	99.998%

28/12/2021	2.40E+07	4.30E+04	99.821%
28/12/2021	2.40E+07	3.21E+04	99.866%
23/6/2022	2.40E+07	2.99E+05	98.754%
4/8/2022			

Valor Mínimo	98.75%
Valor Promedio	99.61%
Valor Máximo	100.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.74. Eficiencia de remoción de Coliformes Fecales en Laguna Facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	2.10E+10	2.30E+08	98.90%
28/12/2021	2.40E+07	1.10E+06	95.42%
28/12/2021	2.40E+07	2.40E+06	90.00%
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	90.00%
Valor Promedio	94.77%
Valor Máximo	98.90%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.75. Eficiencia de remoción de Coliformes Fecales en Laguna de Maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	2.30E+08	4.30E+06	98.1%
28/12/2021	1.10E+06	4.60E+05	58.2%
28/12/2021	2.40E+06	4.60E+05	80.8%
23/6/2022			
4/8/2022			

Valor Mínimo	58.18%
Valor Promedio	79.05%
Valor Máximo	98.13%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.76. Eficiencia de remoción de Coliformes Fecales en Laguna de Maduración II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	4.30E+06	4.30E+05	90.00%
28/12/2021	4.60E+05	4.60E+04	90.00%
28/12/2021	4.60E+05	3.21E+04	93.02%
23/6/2022			
4/8/2022			
Valor Mínimo			90.00%
Valor Promedio			91.01%
Valor Máximo			93.02%

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia total en remoción de coliformes fecales es del 99.82%. El valor de salida de la PTAR en coliformes fecales es 4.30E+04 NMP/100ml, está dentro de los valores máximos admisibles del anexo A-1 (< 50,000 NMP/100ml) para descargas en cuerpos receptores que indica el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH). De acuerdo a la bibliografía la eficiencia alcanzada está dentro del rango de capacidad de tratamiento de este parámetro, indican un buen funcionamiento de las lagunas, pero el valor de descarga de este parámetro es muy elevado, por lo que se recomienda ajustar algunos aspectos en el sistema para reducir estos valores de descarga de calidad de agua.

4.7. Determinación de parámetros de diseño en lagunas de oxidación.

Para el cálculo de estos parámetros se determina el caudal de funcionamiento a su máxima capacidad y el volumen útil de cada una de las lagunas.

4.7.1. Caudal de diseño

El caudal a usar corresponde a la máxima capacidad que la planta de tratamiento puede tratar de manera óptima. Este aspecto se determinó y analizó en el punto 4.3.

$$\text{Caudal medio} = 29.28 \text{ L/s}$$

También se probará para el máximo y mínimo de los caudales aforados:

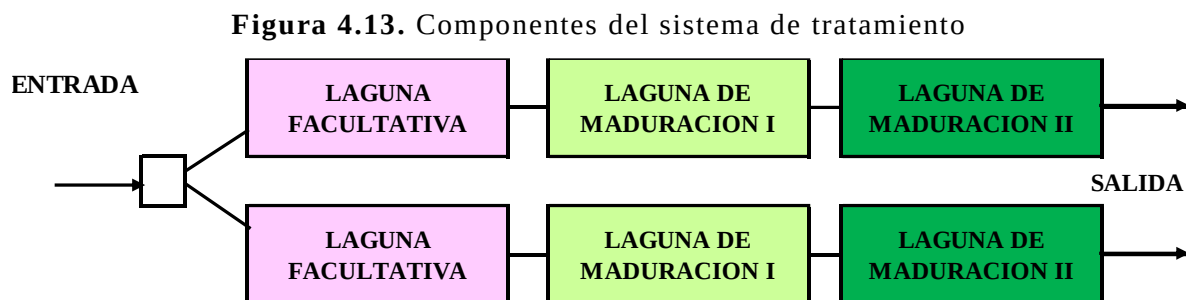
$$\text{Caudal máximo} = 39.80 \text{ L/s}$$

$$\text{Caudal mínimo} = 24.81 \text{ L/s}$$

4.7.2. Determinación de volúmenes de las lagunas

Se digitalizo los planos impresos de diseño proporcionados por COSEPW, se determinó las áreas y volúmenes de cada laguna, con este dato se procederá a la verificación hidráulica.

La PTAR de Warnes cuenta con 2 trenes de tratamiento compuestas de laguna facultativa – laguna de pulimento I – laguna de pulimento II y estructura de salida. Por lo tanto, las dimensiones serán señaladas por trenes separados.



Fuente: Elaboración propia.

4.7.2.1. Volumen de lagunas facultativas

Volumen Laguna facultativa lado izquierdo

he = m Profundidad útil

Sección trapezoidal:

Largo Lb=	163.40	m	base
L/B =	3.00		
Ancho Bb =	54.40	m	base
talud interior = 1:	2.7		
Largo Ls=	171.64	m	superficie
Ancho Bs =	62.64	m	superficie
Largo Ls 2=	177.95	m	superficie
Ancho Bs 2 =	59.61	m	superficie
Área en la base	8,888.86	m ²	
Área en la superficie	10,751.87	m ²	

Volumen útil:

14,730.55

 m³

Volumen de cada laguna:

V = 14,730.55 m ³

Teniendo en cuenta que la laguna esta con lodos en un 20%.

V = 11,784.44 m ³

Altura libre

H_v =

0.6

 m

Ancho de coronamiento

El ancho del coronamiento será mínimo de 1.5 m para permitir la circulación.

Coronamiento =

1.50

 m

Altura libre	h _s =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0.6</td></tr></table>	0.6	m
0.6				
Altura total	H =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>2.1</td></tr></table>	2.1	m
2.1				

Volumen Laguna facultativa lado derecho

h_e =

1.50

 m Profundidad útil

Sección trapezoidal:

Largo L _b =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>163.40</td></tr></table>	163.40	m	base
163.40				
L/B =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>3.00</td></tr></table>	3.00		
3.00				
Ancho B _b =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>54.40</td></tr></table>	54.40	m	base
54.40				
talud interior = 1:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>2.8</td></tr></table>	2.8		
2.8				
Largo L _s =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>171.81</td></tr></table>	171.81	m	superficie
171.81				
Ancho B _s =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>62.81</td></tr></table>	62.81	m	superficie
62.81				
Largo L _s 2 =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>179.02</td></tr></table>	179.02	m	superficie
179.02				

Ancho Bs 2 =

60.26

 m superficie

Área en la base

8,888.86

 m²

Área en la superficie

10,791.47

 m²

Volumen útil:

14,760.25

 m³

Volumen de cada laguna:

V = 14,760.25 m ³

Teniendo en cuenta que la laguna esta con lodos en un 20%.

V = 11,808.20 m ³

Altura libre

Hv =

0.6

 m

Ancho de coronamiento

El ancho del coronamiento será mínimo de 1.5 m para permitir la circulación.

Coronamiento =

1.50

 m

Altura libre	hs =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0.6</td></tr></table>	0.6	m
0.6				
Altura total	H =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>2.1</td></tr></table>	2.1	m
2.1				

4.7.2.2. Volumen de lagunas de maduración

Volumen Laguna de maduración I lado izquierdo

he =

1.60

 m

Sección trapezoidal:

Largo Lb=

74.50

 m base

L/B =

1.50

Ancho Bb =	49.67	m	base
talud interior = 1:	2.9		
Largo Ls=	83.70	m	superficie
Ancho Bs =	58.86	m	superficie
Largo Ls 2 =	83.28	m	superficie
Ancho Bs 2 =	58.98	m	superficie

Área en la base	3,700.17	m ²
Área en la superficie	4,926.43	m ²
Volumen útil:	6,901.28	m ³

Volumen de cada laguna:	V = 6,901.28 m³
-------------------------	-----------------------------------

Teniendo en cuenta que la laguna esta con lodos en un 20%.

V = 5,521.02 m³

Altura libre

Hv =	0.60	m
------	------	---

Ancho de coronamiento

El ancho del coronamiento será mínimo de 1.5 m para permitir la circulación.

Coronamiento =	1.50	m
----------------	------	---

Altura libre	hs =	0.6	m
Altura total	H =	2.2	m

Volumen Laguna de pulimiento I lado derecho

$$h_e = \boxed{1.60} \text{ m}$$

Sección trapezoidal:

Largo $L_b =$	$\boxed{74.69}$	m	base
$L/B =$	$\boxed{1.51}$		
Ancho $B_b =$	$\boxed{49.46}$	m	base

talud interior = 1:	$\boxed{3.0}$		
Largo $L_s =$	$\boxed{84.39}$	m	superficie
Ancho $B_s =$	$\boxed{59.16}$	m	superficie
Largo $L_{s2} =$	$\boxed{82.91}$	m	superficie
Ancho $B_{s2} =$	$\boxed{60.41}$	m	superficie

Área en la base	$\boxed{3,694.34}$	m ²
Área en la superficie	$\boxed{4,992.25}$	m ²
Volumen útil:	$\boxed{6,949.27}$	m ³

Volumen de cada laguna:	$\mathbf{V = 6,949.27 \text{ m}^3}$
-------------------------	-------------------------------------

Teniendo en cuenta que la laguna esta con lodos en un 20%.

$\mathbf{V = 5,559.41 \text{ m}^3}$

Altura libre

$$H_v = \boxed{0.60} \text{ m}$$

Ancho de coronamiento

El ancho del coronamiento será mínimo de 1.5 m para permitir la circulación.

$$\text{Coronamiento} = \boxed{1.50} \text{ m}$$

Altura libre	hs =	0.6	m
Altura total	H =	2.2	m

Volumen Laguna de pulimiento II lado izquierdo

he = 1.60 m

Sección trapezoidal:

Largo Lb=	74.80	m	base
L/B =	1.55		
Ancho Bb =	48.26	m	base

talud interior =	1:	2.9		
Largo Ls=		84.09	m	superficie
Ancho Bs =		57.54	m	superficie
Largo Ls 2 =		82.50	m	superficie
Ancho Bs 2 =		58.34	m	superficie

Área en la base	3,609.70	m ²
Área en la superficie	4,838.65	m ²
Volumen útil:	6,758.68	m ³

Volumen de cada laguna: **V = 6,758.68 m³**

Teniendo en cuenta que la laguna esta con lodos en un 20%.

V = 5,406.94 m³

Altura libre

Hv = 0.60 m

Ancho de coronamiento

El ancho del coronamiento será mínimo de 1.5 m para permitir la circulación.

Coronamiento =

1.50

 m

Altura libre	hs =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0.6</td></tr></table>	0.6	m
0.6				
Altura total	H =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>2.2</td></tr></table>	2.2	m
2.2				

Volumen Laguna de pulimiento II lado derecho

he =

1.60

 m

Sección trapezoidal:

Largo Lb=	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>75.30</td></tr></table>	75.30	m	
75.30				
L/B =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1.55</td></tr></table>	1.55		
1.55				
Ancho Bb =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>48.58</td></tr></table>	48.58	m	base
48.58				

talud interior = 1:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>3.1</td></tr></table>	3.1		
3.1				
Largo Ls=	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>85.27</td></tr></table>	85.27	m	superficie
85.27				
Ancho Bs =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>58.55</td></tr></table>	58.55	m	superficie
58.55				
Largo Ls 2=	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>82.53</td></tr></table>	82.53	m	superficie
82.53				
Ancho Bs 2 =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>60.55</td></tr></table>	60.55	m	superficie
60.55				

Área en la base	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>3,658.12</td></tr></table>	3,658.12	m ²	
3,658.12				
Área en la superficie	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>4,992.19</td></tr></table>	4,992.19	m ²	
4,992.19				
Volumen útil:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>6,920.25</td></tr></table>	6,920.25	m ³	
6,920.25				

Volumen de cada laguna:

V = 6,920.25 m³

Teniendo en cuenta que la laguna esta con lodos en un 20%.

V = 5,536.20 m³

Altura libre

Hv =

0.60

 m

Ancho de coronamiento

El ancho del coronamiento será mínimo de 1.5 m para permitir la circulación.

Coronamiento =

1.50

 m

Altura libre	hs =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0.6</td></tr></table>	0.6	m
0.6				
Altura total	H =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>2.2</td></tr></table>	2.2	m
2.2				

4.7.3. Cálculo de parámetros de diseño de lagunas facultativas

Laguna facultativa

Los parámetros a determinar son:

- Tiempo de retención hidráulica (días)
- Carga orgánica superficial (kg DBO₅/ha día)
- Coeficiente de decaimiento bacteriano
- Verificación de fórmula de: McGarry y Pescod para predecir la eficiencia de remoción de DBO (%).

Se calculará en un solo tren de tratamiento ya que ambos trenes son similares.

Se calcularán los parámetros para caudales aforados mínimo, medio y máximo.

Con caudal mínimo

DATOS

Población =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>13,764</td></tr></table>	13,764	hab.	
13,764				
Temp med min =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>15.1</td></tr></table>	15.1	°C.	Temperatura media del mes más frío.
15.1				
Caudal =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>24.81</td></tr></table>	24.81	l/s	Mínimo
24.81				
DBO ₅ =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>249.0</td></tr></table>	249.0	mg/l	En entrada a laguna facultativa
249.0				

Tiempo de retención hidráulico

Tiempo de retención hidráulica o tiempo de residencia (t). Es el tiempo (días) que teóricamente pasa el agua dentro del sistema de tratamiento biológico y que se utiliza en el diseño.

Caudal de entrada =

24.81

 l/s

2143.58

 m³/día

$$\begin{aligned} \text{Número de trenes} &= \frac{2}{12.41} \text{ l/s} \\ \text{Caudal medio por laguna} &= \frac{1071.79}{12.41} \text{ m}^3/\text{día} \end{aligned}$$

Donde: $TRH = \frac{V}{Q}$
 TRH: tiempo de retención hidráulica (d).
 V: volumen útil de la Laguna Facultativa (m³).
 Q: caudal de aguas a tratar (m³/d).

$$\begin{aligned} \text{Volumen útil} &= 11,784.44 \text{ m}^3 \\ \text{Caudal en cada laguna facultativa} &= \frac{1071.79}{11,784.44} \text{ m}^3/\text{día} \end{aligned}$$

$$TRH = \frac{11,784.44}{1071.79} \text{ días}$$

Carga orgánica superficial

Cálculo de la carga orgánica en condiciones reales de funcionamiento.

$$\lambda_s = \frac{Q * C_a}{S}$$

Donde:
 λ_s : carga superficial (kg DBO₅/hab/d).
 Q: caudal de aguas residuales a tratar (m³/d).
 Ca: concentración DBO₅ de las aguas afluentes a Laguna Facultativa (kg DBO₅/m³).
 S: superficie de lámina de agua de la Laguna Facultativa (ha).

$$\begin{aligned} Q &= 1071.79 \text{ m}^3/\text{día} \\ Ca &= 249.00 \text{ mg DBO}_5/\text{L} \\ Ca &= 0.249000 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 \\ S &= 10751.875 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$S = \boxed{1.075} \text{ ha}$$

$$\lambda_S = \boxed{248.21} \text{ kg DBO5/hab/d}$$

Cálculo de la Carga volumétrica (carga superficial) en función de la temperatura.

Cargas máximas admisibles según varios autores:

Método 1 (Yaenz)

$$\lambda_S = 250 * (1.085)^{T-20}$$

Donde :

λ_S : carga superficial (kg DBO5/hab/d).

T = Temperatura media del aire (°C)

se toma la temperatura media del aire en el mes más frío del año

$$T = \boxed{15.1} \text{ °C}$$

$$\lambda_S = \boxed{167.214} \text{ kg DBO5/hab/d}$$

Método 2 (McGarry y Pescod)

$$C_S = 60.26 * (1.099)^T$$

Donde :

C_S : carga superficial (kg DBO5/hab/d).

T = Temperatura media del aire (°C)

se toma la temperatura media del aire en el mes más frío del año

$$T = \boxed{15.1} \text{ °C}$$

$$C_S = \boxed{249.96} \text{ kg DBO5/hab/d}$$

Método 3 (Mara, 1976)

$$C_s = 40.35 * (1.099)^T$$

Donde :

Cs: carga superficial (kg DBO5/hab/d).

T = Temperatura media del aire (°C)

se toma la temperatura media del aire en el mes más frío del año

T =	15.1	°C
C _s =	167.37	kg DBO5/hab/d

Método 4 (McGarry y Pescod)

$$C_{Smax} = 20T - 20$$

Donde :

Csmax: carga superficial (kg DBO5/hab/d).

T = Temperatura media del aire (°C)

se toma la temperatura media del aire en el mes más frío del año

T =	15.1	°C
C _{Smax} =	281.4	kg DBO5/hab/d

Método 5 (Mara, 1997)

$$\lambda_s = 350 * (1.107 - 0.002T)^{T-25}$$

λs: carga superficial (kg DBO5/hab/d).

T = Temperatura media del aire (°C)

se toma la temperatura media del aire en el mes más frío del año

$$T = \boxed{15.1}^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_s = \boxed{167.77} \text{ kg DBO5/hab/d}$$

Adoptamos la Carga Superficial de:

$$\lambda_s = \boxed{281.4} \text{ kg DBO/hab/ día}$$

Por condiciones favorables de clima.

La carga orgánica superficial de funcionamiento real es inferior a los valores recomendables, lo que indica que la laguna facultativa actualmente está trabajando con carga orgánica inferior a lo que su capacidad le permite tratar con efectividad.

$$248.21 > 281.4$$

Estimación de la DBO5 de salida en condiciones de funcionamiento real

La primera relación de cargas de DBO fue reportada por McGarry y Pescod (1970 en Yáñez, 1993) durante sus estudios de 134 plantas operando, a nivel mundial para su aplicación, en climas tropicales.

$$C_{sr} = 10.35 + 0.725C_s$$

se verificará esta ecuación comparando eficiencias.

Donde :

C_{smax}: carga superficial removida (kg DBO5/hab/d). Calculada a partir de C_s

C_s: carga superficial (kg DBO5/hab/d).

$$C_{sr} = \boxed{190.30} \text{ kg DBO/hab/día}$$

Se sale con:

57.91

 kg DBO/hab/día

Estimación de la eficiencia de remoción de DBO5

$C_a =$

0.035

 kgDBO5/m3

$$E_{DBO} = \frac{C_a - C_e}{C_a} * 100$$

Donde:

E_{DBO} = eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno en la laguna facultativa (%)

C_a = concentración DBO5 de las aguas afluentes a Laguna Facultativa (kg DBO5/m3).

C_e = concentración DBO5 de las aguas efluentes a Laguna Facultativa (kg DBO5/m3).

$C_a =$

0.249

 kg DBO5/m3

$C_e =$

0.035

 kg DBO5/m3

$E_{DBO} =$

85.9

 %

Determinación del coeficiente de decaimiento en la remoción de coliformes fecales

a) Coeficiente de decaimiento bacteriano en función de la temperatura

$$K_b = 0.841 * (1.075)^{T-20}$$

Donde :

$T =$ Temperatura °C

$K_b =$ Coeficiente de decaimiento bacteriano (día⁻¹)

$T =$

15.07

 °C

$K_b =$

0.59

 día⁻¹

b) Coeficiente de decaimiento bacteriano en función de la altura útil del agua en la laguna

El coeficiente de muerte bacteriana a 20°C (K_b) puede determinarse haciendo uso de la expresión propuesta por Von Sperling (2016).

$$K_b = 0.549 * h^{-1.456}$$

Donde:

h = Profundidad efectiva de la laguna (m)

$$h = \boxed{1.50}$$

$$K_b = \boxed{0.30} \text{ día}^{-1} \quad \text{Coeficiente de decaimiento bacteriano a 20°C}$$

El autor aconseja que el valor que se obtenga de K_b se reduzca del orden de un 5% a 15% en el caso de las lagunas Facultativas, y que se incremente en la misma proporción, en el caso de las lagunas de Maduración.

$$\text{Reducción} = \boxed{5} \%$$

$$K_b = \boxed{0.29} \text{ día}^{-1} \quad \text{Coeficiente de decaimiento bacteriano a 20°C}$$

Para corregir el valor de K_b en función de la temperatura se emplea la expresión.

$$K_{bT} = K_{b20} * \theta^{(T-20)}$$

Donde:

K_{bT} = Coeficiente de muerte bacteriana a la temperatura "T" (d⁻¹)

θ = Coeficiente de temperatura

(Suele adoptar un valor 1.07, Von Sperling y Chernicharo, 2005).

T = Temperatura media del agua en el mes más frío (°C)

T =

15.07

 °C

Kb =

0.21

 día⁻¹

c) Coeficiente de decaimiento bacteriano en función de la eficiencia real

Para caudal mínimo

Efic =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>98.9</td></tr></table> %	98.9	Eficiencia de remoción de Coliformes fecales
98.9			
R =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>11.00</td></tr></table> días	11.00	tiempo de retención hidráulico para el caudal medio
11.00			
kbf =	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>8.496</td></tr></table>	8.496	
8.496			

$$\text{Eficiencia} = \frac{100 * (N_o - N_p)}{N_o}$$

$$\frac{N_p}{N_o} = \frac{1}{K_{bf} * R + 1}$$

$N_p/N_o = 0.011$

$$\text{Eficiencia} = 100 - 100 * \frac{N_p}{N_o} = 100 - 100 * (0.0253)$$

Efic =	98.94	%
--------	-------	---

en coliformes

Kb =

8.50

 día⁻¹ Coeficiente de decaimiento bacteriano

El cálculo se repite para los caudales restantes, los resultados obtenidos se los adjunta en una tabla resumen:

Tabla 4.77. Resultados en laguna facultativa

Laguna facultativa						
Caudales (l/s)		Superficie lámina de agua (ha)	Tiempo de retención hidráulica (días)	Carga Superficial (kg DBO5/hab/d)	Eficiencia de remoción DBO5 (%)	Coefficiente de decaimiento bacteriano (día ⁻¹)
Mínimo	24.81	1.075	11.0	248.21	85.9	8.50
Medio	29.28	1.075	9.3	413.78	82.2	2.02
Máximo	39.80	1.075	6.9	721.21	74.76	1.36

Fuente: Elaboración propia.

4.7.4. Cálculo de parámetros de diseño de lagunas de maduración I

Laguna de maduración I

Los parámetros a determinar son:

- Tiempo de retención hidráulica (días)
- Tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias
- Coeficiente de eliminación de la DBO

Se calculará en un solo tren de tratamiento ya que ambos trenes son similares.

Se calcularán los parámetros para caudales aforados mínimo, medio y máximo.

Con caudal mínimo

Datos

Caudal =	24.81	l/s	
DBO ₅ =	89.30	mg/l	DBO de entrada a laguna de maduración I
Ne =	2.30E+08	NMP/100ml	Coliformes de entrada a lagunas de MADURACIÓN I

Tiempo de retención hidráulico

Caudal de entrada =	24.81	l/s	2143.58	m3/día
Número de trenes =	2			
Caudal medio por laguna =	12.41	l/s	1071.79	m3/día

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Donde:

TRH: tiempo de retención hidráulica (d).

V: volumen útil de la Laguna Facultativa (m³).

Q: caudal de aguas a tratar (m³/d).

Volumen útil =	5,521.02	m ³
Caudal en cada laguna facultativa =	1071.79	m ³ /día

$$TRH = \boxed{5.2} \text{ días}$$

Remoción de Coliformes

Calibración de la Tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias

Método cinético

$$N_e = \frac{N_a}{(1 + K_b * t)}$$

Siendo:

Na = Numero de coliformes del afluente (NMP/100ml).

Ne = Numero de coliformes del efluente (NMP/100ml).

t = Tiempo de retención (días)

T = Temperatura mínima mensual (°C)

Kb =

Na =	2.30E+08	NMP/100ml
Ne =	4.30E+06	NMP/100ml
t =	5.2	días
T =	15.07	°C

Despejamos Kb de la formula del MÉTODO CINÉTICO

$$K_b = \frac{\frac{N_a}{N_e} - 1}{t}$$

$$K_b = \boxed{10.19}$$

Kb se determina mediante las siguientes formulas :

$$K_b = 2.6 * (1.19)^{(T-20)}$$

$$K_b = \boxed{1.103}$$

Según Mara (1976)

$$K_{cf} = 0.84 * (1.07)^{T-20}$$

$$K_{cf} = \boxed{0.602}$$

Eficiencia de remoción de coliformes:

$$Y_c = \frac{N_a - N_e}{N_a} * 100$$

Donde:

rc: rendimiento de eliminación de coliformes (%)

Na: concentración de coniformes en el afluente de la laguna (NMP/100 ml)

Ne: concentración de coliformes en el efluente de la laguna (NMP/100 ml)

$$rc = \boxed{98.13} \%$$

Estimación coeficiente de eliminación de la DBO en lagunas de maduración I

a) Estimación coeficiente de eliminación de la DBO conociendo valores de entrada y salida

Por la geometría típica de las Lagunas Facultativas y de Maduración, salvo que los TRH sean muy altos, en cuyo caso podría ser preferible el modelo de mezcla completa, en general se recomienda utilizar el modelo de flujo disperso. Este modelo especifica que:

$$C_{es} = C_a * \frac{4 * a * e^{\frac{1}{2d}}}{(1 + a)^2 * e^{\frac{a}{2d}} - (1 - a)^2 * e^{\frac{-a}{2d}}}$$

Donde:

Ces: concentración de DBO5 soluble en el efluente de la laguna (mg/L)	50.6	Objetivo
Ca: concentración de DBO5 total en el afluente de la laguna (mg/L)	89.30	
a: coeficiente (adimensional)	1.72	Variable
e: base de los logaritmos neperianos	2.72	
Ecuación	50.60	Ecuación

El número de dispersión “d” se calcula mediante la expresión propuesta por von Sperling (1999):

$$d = \frac{1}{(L/A)}$$

Donde:

L: longitud de la laguna (m)

A: ancho de la laguna (m)

L/A =

L =	82.94	m
A =	59.58	m
L/A =	1.39	
d =	0.72	

a = objetivo

El coeficiente “a” se determina mediante la expresión:

$$a = \sqrt{1 + 4K * TRH * d}$$

Donde:

K: coeficiente de eliminación de DBO5 (d-1)

variable

TRH: tiempo de retención hidráulica (d)	5.2	ecuación
d: número de dispersión (adimensional)	0.72	
Ecuación =	1.82	

$$K = \boxed{0.16} d^{-1}$$

b) Coeficiente de eliminación de la DBO en lagunas de maduración en función de temperatura y carga superficial

El coeficiente K se calcula para diferentes temperaturas mediante la expresión:

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)}$$

Donde:

KT: coeficiente de eliminación de DBO5 a la temperatura T (d-1)

K20: constante de reacción a 20 °C (d-1)

θ : coeficiente adimensional, con un valor de 1,035 (Arceivala, 1981)

T: temperatura media del aire en el mes más frío (°C).

T: temperatura media del agua residual en el mes más frío (°C).

1.035
15.07
19.26

$$K_{20} = 0.132 * (\log \lambda_s) - 0.146$$

Donde:

λ_s : carga superficial con la que opera la laguna (kg DBO5/ha/d)

Carga superficial de la laguna de maduración:

Cálculo de la carga orgánica en condiciones reales de funcionamiento.

$$\lambda_s = \frac{Q * C_a}{S}$$

Donde:

λ_s : carga superficial (kg DBO5/hab/d).

Q: caudal de aguas residuales a tratar (m3/d).

Ca: concentración DBO5 de las aguas afluentes a Laguna Facultativa (kg DBO5/m3).

S: superficie de lámina de agua de la Laguna Facultativa (ha).

Q =	1071.792	m3/día
		mg
Ca =	89.300	DBO5/l
Ca =	0.089300	kg DBO5/m3
S =	4926.434	m2
S =	0.493	ha

$\lambda_s =$	194.28	kg DBO5/hab/d
$K_{20} =$	0.16	d ⁻¹
$K_t =$	0.13	d ⁻¹

c) Coeficiente de decaimiento bacteriano en función de la altura útil del agua en la laguna

El coeficiente de muerte bacteriana a 20°C (K_b) puede determinarse haciendo uso de la expresión propuesta por Von Sperling (2016).

$$K_b = 0.549 * h^{-1.456}$$

Donde:

$h =$ Profundidad efectiva de la laguna (m)

$$h = \boxed{1.60} \text{ m}$$

$$K_b = \boxed{0.28} \text{ día}^{-1} \quad \text{Coeficiente de decaimiento bacteriano a 20°C}$$

El autor aconseja que el valor que se obtenga de K_b se reduzca del orden de un 5% a 15% en el caso de las lagunas Facultativas, y que se incremente en la misma proporción, en el caso de las lagunas de Maduración.

Reducción= %

Kb = día⁻¹ Coeficiente de decaimiento bacteriano a 20°C

Para corregir el valor de Kb en función de la temperatura se emplea la expresión.

$$K_{bT} = K_{b20} * \theta^{(T-20)}$$

Donde:

K_{bT} = Coeficiente de muerte bacteriana a la temperatura "T" (d⁻¹)

θ = Coeficiente de temperatura
(Suele adoptar un valor 1.07, Von Sperling y Chernicharo, 2005).

T = Temperatura media del agua en el mes más frío (°C)

T = °C

Kb = día⁻¹

El cálculo se repite para los caudales restantes, los resultados obtenidos se los adjunta en una tabla resumen:

Tabla 4.78. Resultados en laguna de maduración I

Laguna de Maduración I							
Caudales (l/s)		Tiempo de retención hidráulica (días)	Carga Superficial (kg DBO5/hab/d)	numero de coliformes afluente (NMP/100ml)	numero de coliformes efluente (NMP/100ml)	Eficiencia de remoción coliformes (%)	Tasa constante de primer orden para remoción de bacterias(día ⁻¹)
Mínimo	24.81	5.2	194.28	2.30E+08	4.30E+06	98.13	10.19
Medio	29.28	4.4	256.71	7.78E+07	1.74E+06	97.76	10.02
Máximo	39.80	3.2	387.92	1.10E+06	4.60E+05	58.18	0.43

Fuente: Elaboración propia.

4.7.5. Cálculo de parámetros de diseño de lagunas de maduración II

Laguna de maduración II

Los parámetros a determinar son:

- Tiempo de retención hidráulica (días)
- Tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias
- Coeficiente de eliminación de la DBO

Se calculará en un solo tren de tratamiento ya que ambos trenes son similares.

Se calcularán los parámetros para caudales aforados mínimo, medio y máximo.

Con caudal mínimo

Con caudal mínimo

Datos

Caudal =	24.81	l/s	
DBO ₅ =	50.60	mg/l	DBO de entrada a laguna de maduración II
Ne =	4.60E+05	NMP/100ml	Coliformes de entrada a lagunas de MADURACIÓN I

Tiempo de retención hidráulico

Caudal de entrada =	24.81	l/s	2143.58	m ³ /día
Número de trenes =	2			
Caudal medio por laguna =	12.41	l/s	1071.79	m ³ /día

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Donde:

TRH: tiempo de retención hidráulica (d).

V: volumen útil de la Laguna Facultativa (m³).

Q: caudal de aguas a tratar (m³/d).

Volumen útil =	5,406.94	m ³
Caudal en cada laguna facultativa =	1071.79	m ³ /día

$$TRH = 5.0 \text{ días}$$

Remoción de Coliformes

Calibración de la Tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias

Método cinético

$$N_e = \frac{N_a}{(1 + K_b * t)}$$

Siendo:

N_a = Numero de coliformes del afluente (NMP/100ml).

N_e = Numero de coliformes del efluente (NMP/100ml).

t = Tiempo de retención (días)

T = Temperatura mínima mensual (°C)

K_b =

N_a =	4.60E+05	NMP/100ml
N_e =	3.21E+04	NMP/100ml
t =	5.0	días
T =	15.07	°C

Despejamos K_b de la formula del MÉTODO CINÉTICO

$$K_b = \frac{\frac{N_a}{N_e} - 1}{t}$$

K_b =	2.64
---------	------

K_b se determina mediante las siguientes formulas :

$$K_b = 2.6 * (1.19)^{(T-20)}$$

K_b =	1.103
---------	-------

Según Mara (1976)

$$K_{cf} = 0.84 * (1.07)^{T-20}$$

$$K_{cf} = \boxed{0.602}$$

Eficiencia de remoción de coliformes:

$$\gamma_c = \frac{N_a - N_e}{N_a} * 100$$

Donde:

rc: rendimiento de eliminación de coliformes (%)

Na: concentración de coniformes en el afluente de la laguna (NMP/100 ml)

Ne: concentración de coliformes en el efluente de la laguna (NMP/100 ml)

$$rc = \boxed{93.02} \%$$

Estimación coeficiente de eliminación de la DBO en lagunas de maduración I

a) Estimación coeficiente de eliminación de la DBO conociendo valores de entrada y salida

Por la geometría típica de las Lagunas Facultativas y de Maduración, salvo que los TRH sean muy altos, en cuyo caso podría ser preferible el modelo de mezcla completa, en general se recomienda utilizar el modelo de flujo disperso. Este modelo especifica que:

$$C_{es} = C_a * \frac{4 * a * e^{\frac{1}{2d}}}{(1 + a)^2 * e^{\frac{a}{2d}} - (1 - a)^2 * e^{\frac{-a}{2d}}}$$

Donde:

Ces: concentración de DBO5 soluble en el efluente de la laguna (mg/L)

Ca: concentración de DBO5 total en el afluente de la laguna (mg/L)

a: coeficiente (adimensional)

e: base de los logaritmos neperianos

Ecuación

50.60	Objetivo
35.10	
0.27	Variable
2.72	
50.60	Ecuación

El número de dispersión “d” se calcula mediante la expresión propuesta por von Sperling (1999):

$$d = \frac{1}{(L/A)}$$

Donde:

L: longitud de la laguna (m)

A: ancho de la laguna (m)

L/A =

L =	82.94	m
A =	59.58	m
L/A =	1.39	
d =	0.72	

a = 0.27 objetivo

El coeficiente “a” se determina mediante la expresión:

$$a = \sqrt{1 + 4K * TRH * d}$$

Donde:

K: coeficiente de eliminación de DBO5 (d-1)

TRH: tiempo de retención hidráulica (d)

d: número de dispersión (adimensional)

Ecuación =

	variable
5.0	
0.72	
0.30	ecuación

K = -0.06 d⁻¹

b) Coeficiente de eliminación de la DBO en lagunas de maduración en función de la temperatura y carga superficial

El coeficiente K se calcula para diferentes temperaturas mediante la expresión:

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)}$$

Donde:

KT: coeficiente de eliminación de DBO5 a la temperatura T (d-1)

K20: constante de reacción a 20 °C (d-1)

θ : coeficiente adimensional, con un valor de 1,035 (Arceivala, 1981)

T: temperatura media del aire en el mes más frío (°C).

T: temperatura media del agua residual en el mes más frío (°C).

1.035
15.07
19.26

En este caso no se aplica la temperatura del aire. En la Tabla 5.6 se relacionan las temperaturas del agua y del aire para las diferentes zonas ecológicas consideradas en los dimensionamientos básicos de esta guía, y que en el caso de que no se disponga de las temperaturas reales, se podrían tomar de referencia para su estimación.

La constante de reacción a 20 °C puede calcularse haciendo uso de la carga superficial con la que opera la laguna, de acuerdo con la ecuación de Arceivala (1981):

$$K_{20} = 0.132 * (\log \lambda_s) - 0.146$$

Donde:

λ_s : carga superficial con la que opera la laguna (kg DBO5/ha/d)

Carga superficial de la laguna de maduración:

Cálculo de la carga orgánica en condiciones reales de funcionamiento.

$$\lambda_s = \frac{Q * C_a}{S}$$

Donde:

λ_s : carga superficial (kg DBO5/ha/d).

Q: caudal de aguas residuales a tratar (m3/d).

Ca: concentración DBO5 de las aguas afluentes a Laguna Facultativa (kg DBO5/m3).

S: superficie de lámina de agua de la Laguna Facultativa (ha).

Q =	1071.792	m3/día
Ca =	50.600	mg DBO5/l
Ca =	0.050600	kg DBO5/m3
S =	4838.648	m2
S =	0.484	ha

$\lambda_s =$	112.08	kg DBO5/hab/d
$K_{20} =$	0.12	d ⁻¹
$K_t =$	0.11	d ⁻¹

c) Coeficiente de decaimiento bacteriano en función de la altura útil del agua en la laguna

El coeficiente de muerte bacteriana a 20°C (K_b) puede determinarse haciendo uso de la expresión propuesta por Von Sperling (2016).

$$K_b = 0.549 * h^{-1.456}$$

Donde:

$h =$ Profundidad efectiva de la laguna (m)

$$h = \boxed{1.60}$$

$$K_b = \boxed{0.28} \text{ día}^{-1} \quad \text{Coeficiente de decaimiento bacteriano a 20°C}$$

El autor aconseja que el valor que se obtenga de K_b se reduzca del orden de un 5% a 15% en el caso de las lagunas Facultativas, y que se incremente en la misma proporción, en el caso de las lagunas de Maduración.

$$\text{Reducción} = \boxed{5} \%$$

$$K_b = \boxed{0.29} \text{ día}^{-1} \quad \text{Coeficiente de decaimiento bacteriano a 20°C}$$

Para corregir el valor de Kb en función de la temperatura se emplea la expresión.

$$K_{bT} = K_{b20} * \theta^{(T-20)}$$

Donde:

K_{bT} = Coeficiente de muerte bacteriana a la temperatura "T" (d⁻¹)

θ = Coeficiente de temperatura
(Suele adoptar un valor 1.07, Von Sperling y Chernicharo, 2005).

T = Temperatura media del agua en el mes más frío (°C)

T = 15.07 °C

K_b = 0.21 día⁻¹

El cálculo se repite para los caudales restantes, los resultados obtenidos se los adjunta en una tabla resumen:

Tabla 4.79. Resultados en laguna de maduración II

Laguna de Maduración II							
Caudales (l/s)		Tiempo de retención hidráulica (días)	Carga Superficial (kg DBO5/hab/d)	numero de coliformes afluente (NMP/100ml)	numero de coliformes efluente (NMP/100ml)	Eficiencia de remoción coliformes (%)	Tasa constante de primer orden para remoción de bacterias(día ⁻¹)
Mínimo	24.81	5.0	112.08	4.60E+05	3.21E+04	93.02	2.64
Medio	29.28	4.3	197.13	1.74E+06	1.69E+05	90.27	2.17
Máximo	39.80	3.1	350.86	4.30E+06	4.30E+05	90.00	2.86

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.Parámetros de lagunas facultativas

El principal objetivo de las lagunas facultativas es la biodegradación, fundamentalmente vía aerobia, de la materia orgánica presente en las aguas residuales a tratar.

5.1.1. Análisis del tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulico varía según el caudal, los resultados obtenidos muestran que varía desde 6.9 hasta 11 días teniendo una media de 9.3 días.

La Guía Técnica para Selección y Diseño de líneas de Tratamiento de Aguas Residuales recomienda tiempos mínimos de retención hidráulica según la zona geográfica:

Altiplano: ≥ 20 días	Valles: ≥ 15 días	Llanos: ≥ 10 días
---	--	--

La ciudad de Warnes corresponde a una zona de llanos. De acuerdo a los resultados obtenidos el valor medio y máximo de tiempo de retención hidráulica son iguales o superiores a 10 días, lo cual es favorable para el tratamiento. Pero también hay instantes en que se presentan caudales máximos donde el tiempo de retención hidráulica es menor a 10 días. En consecuencia, la mayor parte del tiempo se tiene buenas eficiencias de remoción de materia orgánica, pero en algunas situaciones esta eficiencia se ve disminuido tal como lo evidencias el siguiente cuadro de cálculo de eficiencias con valores medidos:

Tabla 5.1. Eficiencia de remocion de DBO₅ En la laguna facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	EFICIENCIA
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	249.34	111.15	55.4%
28/12/2021	355.00	99.50	72.0%
28/12/2021	355.00	89.30	74.8%
23/6/2022			
4/8/2022			
Valor promedio			67.41%

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Análisis de la carga orgánica superficial

La carga orgánica superficial calculada varía desde 248 kg DBO₅/hab/d hasta un valor máximo de 721 kg DBO₅/hab/d, obteniendo un valore medios de 413 kg DBO₅/hab/d.

La Guía Técnica para Selección y Diseño de líneas de Tratamiento de Aguas Residuales recomienda valores, formulas y tablas para obtener la carga orgánica superficial para

lagunas facultativas, estos fueron calculados en este trabajo para una temperatura de 15.1 °C que corresponde al valor medio del mes más frío.

Tabla 5.2. Resultados de carga orgánica superficial

Método	Carga orgánica superficial kg DBO5/hab/d
Yaenz	167.21
McGarry y Pescod	281.4
Mara 1997	167.77

Fuente : Elaboración propia

Tabla 5.2.1. Carga superficial en lagunas facultativas en función de la temperatura

T (°C)	λ_s (kgDBO5/hs/d)	T (°C)	λ_s (kgDBO5/hs/d)
≤ 8	80	17	199
9	89	18	217
10	100	19	235
11	112	20	253
12	124	21	272
13	137	22	291
14	152	23	311
15	167	24	331
16	183	≥ 25	350

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

Comparando resultados se puede ver que en la situación crítica del mes más frío las lagunas facultativas están sobrecargadas y es de esperarse bajas eficiencias. Pero, la mayor parte del tiempo la temperatura en Warnes promedia los 25°C como se puede ver en el siguiente cuadro:

Cuadro 5.3. Temperaturas

Estación: Viru Viru													
Departamento: Santa Cruz de la Sierra													
Temperatura media (°C)													
Temperatura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
Media (°C)	26.5	26.1	25.9	24.5	21.8	20.7	20.4	22.5	24.4	26.0	26.3	26.3	24.28

Fuente: Senamhi

Con estas temperaturas la mayor parte del tiempo las lagunas pueden soportar cargas orgánicas superficiales de 350 kg DBO5/hab/d.

Respecto a este parámetro se puede evidenciar que la laguna facultativa está trabajando a su máxima capacidad e incluso esta sobrecargada en otros momentos. Aun así, las eficiencias atendidas son aceptable. Aumentando el tamaño de las lagunas se podría obtener eficiencias mayores de remoción de carga orgánica si se dispone de terreno dentro del mismo predio, lo cual no es posible en nuestro caso.

5.1.3. Verificación de fórmula de: McGarry y Pescod para predecir la eficiencia de remoción de DBO (%).

La fórmula de McGarry y Pescod para predecir la DBO de salida y la eficiencia de la laguna facultativa utiliza como datos entrada: el caudal, la DBO de entrada, el área de la laguna, todo esto representado por la carga orgánica superficial.

Por otro lado, se determinó la eficiencia con datos medidos de DBO en la entrada y salida de la laguna facultativa.

Para las diferentes mediciones los resultados encontrados son los siguientes:

Tabla 5.4. Eficiencia simulada comparada con eficiencia Real

Eficiencia de remoción DBO simulada mediante fórmula de McGarry y Pescod	Eficiencia de remoción Real de la DBO
85.90%	74.85%
82.20%	67.41%
74.70%	55.42%

Fuente: Elaboración propia

En la comparación de datos se puede observar que la fórmula de McGarry y Pescod sobreestima la eficiencia de remoción de la DBO en la Laguna facultativa, ya que los valores medidos indican eficiencias menores.

Como se vio en los anteriores análisis la laguna está funcionando a su máxima capacidad e incluso un poco superada. Por lo mismo es de esperarse que en condiciones normales las eficiencias reales sean mayores.

En las observaciones se confirma el alto grado que tienen las lagunas facultativas de remover materia orgánica, lo cual concuerda con la bibliografía consultada.

5.1.4. Análisis del coeficiente de decaimiento bacteriano

Se determinó este coeficiente con la eficiencia real obtenida con valores medidos de coliformes fecales en la entrada y salida de la laguna facultativa.

Se compara este valor con el obtenido mediante temperatura y la altura útil de la laguna.

Los resultados se indican en la siguiente tabla:

Tabla 5.5. Coeficiente de decaimiento bacteriano (kb)

	En función de datos medidos	En función de la temperatura	En función de la altura útil del agua en la laguna
Caudales menores	8.5	0.59	0.29
Caudales medios	2.02	0.59	0.29
Caudales máximos	1.36	0.59	0.29

Fuente: Elaboración propia

Los valores experimentales son muy superiores a los obtenidos mediante las fórmulas simplificada que usa temperatura y altura útil del agua.

Se puede observar que este coeficiente en los resultados experimentales es variable por influencia del caudal y la cantidad de coliformes, mientras que en los otros métodos este valor es constante.

La eficiencia de remoción de coliformes fecales medidos afecta grandemente a los resultados ya que los valores medidos de coliformes fecales en la entrada y salida de la laguna son muy variables.

Tabla 5.6. Eficiencia de remoción de coliformes fecales en laguna facultativa

Fecha	Ingreso a Laguna Facultativa mg/L	Salida de Laguna Facultativa mg/L	Eficiencia
22/12/2020			

17/2/2021			
2/8/2021	2.10E+10	2.30E+08	98.90%
28/12/2021	2.40E+07	1.10E+06	95.42%
28/12/2021	2.40E+07	2.40E+06	90.00%
23/6/2022			
4/8/2022			
MEDIA	7.02E+09	7.78E+07	98.9%

Fuente: Elaboracion propia

Lo que sí se puede evidenciar es un alto contenido de coliformes en la entrada y que a pesar de la alta eficiencia de remoción de la laguna facultativa no se logra reducir de gran manera, necesariamente necesita otros procesos como son las lagunas de maduración y desinfección.

5.2. Parámetros de lagunas de maduración I

En este tipo de lagunas principalmente se alcanza porcentajes muy elevados de eliminación de organismo patógenos.

5.2.1. Tiempo de retención hidráulico

Los tiempos de retención hidráulica obtenidos en las primeras lagunas de maduración muestran que varía desde 3.2 hasta 5.2 días con una media de 4.4 días

En la Guía Técnica para Selección y Diseño de líneas de Tratamiento de Aguas Residuales menciona que la OMS (1987) recomienda un TRH de 5 días en el caso de que se haga uso de una única laguna de maduración y, para el caso de Warnes donde se tiene 2 lagunas de maduración en serie la OMS recomienda que el TRH no sean menor a 3 días.

Los resultados experimentales obtenidos están por encima de los 3 días, por lo tanto, cumplen con esta recomendación y es de esperarse altos grados de eficiencia de remoción de organismos patógenos. Esto no se verifica del todo en la siguiente tabla de eficiencias experimentales obtenidos con valores medidos de coliformes en la entrada y salida de las lagunas de maduración I, se tiene altas y bajas eficiencias de remoción de coliformes.

Tabla 5.7. Eficiencia de remoción de coliformes fecales en laguna de maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
-------	---------------------------------------	---------------------------------------	------------

22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	2.30E+08	4.30E+06	98.1%
28/12/2021	1.10E+06	4.60E+05	58.2%
28/12/2021	2.40E+06	4.60E+05	80.8%
23/6/2022			
4/8/2022			
MEDIA	7.78E+07	1.74E+06	97.8%

Fuente: Elaboración Propia

5.2.2. Tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias

Se obtuvo la tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias de manera experimental con valores medidos de coliformes fecales en la entrada y salida de la laguna de maduración I

Se compara este valor con los obtenidos mediante temperatura del agua en la laguna.

Los resultados se indican en la siguiente tabla:

Tabla 5.8. Tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias (kb)

	En función de datos medidos	En función de la temperatura	En función de la temperatura (Marat)
Caudales menores	10.19	1.103	0.602
Caudales medios	10.02	1.103	0.602
Caudales máximos	0.43	1.103	0.602

Fuente: Elaboración Propia

Los valores experimentales difieren bastante con los valores obtenidos mediante las fórmulas simplificada que usa solo temperatura.

Se puede observar que este coeficiente en los resultados experimentales es variable por influencia tiempo de retención hidráulico, del caudal y la cantidad de coliformes, mientras que en los otros métodos este valor es constante.

La eficiencia de remoción de coliformes fecales medidos afecta grandemente a los resultados ya que los valores medidos de coliformes fecales en la entrada y salida de la laguna son muy variables. Para tener valores más concluyentes de la Tasa constante de primer orden para la

remoción de bacterias se debería de contar con mayor cantidad de datos de coliformes y caudales.

5.2.3. Coeficiente de eliminación de la DBO en lagunas de maduración I

Se obtuvo este coeficiente con datos experimentales de DBO en la entrada y salida, tiempo de retención hidráulica y geometría de la laguna.

Se compara este valor con el obtenido mediante temperatura, carga superficial y la altura útil de la laguna.

Los resultados se indican en la siguiente tabla:

Tabla 5.9. Coeficiente de eliminación de la DBO en la laguna de maduración II

	En función de datos medidos	En función de la temperatura	En función de la altura útil del agua en la laguna
Caudales menores	0.16	0.13	0.21
Caudales medios	0.08	0.15	0.21
Caudales máximos	0.044	0.17	0.21

Fuente: Elaboración propia

Los valores experimentales son parecidos a los obtenidos mediante las fórmulas simplificada que usa temperatura, carga superficial y altura útil del agua.

En los dos primeros métodos este coeficiente es variable

Un valor medio de predicción de la DBO de salida en la primera laguna de maduración es de 0.09 días⁻¹

Con este valor las eficiencias esperadas rondaran el 26%.

Tabla 5.10. Eficiencia de remoción de DBO₅ en laguna de maduración I

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración I mg/L	Salida de Laguna de Maduración I mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	111.15	98.74	11.2%
28/12/2021	99.50	76.90	22.7%
28/12/2021	89.30	50.60	43.3%
23/6/2022			

4/8/2022			
Valor Promedio			25.74%

Fuente: Elaboración propia

No es de esperar que una laguna de maduración tenga un alto grado de remoción de DBO, ya que su función principal es la de reducir los microorganismos patógenos.

5.3. Parámetros de lagunas de maduración II

5.3.1. Tiempo de retención hidráulico

Los tiempos de retención hidráulica obtenidos en segunda laguna de maduración muestran que varía desde 3.2 hasta 5.2 días con una media de 4.4 días

En la Guía Técnica para Selección y Diseño de líneas de Tratamiento de Aguas Residuales menciona que la OMS (1987) recomienda para el caso de Warnes donde se tiene 2 lagunas de maduración en serie a que el TRH no sean menor a 3 días en cada laguna

Los resultados experimentales obtenidos están por encima de los 3 días, por lo tanto, cumplen con esta recomendación y es de esperarse altos grados de eficiencia de remoción de organismos patógenos. Esto se verifica en la siguiente tabla de eficiencias experimentales obtenidos con valores medidos de coliformes en la entrada y salida de las lagunas de maduración II, donde se tiene altas eficiencias de remoción de coliformes, todas por encima del 90%.

No obstante, el buen desempeño de las lagunas en la reducción de los coliformes no se llega a reducir por debajo de los 1000 NMP/100ml. Es necesario incluir un sistema de desinfección después de las algunas con lo cual se podrá cumplir con esta exigencia.

Tabla 5.11. Eficiencia de remosion de Coliformes Fecales en Laguna de Maduracion II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	4.30E+06	4.30E+05	90.00%
28/12/2021	4.60E+05	4.60E+04	90.00%
28/12/2021	4.60E+05	3.21E+04	93.02%
23/6/2022			
4/8/2022			

Media	1.74E+06	1.69E+05	90.27%
--------------	----------	----------	--------

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias (K_b)

Se obtuvo la tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias de manera experimental con valores medidos de coliformes fecales en la entrada y salida de la laguna de maduración II

Se compara este valor con los obtenidos mediante temperatura del agua en la laguna.

Los resultados se indican en la siguiente tabla:

Tabla5.12. Tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias (K_b)

	En función de datos medidos	En función de la temperatura	En función de la temperatura (Marat)
Caudales menores	2.64	1.103	0.602
Caudales medios	2.17	1.103	0.602
Caudales máximos	2.86	1.103	0.602

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos en función de la temperatura con ecuaciones simplificadas son menores a los valores experimentales, pero con poca diferencia.

En base a las observaciones experimentales se recomienda un valor para la tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias $K_b = 2.5$. este valor puede ser usado en la siguiente expresión para predecir los coliformes fecales en la salida de la laguna de maduración II conociendo el valor de entrada y su tiempo de retención hidráulico.

$$N_e = \frac{N_a}{(1 + K_b * t)}$$

Es recomendable contar con más mediciones de coliformes fecales en la entrada y salida de la laguna de maduración II, además contar con el caudal y tiempo de retención hidráulico, con los cuales se podrá ajustar mejor el K_b .

5.3.3. Coeficiente de eliminación de la DBO en lagunas de maduración II

También se determinó este coeficiente para la laguna de maduración II con datos experimentales de DBO en la entrada y salida, tiempo de retención hidráulica y geometría de la laguna.

Se compara este valor con el obtenido mediante temperatura, carga superficial y la altura útil de la laguna.

Los resultados se indican en la siguiente tabla:

Tabla 5.13. Coeficiente de eliminación de la DBO en la laguna de maduración II

	En función de datos medidos	En función de la temperatura	En función de la altura útil del agua en la laguna
Caudales menores	-0.06	0.1	0.21
Caudales medios	0.03	0.13	0.21
Caudales máximos	0	0.16	0.21

Fuente: Elaboración propia

Los valores experimentales son variables y no indican un patrón de comportamiento, no son parecidos a los obtenidos mediante las fórmulas simplificada que usa temperatura, carga superficial y altura útil del agua.

Se observa que este valor es variable en los dos primeros métodos. Para tener resultados más concluyentes se necesita más mediciones.

Un valor medio referencial para la predicción de la DBO de salida en la segunda laguna de maduración es de 0.03 días⁻¹

Con este valor las eficiencias esperadas rondaran el 16%.

Tabla 5.14. Eficiencia de remoción de DBO₅ en laguna de maduración II

Fecha	Ingreso a Laguna de Maduración II mg/L	Salida de Laguna de Maduración II mg/L	Eficiencia
22/12/2020			
17/2/2021			
2/8/2021	98.74	98.74	0.0%
28/12/2021	76.90	63.30	17.7%
28/12/2021	50.60	35.10	30.6%

23/6/2022			
4/8/2022			
Valor Promedio			16.11%

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en la primera laguna de maduración no es de esperar que una laguna de maduración II se obtenga un alto grado de remoción de DBO₅, ya que su función principal es la de reducir los microorganismos patógenos.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.Conclusiones

- La relación DBO/DQO con valores de ingreso a la PTAR de Warnes nos indica que se trata de aguas residuales muy biodegradables, se verifica que son aguas residuales domésticas.
- La calidad del agua entrante es muy característico de aguas residuales domésticas, los parámetros indican una contaminación media tendiente a alta.
- Los parámetros indicativos de contaminación por metales pesados son nulos, si bien hay contenidos mínimos de algunos de estos, ninguno supera los límites permisibles.
- Por la comparación entre caudal aforado y caudal de diseño calculado se afirma que las lagunas están funcionando a su máxima capacidad. Esto también se corrobora con los resultados obtenidos de la carga orgánica superficial.
- De acuerdo a los resultados de laboratorio de calidad de aguas el cuerpo receptor Arroyo Colorado, en los últimos años presenta valores de los parámetros de DBO y DQO y otros que superan los límites permisibles de LEY 1333 ANEXO A-1 clase D, antes y después de la confluencia con la descarga de la PTAR. Pero en otros parámetros como ser: coliformes, aceite, grasas, sulfuros, amoníaco, plomo y antimonio no sobrepasan los límites permisibles. Por lo tanto, para mejorar el rendimiento en la remoción de estos parámetros lo recomendable sería cambiar la tecnología de tratamiento con lagunas aireadas o lodos activados, dentro del mismo predio, para poder obtener una calidad de agua tratada que cumpla con el ANEXO A-1 clase D de la LEY 1333, ya que no se cuenta con más superficie de terreno para ampliar las dimensiones de las actuales lagunas en la planta de tratamiento.

-

❖ **En la laguna facultativa.**

- De acuerdo a los resultados obtenidos el valor medio y máximo de tiempo de retención hidráulica es de 10 días, lo cual es favorable para el tratamiento obteniéndose eficiencias de remoción de DBO del 80%. Pero también hay instantes en que se presentan caudales superiores al medio, donde el tiempo de retención hidráulica es menor a 10 días. En consecuencia, eficiencia en esos instantes decae hasta un 55%.
- La carga orgánica superficial calculada obtenida tiene un valor medio de 413 kg DBO₅/hab/d. Pero la temperatura media que tiene Warnes de 25°C esta laguna facultativa puede trabajar con alta eficiencia hasta 350 kg DBO₅/hab/d. Respecto a este parámetro se puede evidenciar que la laguna facultativa está trabajando a su máxima capacidad e incluso esta sobrecargada en otros momentos. Aun así, las eficiencias obtenidas son aceptables.
- La fórmula de McGarry y Pescod para predecir la DBO de salida y la eficiencia de la laguna facultativa se puede observar que sobreestima la eficiencia de remoción de la DBO en la Laguna facultativa, ya que los valores medidos indican eficiencias menores.
- Los valores del coeficiente de decaimiento bacteriano que se usa para predecir la remoción de coliformes fecales dieron resultados experimentales muy variable y de poca confianza, para su determinación se requiere más mediciones.

❖ **En la laguna de maduración I.**

- Los tiempos de retención hidráulica obtenidos en la primera laguna de maduración muestran que varía desde 3.2 hasta 5.2 días con una media de 4.4 días, todos están por encima de los 3 días, por lo tanto, cumplen las recomendaciones de funcionamiento y es de esperarse altos grados de eficiencia de remoción de organismos patógenos.
- La tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias obtenida experimental difieren bastante con los valores obtenidos mediante las fórmulas simplificada que usa solo temperatura. Para tener valores más concluyentes de la tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias se debería de contar con mayor cantidad de datos de coliformes y caudales.

- Los valores experimentales Coeficiente de eliminación de la DBO en la laguna de maduración I son parecidos a los obtenidos mediante las fórmulas simplificada que usa temperatura, carga superficial y altura útil del agua. Un valor medio de predicción de la DBO de salida en la primera laguna de maduración es de 0.09 días⁻¹.

❖ **En laguna de maduración II.**

- Los tiempos de retención hidráulica obtenidos en la segunda laguna de maduración muestran que varía desde 3.2 hasta 5.2 días con una media de 4.4 días, todas están por encima de 3 días, cumpliendo con las recomendaciones de diseño y operación. Es de esperarse altos grados de eficiencia de remoción de organismos patógenos. Esto se verifica en las eficiencias experimentales obtenidos.
- La tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias de manera experimental difiere un poco con los valores obtenidos en función de la temperatura con ecuaciones simplificadas. En base a las observaciones experimentales se recomienda un valor para la tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias $K_b = 2.5$. este valor puede ser usado para predecir los coliformes fecales en la salida de la laguna de maduración II.
- Los valores experimentales obtenidos del coeficiente de eliminación de la DBO en lagunas de maduración son variables y no indican un patrón de comportamiento, no son parecidos a los obtenidos mediante las fórmulas simplificadas. Un valor medio referencial para la predicción de la DBO de salida en la segunda laguna de maduración es de 0.03 días⁻¹. Para tener resultados más concluyentes se necesita más mediciones.

❖ **En todo el sistema: tren de tratamiento: laguna facultativa – laguna de maduración I – laguna de maduración II:**

Funcionando las lagunas al máximo de su capacidad se tiene que:

- La eficiencia media de remoción de la DBO es de: 80 %. En mayor grado reduce este parámetro las lagunas facultativas con un 67 % y en menor grado las lagunas de maduración con una media del 21%. Esto concuerda con la teoría.

- La eficiencia media de remoción de la DQO es de: 67 %. En mayor grado reduce este parámetro en las lagunas facultativas con un 52 % y en menor grado en las lagunas de maduración con una media del 17%.
- La eficiencia media de remoción de la SST es de: 60 %. Este parámetro reduce en las lagunas facultativas en un 42 % también 42% en la primera laguna de maduración y 36 % en la segunda laguna de maduración.
- Que el pH aumenta en el transcurso del tratamiento.
- La eficiencia media de remoción de aceites y grasas es de: 97%. La remoción de este parámetro se da sobre todo en la laguna facultativa y en menor grado en las lagunas de maduración.
- La eficiencia media de remoción de fósforo es de: 34%. En mayor porcentaje reduce en la laguna facultativa.
- La eficiencia media de remoción de amonio es de: 61%. En mayor porcentaje reduce en la laguna facultativa.
- La eficiencia media de remoción de nitrógeno total es de: 46 %. En mayor porcentaje reduce en la laguna facultativa.
- También se evidencia que las lagunas pueden remover el hierro con una eficiencia media de 83%.
- El sistema tiene un alto de remoción de coliformes fecales y totales superando en ambos casos el 99 %. Pero el valor de entrada es muy alto por lo que aun con estas eficiencias no se logra bajar por debajo del requerido.
- Como conclusión final podemos afirmar que las lagunas de oxidación siguen siendo una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales de origen domestico sobre todo en lugares cálidos y con disponibilidad de terrenos, ya que las deficiencias observadas en la PTAR de Warnes son muy aceptables. Esto debe ir acompañado con un buen cálculo usando los parámetros de diseño adecuados. Como toda planta de tratamiento esta debes estar bien operada y mantenida para garantizar altos grados de purificación del agua.

6.2.Recomendaciones

- Para reducir los coliformes fecales por debajo de lo exigido por la normativa se recomienda incluir al tren de tratamiento un sistema de desinfección por cloración o rayos UV. Porque no está cumpliendo con el límite permisible para este parámetro que indica la LEY 1333 ANEXO A-1 clase D.
- Se recomienda hacer un monitoreo constante en las lagunas con mediciones de caudales y calidad del agua, lo que permitirá una toma de decisiones en la operación más efectiva y además estos datos permitirán realizar más investigaciones.
- Se recomienda estudiar con más profundidad los coeficientes de eliminación de la DBO y la tasa constante de primer orden para la remoción de bacterias. Esto permitirá obtener predicciones más acertadas de la eliminación de la DBO y coliformes.
- Las eficiencias de remoción que alcanza esta planta de tratamiento son de consideración y para tomar en cuenta, demuestran el poder de tratamiento que tienen la combinación de lagunas facultativas y lagunas de maduración. Con un buen diseño, una correcta operación y mantenimiento este tipo de tratamiento se puede usar con confianza en proyectos o plantas de tratamientos que descargan a cuerpos de agua no clasificados en los cuales deben cumplir el Anexo A-2 del RMCH de la ley 133.
- Con base en los resultados alcanzados, además teniendo en cuenta que no hay más espacio disponible para la ampliación de las actuales lagunas y siendo que la descarga sea en un cauce clasificado en Categoría D, se deberá incluir para cumplir con las exigencias otros procesos de tratamiento como ser: reactores UASB que ocupa poco espacio y es factible incorporarlo a los procesos actuales al inicio, también se podrá incluir aireadores en las lagunas facultativas y de maduración, desinfección para reducir los coliformes y filtro de arena para reducir la turbiedad que produce los SST.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000).** *Sistemas de tratamiento con lagunas*. En E. Ariza H. (Ed.), Colombia: Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones (pp.493). THE MCGRAW-HILL COMPANIES, INC.
- **Fundación Pública Andaluza Centro De Las Nuevas Tecnologías Del Agua (2021).** *Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales*. Bolivia.
- **H. Ratsey.** *Upgrading waste stabilisation ponds: Reviewing the options*. Water Intell. Online, vol. 6, 2015.
- **LEY No. 1333 LEY DEL MEDIO AMBIENTE (1992).** Publicada en la Gaceta Oficial de Bolivia.
- **M. von Sperling and C. A. de L. Chernicharo,** *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. 1st ed. Belo Horizonte, Brazil: IWA Publishing, 2005.
- **M. F. Espinosa, M. Von Sperling, and M. E. Verbyla.** *Performance evaluation of 388 full-scale waste stabilization pond systems with seven different configurations*. Water Sci. Technol., vol. 75, 2017.
- **Mara, D. D. y Pearson, H. W. (1998).** *Design Manual for Waste Stabilization Ponds in Mediterranean Countries*. Banco Europeo de Inversiones, Lagoon Technology International Ltd.
- **Oakley, S.M. (2005).** *Lagunas de estabilización en honduras. Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad*. USA
- **Romero, J. Alberto (1999).** *Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño*. 1ra Edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.
- **Silva, J. Alejandro (2004).** *Evaluación y rediseño del sistema de lagunas de estabilización de la universidad de Piura*. Universidad de Piura. Lima, Perú.
- **Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades.** Disponible en: LAGUNA, DE ESTABILIZACION (LAGUNAS DE OXIDACION) (uson.mx)

