



**Facultad de ingeniería
Departamento de ciencias de la ingeniería para la sostenibilidad
Carrera de ingeniería ambiental**

**Proyecto de título II
EVALUACIÓN DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS RURALES EN LA COMUNA LLAY-
LLAY**

Para optar al título Ingeniero Ambiental
Y al grado académico de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería

**Rodrigo Nicolás Hidalgo Montecino
Profesora guía: Dra. Estela Tapia Venegas**

Valparaíso, Chile

Julio 2024

Agradecimientos

El desarrollo del presente proyecto representa un esfuerzo y cooperación continuo no solo de quien presenta el proyecto, sino también de todas las personas detrás de cada operación y análisis, es por esto, que en agradecimiento, quisiera destacar la constante presencia y apoyo de mi profesora guía Estela Tapia, quien me guio en distintos puntos del desarrollo del proyecto, siendo una parte activa de la misma y otorgado los recursos y habilidades necesarias para llevar a cabo el análisis tanto del diseño como la caracterización de las muestras obtenidas. También quisiera destacar el constante apoyo de la dirección de obras municipales de Llay Llay, quienes facilitaron no sólo la documentación necesaria, sino que fueron una parte fundamental no solo para el desarrollo del proyecto presentado, sino que han demostrado ser una herramienta fundamental para el correcto funcionamiento de las APR presentes en la comuna. Su constante presencia no solo facilitó la toma de muestras, sino también permitió llevar a cabo soluciones propuestas en una beneficiosa colaboración para mejorar la eficiencia en la operación de la planta de tratamiento de aguas Las Palmas. Por otra parte, una labor destacable y a quien corresponde memorar, son los operarios de las plantas de tratamiento Las Palmas, Osvaldo... y Miro... quienes llevan a cabo el funcionamiento correcto de las plantas dentro de lo posible que estas permitan, Osvaldo no solo resultó ser una pieza fundamental debido a su conocimiento técnico en el funcionamiento de las plantas de tratamiento, sino que demostró una expertíz en el tema que es digno de admirar y resultó en una inspiración personal.

Por último, quisiera agradecer a mis padres, quienes desde el comienzo de mi desarrollo académico universitario han resultado en un valioso apoyo, quienes comprenden mis falencias y fortalezas, quienes han confiado en mis capacidades y quienes me impulsaron a seguir adelante cuando incluso yo mismo dudaba de mis capacidades. A Carolina, por ser mi una compañera invaluable durante el desarrollo de este proyecto y darme la razón de esperar los días por venir.

Resumen

A continuación, se presenta el trabajo de proyecto de título II para optar al título de ingeniero ambiental del alumno Rodrigo Nicolás Hidalgo Montecino. El proyecto se titula "Evaluación de un sistema de tratamiento de un agua residual doméstica" y cuyo objetivo fue evaluar el funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas rural de la comuna de Llay-Llay, Quinta región. Para llevar a cabo este proyecto se siguió una metodología basada en la toma de muestra del agua residual tanto del influente como efluente de la planta de tratamiento, análisis y caracterización de las muestras siguiendo normativas establecidas, comparación con los decretos de emisión asociados, análisis del diseño de la planta, y evidencia de problemas y soluciones.

Los resultados son evidentes, las caracterizaciones de las muestras demostraron fallas tanto en la etapa de clarificado mediante la sedimentación, como en la desinfección del efluente. Los sólidos presentes en el efluente cuentan con una concentración de 1320 mg/L. Por otra parte, la etapa de desinfección se mostraba deficiente, debido a la presencia de coliformes fecales en las muestras analizadas. Ambos problemas generan que se sobrepase el límite máximo permitido por el decreto supremo 90 en su tabla 1. En consecuencia, de los problemas encontrados, se plantearon posibles soluciones para mejorar los aspectos deficientes de la planta de tratamiento de aguas Las Palmas. Por último, se reveló un problema en la concentración máxima de nitrógeno total en el efluente, por lo cual se propuso un sistema de lodos activos-nitrificación de fango único con el fin de alcanzar los niveles de remoción adecuados para cumplir con la norma de emisión.

Con el presente proyecto se logró determinar puntos críticos de las plantas de tratamientos para en un futuro poder desarrollar mejoras que permitan una mayor eficiencia en la planta evaluada.

Abstract

Below is the title II project work to qualify for the title of environmental engineer of the student Rodrigo Nicolás Hidalgo Montecino. The project is titled "Evaluation of a domestic wastewater treatment system" and its objective was to evaluate the operation of a rural domestic wastewater treatment plant in the commune of Llay-Llay, Fifth region. To carry out this project, a methodology was followed based on sampling the wastewater from both the influent and effluent of the treatment plant, analysis and characterization of the samples following established regulations, comparison with the associated emission decrees, analysis of the plant layout, and evidence of problems and solutions.

The results are evident, the characterization of the samples demonstrated failures both in the clarification stage through sedimentation and in the disinfection of the effluent. The solids present in the effluent have a concentration of 1320 mg/L. On the other hand, the disinfection stage was deficient, due to the presence of fecal coliforms in the analyzed samples. Both failures generate failures that exceed the maximum limit allowed by Supreme Decree 90 in Table 1. As a result of the failures found, possible solutions were proposed to improve the deficient aspects of the Las Palmas water treatment plant. Finally, a failure was revealed in the maximum concentration of total nitrogen in the effluent, for which a single sludge nitrification/denitrification system was proposed in order to achieve the appropriate removal levels to comply with the emission standard

It was expected that with this project it has been possible to determine critical points of the treatment plants in order to be able to develop improvements in the future that allow greater efficiency in the evaluated plants.

Índice

Introducción.....	7
1.1 Tipos de aguas residuales.....	9
1.2 Caracterización de aguas residuales domésticas.....	9
Panorama actual en Chile en zonas rurales.....	10
1.3 Tratamiento de aguas residuales domésticas urbanas y rurales en Chile.....	12
Tratamiento de aguas domésticas convencional.....	12
Descripción de los procesos de fangos activos.....	15
Alternativas de tratamiento de aguas domésticas.....	17
Aireación extendida.....	19
1.4 Planteamiento del problema.....	23
2. Marco normativo: Normativa chilena relacionadas con abastecimiento y descarga de aguas domésticas rurales.....	24
2.1 Ley 20998 Servicios sanitarios rurales.....	26
2.2 Decreto supremo 90.....	27
3. Objetivos.....	29
4. Metodología.....	30
4.1 Localización de Planta de tratamiento de aguas residuales rurales.....	30
4.2 Cuerpo receptor: Estero Vichiculen.....	31

4.3 Caracterización de influente y efluente.....	32
4.4 Estudio del diseño y operación de la planta de tratamiento.....	37
4.5 Mejoras operacionales.....	38
5. Resultados.....	39
5.1 Caracterización de aguas residuales influente y efluente.....	39
5.2 Análisis de diseño.....	44
5.3 Identificación de problemas y posibles soluciones.....	46
6. Conclusión.....	52
Referencias.....	53
Apéndice.....	55

Introducción

El agua es una matriz la cual permite realizar actividades tanto industriales como recreativas, su vínculo con el humano es fundamental. El agua no solo representa un valor como recurso, sino que también es una de las matrices en donde se puede encontrar una mayor cantidad de biodiversidad, biodiversidad que resulta importante para mantener un equilibrio en los servicios ecosistémicos y cadenas tróficas. (Segui, s. f.)

La OMS establece el agua como un problema prioritario, y entre las principales dificultades que se señalan se encuentra el porcentaje de inaccesibilidad a agua, el cual en 2021 2000 millones de personas permanecían con escasez hídrica, problema derivado tanto del crecimiento demográfico como del cambio climático (World Health Organization: WHO, 2023). Otro punto destacado es la calidad de agua, el cual por problemas de manejo en el tratamiento de aguas residuales, llegan a contaminar los cauces y cuerpos receptores superando con creces el nivel de autodepuración de los mismos y dejando fuentes de aguas totalmente inutilizables en donde dependiendo de la procedencia del agua descargada, puede llegar a contaminar el cauce tanto por materia orgánica y excretas hasta incluso dejar el agua con altos niveles toxicidad derivado de químicos arsénicos, fluoruros y nitratos.(Baeza, 2020)

La forma de manejar el agua es muy distinta dependiendo de la zona en donde se utilice, no se aplica el mismo tratamiento para un agua proveniente de una zona industrial destinada a la refinería como a un agua proveniente de una granja porcina, estas aguas cuentan con características y composiciones muy distintas, de igual manera, un agua proveniente de una zona urbana será muy distinta de un agua proveniente de una zona rural, tanto de su obtención como de la complejidad de componentes encontradas en el agua.

Durante el avance del presente informe, se entregará información tanto de las cargas que poseen las aguas residuales domésticas, como los distintos tipos de tratamientos a los que se pueden someter estas aguas, con el fin de tener una idea clara de los procedimientos que ocurren en estas, una vez entendido los procesos detrás de cada etapa, se analizará el diseño y operación de una planta de tratamiento de aguas, específicamente, la planta de tratamiento de aguas residuales Las Palmas, con el objetivo de determinar la eficiencia del tratamiento y vislumbrar ciertas fallas que puede poseer esta planta de tratamiento en caso de que las tuviera, al mismo tiempo que se barajan opciones para solucionar dichos problemas.

¿Cuál es el destino que sigue el agua una vez utilizada? ¿Qué procesos ocurren en estas aguas? Son interrogantes bastante comunes que de seguro todos nos hemos planteado alguna vez en nuestras vidas. La realidad es que esto depende mucho tanto de la situación geográfica y las legislaciones de cada país. Primeramente se debe entender cómo se define el agua en Chile, bajo esto, existe el Decreto con Fuerza de Ley 1122 (DFL 1122), el cual fija el código de aguas y que en su artículo 5 establece: Las aguas son bienes nacionales de uso público y se otorga a los particulares el derecho de aprovechamiento de ellas, en conformidad a las disposiciones del presente código(DFL 1122). El

agua puede utilizarse por cualquier privado, a medida que esto se realiza, se van teniendo aguas residuales, ya sea provenientes de industrias, municipales o domésticas. Cada una cuenta con sus propias naturalezas en términos de carga orgánica o contaminantes emergentes. Centrados en la pregunta “¿qué ocurre con las aguas que yo utilizo?”, nuestras aguas serán domésticas, y el tratamiento deben ser asegurados por el estado, el tratamiento es concesionado a una empresa privada destinada a la distribución de agua y tratamiento de aguas, o a Aguas Potables Rurales (APR), las cuales son comitivas que se encuentran legislados bajo la ley 20998 y permite que la distribución y tratamiento de estas aguas quede en manos de vecinos pertenecientes a una comitiva. Una vez entendido cómo funciona este marco normativo, nos trasladaremos a una zona en específico, la comuna de Llay Llay en la localidad de Las Palmas. Esta localidad se encuentra bajo el funcionamiento de una APR y para su tratamiento, cuenta con una planta de tratamiento de aguas. Las plantas de tratamiento de aguas, como su nombre lo indica, son plantas destinadas a adecuar las aguas, para que estas puedan ser dispuestos a algún cuerpo receptor, como puede ser un río, un estero o una laguna, ¿pero adecuarlas hasta qué punto es suficiente?, depende, ya que en términos ambientales, se deberían tomar muchos factores como la capacidad de autodepuración del cuerpo receptor. El decreto supremo 90 (ds 90) establece normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (decreto supremo 90). Las plantas de tratamiento deberían siempre adecuar las aguas hasta el punto que lo exija la normativa, por lo que la planta de tratamiento Las Palmas deberá contar con un sistema que adecue las aguas hasta el punto que el decreto supremo 90 lo demande. A medida que avanza el informe se entregará información sobre las cargas que recibe la planta de tratamiento, el funcionamiento del sistema que utilizan, y se identificarán fallas que pueda poseer dicha planta de tratamiento.

1.1 Tipos de aguas residuales

Debido a la diversidad de usos, la locación geográfica y densidad demográfica, el agua residual cuenta con características distintas tanto cuantitativa como cualitativamente dependiendo de los aspectos anteriormente mencionados, para una mejor precisión en los tipos de tratamientos, se pueden considerar aguas provenientes de tres tipos de usos:

- **Agraria:** Agua proveniente principalmente de zonas rurales destinadas a actividades agrícolas y agrarias. Debido a la naturaleza de las actividades, es común que estas aguas cuenten con una carga de materia orgánica, nitrógeno y fósforo bastante elevada.
- **Doméstica:** Agua residual proveniente principalmente de zonas urbanas donde la densidad poblacional es mayor, y en general presentan unas fluctuaciones en su uso de entre 150L/hab/día a 490L/hab/día. Y con un 80% destinado a la limpieza y un 20% al regadío. Dentro de las aguas domésticas se destacan dos tipos de aguas residuales, aguas grises y negras. Las aguas grises son aguas contaminadas con distintos tipos de detergentes, lavaplatos y productos destinados en su mayoría al aseo y desinfección del domicilio. Por otra parte, las aguas negras son aguas que cuentan con excretas humanas y que provienen de los inodoros y urinarios, y suelen venir acompañadas con un mayor nivel de materia orgánica y bacterias fecales.
- **Industrial:** Derivada de los distintos procesos productivos que puede presentar tanto la obtención de una materia prima como la manufacturación de un producto. Debido a la variedad procesos industriales que puede presentar un proceso productivo, estas aguas suelen ser más difíciles de caracterizar, sin embargo, el principal uso que se suele dar al agua en procesos productivos es la de enfriamiento, lo que, por consiguiente, convierte la temperatura en uno de los parámetros más importantes al momento de considerar trabajar con aguas de uso industrial. También en ocasiones se utilizan químicos que pueden aumentar el nivel de toxicidad del agua y generar contaminantes emergentes los cuales pueden llegar a necesitar tratamientos específicos. (Zarza, s. f.)

1.2 Caracterización de aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas son uno de las principales fuentes del influente recibido por las plantas de tratamiento, Estas generalmente provienen de aguas de cocina, aguas de baño y aguas de lavado locales.

Años de seguimientos y análisis a las aguas domésticas han estandarizado los contaminantes y características más predominantes en este tipo de fuentes, entre los que destacan los parámetros presentes en la tabla 1.

Tabla 1 Contaminantes de aguas residuales domésticas.

Componente	Contaminante más importante
Materia fecal	Grasas y aceites
Productos domésticos de lavado	Materia orgánica
	Gérmenes patógenos

Esta cuenta con tres niveles de concentraciones en sus distintos parámetros que pueden variar dependiendo de variables como densidad demográfica, caudal y la forma de recibir el efluente (cañería o camiones recolectores). En la tabla 2 se establecen las concentraciones de las principales características a considerar.

Tabla 2 Composición de las aguas negras residuales domésticas.

	Concentración (mg/L)		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos totales	1200	700	350
Sólidos suspendidos	350	200	100
DBO ₅	300	200	100
DQO	1000	500	250
Nitrógeno total	85	40	20
Amoníaco	50	25	12
Fósforo	20	10	6
Grasas	150	100	50

Panorama actual en Chile en zonas rurales

Chile presenta un gran abanico de climas y ambientes, por ende, establece un gran desafío al momento de realizar una correcta distribución de este recurso hídrico, al mismo tiempo, por su geografía rodeada de montañas, entrega grandes oportunidades debido principalmente a los diferentes cuerpos de agua que reciben este recurso de aguas tanto pluviales como niveles. El problema en la distribución de este recurso conlleva a que un gran porcentaje de la población deba abastecerse por sus propios medios de este recurso imprescindible para el bienestar humano. Un estudio realizado por la fundación AMULEN y el centro de derecho y gestión de aguas de la universidad católica de Chile, un 47,2% de la población rural no cuenta con un abastecimiento formal de agua potable, en donde 58,8% se abastece de pozos, 25,8% se abastece de ríos, esteros, canales o vertientes y 15,4% se abastece de camiones aljibes. Es importante determinar los métodos de abastecimiento de cada zona, ya que estos marcan en gran medida la calidad del agua tanto para su utilización y posterior disposición en el cuerpo receptor.

En cuanto a la caracterización de las aguas residuales rurales provenientes de la V región, estas suelen venir principalmente de actividades agrícolas y representan un 79,8% del total de aguas residuales de los principales sectores productivos de la región, es debido a lo anterior, que la composición de las aguas residuales posea un nivel de nitrógeno y fósforo bastante elevado. (AMULEN, s. f.-a)

Llay Llay es una comuna perteneciente a la región de Valparaíso la cual desde marzo de 2011 se encuentra en emergencia agrícola por falta de agua, debido a que gran parte de la comuna cuenta con zonas rurales, la actividad agrícola en estas zonas se encuentra bastante presente, una de las principales fuentes del recurso hídrico se encuentran en las aguas depuradas en las plantas de tratamiento, por lo cual, es necesario que estas cuenten con un funcionamiento correcto y constante en el tiempo, tanto por motivos de saneamiento como por motivos de salubridad.

La zona de Llay Llay cuenta con la zona rural Las Palmas, esta zona se encuentra bajo la dirección de la APR Las Palmas.

1.3 Tratamiento de aguas residuales domésticas urbanas y rurales en Chile

En Chile, las casas se conectan al alcantarillado y luego compañía a cargo de abastecer agua es la encargada luego de tratar el agua y esta debe cumplir en especial el ds 90 cuerpos superficiales, este decreto supremo establece los valores límites, para cumplir con lo requerido en el decreto se llevan a cabo distintos procesos destinados a disminuir las concentraciones de los contaminantes y llevar el agua residual a características que se encuentren dentro del rango permisible de la norma de emisión, los procesos pueden variar dependiendo de las características del agua. Los procesos son divididos en etapas y siguen un patrón metódico para su funcionamiento, el cual es pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. *(Los procesos básicos del tratamiento de las aguas residuales, s. f.)*

En caso de zonas donde los domicilios no cuenten con un acceso a alcantarillado, es común que estos reciban el agua mediante camiones aljibes o de pozas cercanas y en cuanto a su descarga, estas suelen llegar a fosas sépticas en los mismos domicilios, los cuales son periódicamente descargados con la ayuda de camiones recolectores y transportados a una planta de tratamiento cercana. *(Fragkou, Maria-Christina, Monsalve-Tapia, Tamara, Pereira-Roa, Vicente, & Bolados-Arratia, Maximiliano, 2022)*

Desde las primeras plantas de tratamiento, estas han ido evolucionando y adaptándose a distintos requerimientos y condiciones, se han creado nuevas tecnologías y metodologías para el tratamiento de las aguas residuales. Desde procesos de sedimentación hasta tratamientos de nitrificación y desnitrificación. *(Vargas, Adriana K.N., Calderón, Jimmy, Velásquez, David, Castro, Milton, & Núñez, Diego A. 2020)*

Tratamiento de aguas domésticas convencional

Los tratamientos de aguas domésticas pueden presentar distintos métodos de tratamientos, sin embargo, entre los más comunes, se puede considerar la aireación extendida, sin embargo, el diseño de una planta de tratamiento de aguas domesticas se ve influenciado por distintos puntos

El caudal representa el influente de agua residual. Este parámetro es muy importante al momento de considerar el tamaño y volúmenes de las distintas etapas. El caudal también tiene un fuerte impacto en el tiempo de residencia de sólidos (TRS), por lo cual afecta al tipo de tratamiento tanto de sedimentación como proceso biológico al que se someterá el influente. La carga orgánica, representa el nivel de materia orgánica con el que cuenta el influente. La carga orgánica es un factor que determina el tipo de proceso biológico que se puede llevar a cabo en el agua para su tratamiento y las bacterias que pueden interactuar con el agua de una manera eficiente. Un agua

con un DBO_5 mayor a $1000\text{mgO}_2/\text{L}$ representa el valor mínimo para un tratamiento anaerobio, el cual cuenta con ventajas como una menor cantidad de lodos obtenidos del proceso y la posibilidad de obtener biogases como el metano. Al estar tratando con aguas domésticas, el nivel de carga orgánica no logra obtener los niveles requeridos para un proceso anaerobio, por lo cual, es necesario realizar un proceso aerobio, eso debido a la cantidad de materia orgánica mínima que requieren microorganismos aerobios para llevar a cabo sus procesos metabólicos.

En relación a las consideraciones futuras, refiriéndose a los posibles cambios que se puedan presentar a futuro, como requerimientos más estrictos de calidad en los efluentes de salida o cambios que aumenten o disminuyan el caudal del influente.

A continuación, se presenta en la figura 1 el diagrama general del funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales, con el fin de comprender y esquematizar los puntos principales a considerar al momento de diseñar la misma. En la tabla 3 se presentan las remociones que se pueden obtener en las diferentes unidades de un sistema de tratamiento.

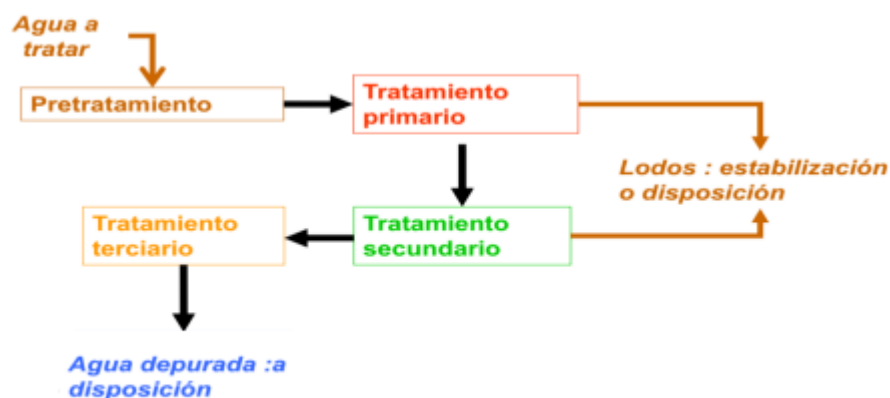


Figura 1 Esquema de planta de tratamiento de aguas residuales domésticas convencionales (fuente: modificado de Chamy 2010)

Tabla 3 Porcentaje de remoción de contaminantes.

Parámetro	Primario	Secundario	Terciario
DBO_5	35	90	99,99
DQO	30	80	99,8
SS	60	90	/
N	20	50	99,5
P	10	60	Variable

Pretratamiento: El pretratamiento consiste en todas las medidas para manipular el agua y llevar sus características a índices que permitan el correcto tratamiento en etapas posteriores de manera eficiente y sin inconvenientes. Las principales características a disminuir durante este proceso corresponden principalmente a la eliminación de materias gruesas, cuerpos gruesos y arenosos, esto debido a la capacidad que tienen estos compuestos a acumularse en los sistemas, bajando el caudal y alterando por completo las etapas posteriores

Tratamiento Primario: El tratamiento primario consiste principalmente en tratamientos físicos enfocados en la separación de elementos sólidos que posee el agua. Las condiciones establecidas en esta etapa son principalmente hidráulicas. Los parámetros considerados durante este proceso se refieren al tiempo de retención y a una velocidad del líquido en el depósito lo más constante posible. El diseño está intrínsecamente relacionado con las necesidades posteriores del sistema, un diseño con base al máximo rendimiento, y otro consistente en obtener un rendimiento suficiente para el correcto funcionamiento de la segunda etapa. En el tratamiento primario podemos encontrar procedimientos como la clarificación del agua, filtros de distinto tamaño, piscinas de decantación y procesos de floculación. Una vez llevado a cabo el tratamiento primario, se obtiene un lodo y agua residual preparada para su tratamiento secundario; el lodo puede disponerse en un acumulador con el fin ya sea de recircular el lodo en el agua para mantener los niveles de materia orgánica requeridos o ser enviados a procesos posteriores como canchas de secado.

Tratamiento secundario: El tratamiento secundario tiene como enfoque el tratamiento biológico del agua y disminuir el nivel de materia orgánica presente en la misma, esto lo puede llevar a cabo mediante distintos procesos, como puede ser un proceso aeróbico o anaeróbico. La elección del tipo de proceso depende en gran medida de la materia orgánica presente en el agua y del funcionamiento de la planta. Entre las principales diferencias en los tipos de tratamientos aerobios y anaerobios, se encuentran que en un sistema aerobio está impulsado por el uso de microorganismos aerobios las cuales degradan la materia junto con el O_2 y liberan CO_2 y H_2O . Este tipo de proceso se puede llevar a cabo en distintos tipos de equipos como pueden ser los reactores biológicos, reactores rotativos, lagunas de estabilización y biorreactores de membrana. En un sistema anaerobio, al igual que los sistemas aerobios, ocupan microorganismos para la degradación de la materia orgánica, sin embargo, estos presentan ciertas características que pueden resultar beneficiosas para el sistema de tratamiento. La principal ventaja en este tipo de sistemas es la obtención de biogás a través de bacterias metanogénicas, lo cual puede optimizar la eficiencia de la planta en términos energéticos. Los sistemas anaerobios también entregan una menor cantidad de lodos. Si bien este tipo de sistema presenta una gran cantidad de beneficios, también cuenta con ciertos requisitos, como poseer una carga de materia orgánica más alta y un DBO_5 superior a $1000mgO_2/L$. También al tratar con bacterias las cuales poseen un tiempo de reproducción de 1,5 a 4 días, el sistema cuenta con consecuencias mayores ante un error durante su manejo o cambios en parámetros en los que se encuentran.

Tratamiento terciario: Es un proceso adicional, este consta de realizar acciones para la eliminación de remanentes que aún se encuentren presentes en el agua, estos pueden ser sólidos en estado coloidal, los cuales, mediante la aplicación de aditivos como floculantes, permite la precipitación y posterior decantación de estos sólidos. También es posible llevar a cabo oxidaciones avanzadas o flotaciones mediante aire disuelto y llevar partículas presentes en el agua hacia la superficie. Debido a que el agua residual no siempre llegará al tratamiento terciario con las mismas características, en ocasiones se puede prescindir de llevar a cabo este tratamiento. Un procedimiento de gran importancia en zonas rurales es la eliminación del nitrógeno, esto se hace mediante procesos de nitrificación-desnitrificación y procesos Annamox, el método a elegir depende en gran medida del DQO Y nitrógeno presente en el agua.

Descripción de los procesos de fangos activos

Proceso convencional

La recirculación se realiza en un solo punto, a la entrada del agua en el tanque, y esta mezcla agua-fango va recorriendo el tanque desde la entrada a la salida en forma conocida como flujo en pistón, con una fuerte tasa de crecimiento inicial del cultivo que va descendiendo hacia el final del tanque.

Mezcla completa

La recirculación se realiza en varios puntos mezclados con el agua previamente. De esta forma se tiene una concentración homogénea en todo el tanque.

El mismo efecto puede tenerse haciendo la entrada agua-fango en un solo punto, pero manteniendo un sistema de agitación y una disposición de la entrada y la salida, en forma tal, que se conserve la homogeneización de la mezcla en todo el tanque.

Alimentación escalonada

Representa otra forma de mejorar el aprovechamiento en la aireación del agua. En este proceso se regula la alimentación de agua, graduándose a lo largo del tanque con objeto de igualar la carga másica en todo el tanque. La aireación puede hacerse de forma uniforme o también graduada

Contacto-estabilización

El tanque de aireación queda dividido en dos partes: Una de ellas donde se realiza el contacto o mezcla del agua y el fango, constituye propiamente el tanque de floculación. El segundo tanque, llamado activación (o de estabilización en otra nomenclatura), recibe el fango recién recogido del decantador, en él se airea sin presencia de sustancias orgánicas de nuevo aporte y, por ello, se agotan las reservas de materia orgánica presente en el proceso. Cuando este fango llega a la

cámara de mezcla resulta muy ávido de la materia orgánica del agua residual, acelerándose en forma sensible el proceso.

Aireación prolongada

Esta variante de fangos activados se realiza con tiempos de retención hidráulica y de retención celular muy elevados. De esta forma, el fango llega a estabilizarse aeróbicamente, debido a los prolongados periodos de aireación y el desequilibrio entre la cantidad de fango en el tanque y la cantidad de materia orgánica que llega (se trabaja con valores muy bajos de la carga másica).

Doble etapa

Consiste en la utilización de dos procesos convencionales de fangos activos en serie. Resulta de interés este procedimiento en casos de alta carga de DBO5 inicial, obteniéndose altos rendimientos y consumos energéticos más bajos.

Proceso de KRAUS

Representa una variante de fangos activados, especialmente interesante en los casos en que se presenta una carencia de nutrientes en el agua. Consiste en recircular fango estabilizado aeróbicamente, cuando se ha producido en él un proceso de nitrificación.

Aireación graduada

Consiste en un proceso convencional de flujo de pistón, donde se regula la entrada de aire graduando su proporción a lo largo del tanque. De esta forma se reduce en la parte final del tanque, donde la demanda ha decrecido en relación a la demanda del comienzo del tanque.

Utilización de oxígeno puro

En esta variante, el aire se sustituye por oxígeno puro, introducido en tanques cerrados. El volumen del tanque puede reducirse en estos casos, y la cantidad de fango producidos es sensiblemente menor.

Alternativas de tratamiento de aguas domésticas para zonas rurales

En las zonas rurales, la forma de abastecimiento y descarga del agua es diferente, en algunos casos los domicilios son abastecidos por las compañías de agua a través de camiones aljibes u obtenidos de pozos cercanos, y una vez utilizado en el hogar en los distintos usos que suelen darse en un hogar regular, estos son descargados a una conexión con una alcantarilla y en ocasiones en una fosa séptica, la cual es periódicamente vaciados y dejan el agua residual a disposición de una planta de tratamiento.

Un agua doméstica puede ser tratada por diferentes tratamientos. El diseño y proceso de operación de la planta se ve afectada por distintos aspectos los cuales determinan el funcionamiento final de la planta. Al tratarse de zonas rurales, se cuenta con una baja densidad demográfica, lo cual tiene influencia directa con los niveles de caudales que se manejan y las características de las mismas, poseyendo fluctuaciones tanto en el nivel de caudal como en cantidad de carga orgánica o compuestos nitrogenados. Por otra parte, las zonas rurales se caracterizan por poseer grandes extensiones de terreno, lo cual permite desarrollar infraestructuras acordes a las necesidades de la zona y a la vez destinar espacios de estos terrenos a operaciones como canchas de secado sin inconvenientes.

Entre las tecnologías presentes en pequeñas comunidades, suelen presentarse tecnologías que requieran un menor gasto de capital. En cuanto a los tratamientos biológicos convencionales presentes en plantas de tratamiento rurales, se encuentran, contactores biológicos rotatorios, filtros percoladores e incluso humedales artificiales híbridos. Este último es el tratamiento más compatible para aguas grises con el cultivo no alimentario ya que el tratamiento se realiza en la misma casa en donde se genera el agua residual y se reutiliza. Otro método para tratar el agua en pequeñas comunidades, similares a lo que se entiende por jardín filtrante, son los estanques de algas de alta tasa, el funcionamiento de esta metodología es bastante similar al tratamiento con microorganismos, estos reciben el agua residual y a través de su metabolismo van degradando la materia orgánica. Debido a que las algas se encuentran expuestas directamente al aire, no es necesario un aireación en el proceso lo cual resulta bastante beneficioso hablando en términos energéticos que implica un importante gasto económico. (Marianna Garfí, Laura Flores, Ivet Ferrer)

Las zonas rurales al contar con grandes extensiones de terreno, la estabilización de lodos se lleva a cabo a través de canchas de secado, para posteriormente utilizar estos lodos ya sea como un abono agrícola debido a los componentes ricos en nitrógeno y fósforo, cubierta de suelos en rellenos sanitarios o mejora de suelos para la retención de agua.

Las aguas domésticas están generalmente conectadas a un alcantarillado encargado de transportar el agua residual hacia la planta de tratamiento correspondiente, estas plantas de tratamiento generalmente pueden variar en su tratamiento secundario suelen trabajar con reactores biológicos y lodos activos, sin embargo, existen una gran cantidad de alternativas al momento de remover sus contaminantes orgánicos como los son los siguientes:

Contactores biológicos rotatorios: Como su nombre lo indica, este proceso cuenta con discos con los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica. El funcionamiento consiste en hacer rotar los discos los cuales están sumergidos en el agua residual en un 35-40% de esta manera los microorganismos al entrar en contacto con el agua, consumen la materia orgánica y cuando vuelven a la superficie se oxigenan y degradan la materia, liberando H_2O y CO_2 en el proceso. En la figura 2 se detallan las especificaciones de un contactor biológico rotatorio.

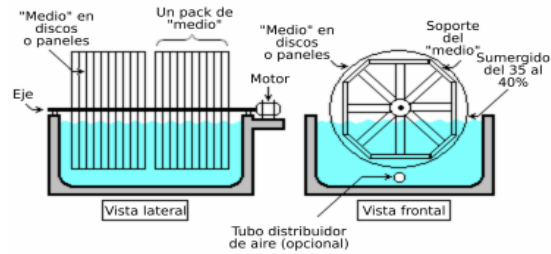


Figura 2 Contactor biológico rotatorio

Jardín filtrante y/o Humedal artificial híbrido: Por otra parte, existen métodos de tratamiento para aguas grises que se pueden realizar de manera doméstica como pueden ser los jardines filtrantes, estos se encargan de hacer fluir el caudal por distintos filtros los cuales disminuyen las concentraciones de los contaminantes y finalmente llegan a un jardín capaz de utilizar el agua para su consumo. Véase figura 3



Figura 3 Jardín filtrante

El jardín filtrante es una de las alternativas para tratar el agua en una vivienda más fácil de emplear. Estas trabajan con aguas grises y pueden cumplir con la ley 21075 la cual establece las posibilidades de tratamiento y reutilización de aguas residuales grises en una vivienda.

Filtros de membrana: Los filtros de membrana son uno de los métodos más eficientes al momento de tratar un agua residual, consta de un film delgado y que actúa como barrera entre la alimentación y permeado evitando el paso de compuestos no deseados. Debido a su eficiencia, esta incluso puede ser utilizada para la separación de aguas con sales para el consumo humano. En la figura 1.4 se clasifican las técnicas de separación en base al tamaño de las especies a filtrar y a factores operacionales.

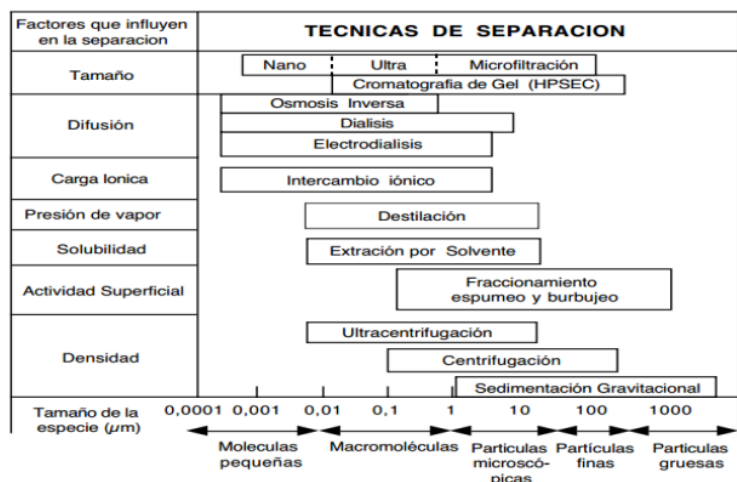


Figura 4 GUIZARD, Christian. Técnicas membranarias de filtración de líquidos. 2 ed. Mérida: Universidad de los andes, 1999

Fangos activos con Aireación extendida

El proceso de aireación extendida (También conocido como tratamiento de aireación prolongada) es uno de los métodos más eficientes para el tratamiento de aguas rurales, esto se debe a una cantidad de factores relacionados con la cantidad de personas a las que abastece, las zonas de emplazamiento de las plantas, las cargas orgánicas y el metabolismo de los microorganismos utilizados.

Las plantas de aireación extendida en términos sencillos, consiste en un tratamiento aerobio de lodos activos con una pequeña diferencia, el tiempo de retención hidráulico y la inyección en grandes cantidades de oxígeno mediante sopladores de aire, estos pequeños cambios permiten tener unos beneficios específicos bajo las condiciones correctas. Sin embargo, este tipo de plantas no se encuentran exentas de problemas.

La planta de tratamiento Las Palmas cuenta con un tipo de tratamiento de aireación extendida, por lo cual, a medida que se avanza en el análisis de la planta, se determinan las fortalezas y debilidades que presenta la planta de tratamiento de aguas.

En la figura 5 se establece un método de tratamiento de agua por aireación extendida convencional.

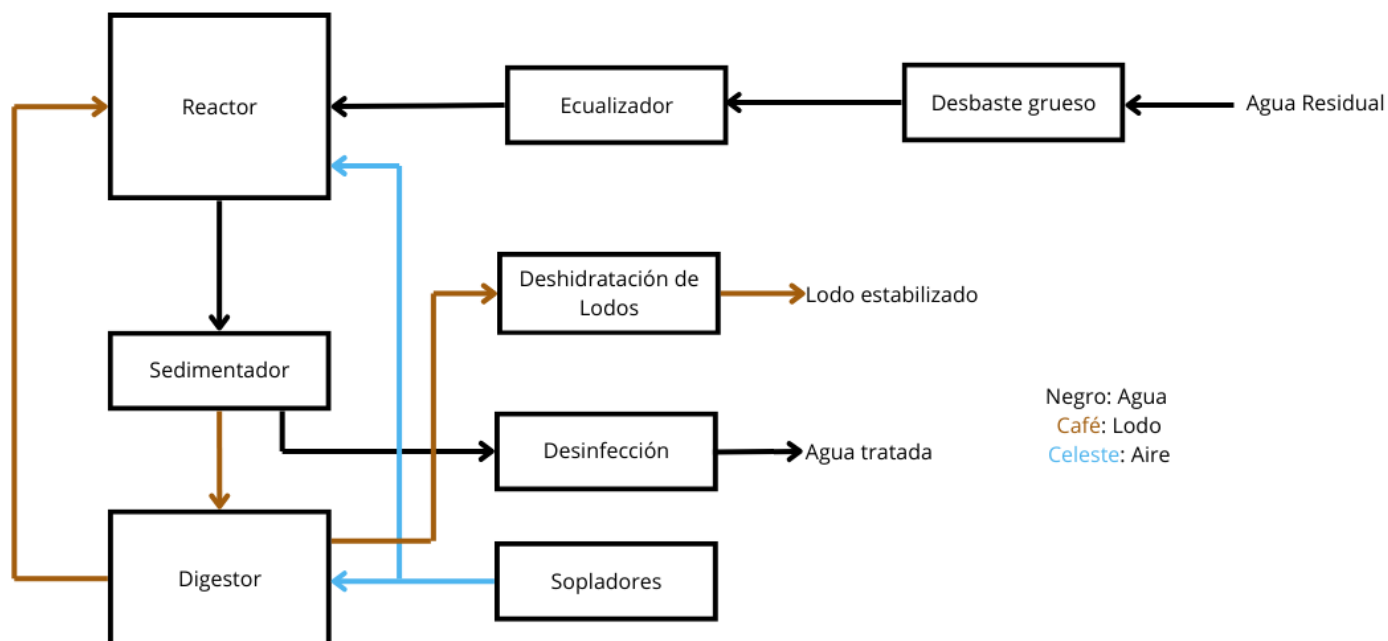


Figura 5 Diagrama de flujo de planta de tratamiento por aireación extendida convencional.

Tabla 4 Parámetros de diseño para fangos activos

PARÁMETROS NORMALES DE DISEÑO PARA PROCESOS DE FANGOS ACTIVOS						
Variante del proceso	θ_c días	TR Horas	Carga másica (kg DBO5/ Kg MLSSV *d)	Carga Volúminica Kg DBO5/m3	MLSSV mg/L	O.C. Kg O2/Kg DBO5
Convencional	4-10	4-8	0,2-0,4	0,32-0,64	1500-4000	(0,8-1,2) (a)
Mezcla completa	4-10	4-8	0,2-0,6	0,4-0,9	2000-5000	0,8-1,2
Aireación escalonada	4-10	4-8	0,2-0,4	0,64-0,96	2000-3500	0,8-1,2

Aireación modificada	0,2-1,0	4-8	1,5-5	1,2-2,4	500-900	0,4-0,6
Contacto-Estabilización (U.C)	3-10	3-6	0,5-2	1,5-3	(1000-3000)	0,4-0,6
(U.E)	-	1-3	0,2-0,6	0,5-1,2	(4000-10000)	0,8-1,1
F.A Alta carga	2-4	2-4	0,4-1	1,1-3,0	1000-3000	0,7-0,9
Aireación prolongada (extendida)	>30	16-24	0,05-0,15	0,16-0,3	2000-6000	(1,3-1,6) (a)
Proceso KRAUS	5-15	4-8	0,3-0,8	0,64-1,6	2000-3000	-
Sistema O2 puro	8-20	2-4	0,25-1	1,6-4	6000-8000	-
Etapas Nitrificación	10-15	6-12	0,05-0,15	0,16-0,48	-	1,1-1,5

Tabla 4 Parámetros de diseño para fangos activos (continuación)

PARÁMETROS NORMALES DE DISEÑO PARA PROCESOS DE FANGOS ACTIVOS				
Variantes del proceso	Qr/Q	% Reducción DBO	mg O2 g . MLSS . h.	Excesos de Fangos Kg/Kg DBO
Convencional	0,25-0,75	92	7-15	0,4-0,6
Mezcla completa	0,25-1	92	7-15	0,4-0,6
Aireación escalonada	0,25-0,75	92	7-15	0,4-0,6
Aireación modificada	0,10-0,30	75	20-40	0,8-1,2
Contacto estabilización	0,25-1	92	10-30	0,4-0,6

(U,C)*	0,50-1	-	20-30	-
(U.E)**				
F.A Alta Carga	0,25-1	85	0,5-0,7	-
Aireación prolongada (extendida)	1-3	90	3-8	0,15-0,3
proceso KRAUS	0,5-1	92	7-15	-
Sistema O2 puro	0,25-0,5	92		-
Etapa nitrificación	-	95	3-8	0,15-0,3

Fuente Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 1989

1.4 Planteamiento del problema

El tratamiento del agua residual es uno de los procesos más importantes para preservar la calidad del agua. En zonas rurales en muchas ocasiones, el agua se obtiene directamente de pozos o ríos sin pasar por un proceso de potabilización, y al momento de destinar aguas residuales en algún cuerpo receptor, es importante cumplir con las normativas de emisión respectivas ya sea que esta sea depositada en un cuerpo agua superficial y cumpla con el decreto supremo 90 o a aguas subterráneas (DS 46/02) o el decreto supremo 609. Las principales problemáticas que se presentan en los tratamientos de aguas residuales en zonas rurales es el diseño y problemas técnicos. Generalmente el diseño de estas se realiza de manera estándar por empresas dedicadas al desarrollo de infraestructuras, con baja experiencia en conocimiento en el desarrollo y diseño de plantas de tratamientos de aguas por lo que pueden ser infradimensionadas o sobredimensionadas. Una vez construidas estas pueden presentar problemas técnicos al cambiar sus tiempos de residencia hidráulico, tiempo de residencia celular u oxígeno disuelto en el agua debido al problema de diseño. Además, los encargados de las plantas por lo general no tienen los conocimientos técnicos adecuados para tomar decisiones acertadas al momento de presentar algún inconveniente en el desarrollo del tratamiento del agua. Esto sumado a en ocasiones una nula implementación de equipos de laboratorio para llevar a cabo el seguimiento de los parámetros de las aguas, genera que estas funcionen de manera automática sin saber realmente si la planta funciona de manera adecuada. Todo esto lleva a la generación de mal olor o una baja eficiencia en los tratamientos principalmente biológicos.

2. Marco normativo: Normativa chilena relacionadas con abastecimiento y descarga de aguas domésticas rurales

Chile cuenta con una normativa regulada en varios aspectos, en lo que se destaca en primera instancia lo siguiente:

Tabla 5 Marco normativo referente a uso y calidad de aguas.

Ley, decreto y normativa	Descripción
DFL 1122	Fija el texto de código de aguas y entre lo que se destaca en su artículo 5 el agua como un bien nacional y de uso público. En consecuencia, su dominio y uso pertenece a todos los habitantes de la nación. Al mismo tiempo declara el acceso al agua y saneamiento como un derecho humano esencial e irrenunciable que debe ser garantizado por el Estado.
Ley 18902	Crea la superintendencia de servicios sanitarios el cual tiene como función la fiscalización de los prestadores de servicios sanitarios y del cumplimiento de las normas relativas a servicios sanitarios y el control de los residuos líquidos industriales.
Ley 19300	Ley sobre bases generales del medio ambiente, en donde se establece el derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación, junto con esto determina las normas de emisión, las cuales se establecerán mediante decreto supremo.
Ley 20998	Ley que regula los servicios sanitarios rurales, entre los cuales destaca su artículo 1 en la donde se establece “la prestación de servicios sanitarios rurales operados por comités o cooperativas a las que se les haya otorgado la licencia por el ministerio de obras públicas”, a su vez en su artículo 40 establece las obligaciones de “garantizar la continuidad del servicio, prestar y operar los servicios sanitarios rurales”
Ley 21075	Ley que regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises. Establece el reglamento para el uso de aguas grises, alternativas para tratamiento y reutilización en las viviendas y prohíbe su uso para consumo humano, procesos productivos de la industria alimenticia, uso en establecimientos de salud, cultivo acuícola de moluscos, uso en piletas, piscinas y balnearios, uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos, uso en fuentes

	o piletas ornamentales o cualquier otro uso que la autoridad considere riesgoso para la salud
Decreto supremo 90	Establece normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Se declara como fuente emisora a todo establecimiento que descarga residuos líquidos a uno o más cuerpos receptores, como resultado de su proceso, actividad o servicio, con una carga contaminante media diaria o de valor característico superior en uno o más de los parámetros indicados en la tabla de establecimiento emisor. Los sedimentos, lodos y/o sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de residuos líquidos no deben disponerse en cuerpos receptores y su disposición final debe cumplir con las normas legales vigentes en materia de residuos sólidos, sin perjuicio de lo dispuesto en la NCh 410.Of96
Decreto supremo 4	Expone el reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas.
Decreto supremo 46/03	Establece las normas de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas.
NCh2313/22Of.95	Establece los métodos de análisis para determinación de coliformes fecales en medio EC en aguas residuales utilizando la técnica de tubos múltiples.
NCh410.Of96	Norma publicada como actualización de la terminología de la NCh410.Of96. Entrega los términos y vocabularios correspondientes a la calidad de agua.
NCh411/10	Manual operativo de las normas de muestreo de aguas residuales. Toda fuente emisora debe realizar muestreo y seguimiento a los efluentes mediante los propios recursos de los establecimientos o contratando una empresa externa encargada de realizar las mediciones correspondientes, esto siguiendo las metodologías contenidas en la NCh411/10.
NCh1333	Establece los requisitos de la calidad de agua para su reutilización en diferentes usos, ya sea para consumo humano, bebida de animales o riego.

NCh1620	Establece la determinación de coliformes fecales en el agua mediante el método de tubos múltiples (NMP).
----------------	--

2.1 Ley 20998 Servicios sanitarios rurales.

La Ley 20998 es uno de los principales apoyos hacia los servicios sanitarios rurales y la gestión del agua y su saneamiento. Esta ley permite dejar la licencia de administración y operación de las aguas en zonas rurales a comités y cooperativas en un área geográfica delimitada. La misma ley establece las obligaciones y derechos de la administración de estas aguas, entre las cuales se destaca principalmente el título II DEL SERVICIO SANITARIO RURAL, en su artículo 7 donde se comprenden las etapas presentes en el servicio

- A. Producción de agua potable.
- B. Distribución de agua potable.
- C. Recolección de aguas servidas.
- D. Tratamiento y disposición final de aguas servidas.

También se resalta el título IV DE LOS OPERADORES. A continuación, se enlistan los puntos relevantes para el desarrollo del presente informe.

- A. Prestar los servicios sanitarios a los usuarios, en la medida de que sea técnicamente y económicamente factible.
- B. Garantizar la continuidad del servicio entregado, en el sentido de que éste sea prestado durante la cantidad de horas diarias que se determine en el respectivo decreto.
- C. Mantener el nivel de calidad en la atención a los usuarios y prestación de servicios que defina el reglamento.
- D. Prestar y operar los servicios rurales, dando estricto cumplimiento a las obligaciones, restricciones y prohibiciones establecidas en esta ley y su reglamento.
- E. Permitir el acceso a las instalaciones del personal del Ministerio, de la Dirección general de aguas, subdirección, Superintendencia y autoridad sanitaria, para el ejercicio de sus atribuciones, con la finalidad de velar por el correcto funcionamiento de éstas y adoptar las medidas necesarias.
- F. Efectuar un correcto uso de los fondos y bienes de la organización, priorizando en su caso el plan de inversiones y, de ser necesario, realizar auditoría.

2.2 Decreto supremo 90

Establece normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, con el fin de mantener una buena calidad ambiental en los cuerpos receptores de residuos líquidos. Debido a que las tres plantas de tratamiento descargan a cuerpos de aguas fluviales, estos se encuentran regulados bajo la tabla 1 de la presente norma de emisión. A continuación, se presenta la **tabla 1** del decreto supremo 90.

Tabla 6 Límites máximos permitidos por el decreto supremo 90 en su tabla 1

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permitido
Aceites y grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	5
Arsénico	mg/L	As	0,5
Boro	mg/L	B	0,75
Cadmio	mg/L	Cd	0,01
Cianuro	mg/L	CN-	0,20
Cloruros	mg/L	Cl-	400
Cobre total	mg/L	Cu	1
Coliformes fecales o termotolerantes	NMP/100ml	Coli/100ml	1000
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,05
DBO ₅	mg/L	DBO5	35*
Fósforo	mg/L	P	10
Fluoruro	mg/L	F-	1,5
Hidrocarburos Fijos	mg/L	HF	10
Hierro disuelto	mg/L	Fe	5
Manganeso	mg/L	Mn	0,3

Mercurio	mg/L	Hg	0,001
Molibdeno	mg/L	Mo	1
Níquel	mg/L	Ni	0,2
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
Pentaclorofenol	mg/L	C60HC15	0,009
pH	Unidad	pH	6,0-8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,05
Poder espumógeno	mm	PE	7
Selenio	mg/L	Se	0,01
Sólidos suspendidos totales	mg/L	SST	80*
Sulfato	mg/L	SO42-	1000
Sulfuros	mg/L	S2-	1
Temperatura	C°	T°	35
Tetracloroetano	mg/L	C2Cl4	0,04
Tolueno	mg/L	C6H5CH3	0,7
Triclorometano	mg/L	CHCl3	0,2
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	0,5
Zinc	mg/L	Zn	3

*= Para los residuos líquidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas domésticas, no se considerará el contenido de algas, conforme a la metodología descrita en el punto 6.6 del decreto supremo 90.

3. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas rural de la comuna de Llay-Llay, Quinta región.

Objetivos específicos

1. Estudiar la eficiencia de remoción de contaminantes de una planta de tratamiento de aguas domésticas rural de la comuna de Llay-Llay
2. Analizar el diseño y operación actual de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas
3. Identificar problemas de funcionamiento y posibles mejoras operacionales de la planta de tratamiento en cuestión

4. Metodología

4.1 Localización de Planta de tratamiento de aguas residuales rurales

La planta de tratamiento de aguas residuales analizada en el presente proyecto se encuentra ubicada en la comuna de Llay Llay, en la localidad de Las Palmas ($32^{\circ}50'51.6''S$ $70^{\circ}58'45.4''W$) (ver figura 4.1)

Se autoriza su funcionamiento bajo la resolución 1545 del año 2018. En la tabla 6.2.1 se entregan antecedentes correspondientes a las aguas que sirven esta planta y los parámetros de diseño.



Figura 6 Ubicación planta de tratamiento Las Palmas.

4.2 Descripción de la Planta

La planta cuenta con dos líneas de operación, las cuales se dividen en el reactor una vez que ingresan al sistema, estos reactores reciben oxígeno mediante bombas de aire de burbuja fina con el fin de mantener el oxígeno disuelto en el agua en los niveles necesarios para la correcta actividad metabólica de los microorganismos, una vez realizada la degradación de la materia orgánica, el influente avanza a la etapa de clarificado, esto se realiza mediante un sedimentador secundario, el cual por decantación, separa los sólidos del agua, obteniendo una salida de agua clarificada y otra de lodo, la línea de lodo puede ser utilizado en recirculación hacia el reactor de lodos o enviado al digestor para su estabilización y posterior deshidratado en canchas de secado, mientras que el agua avanza a la etapa de desinfección, durante la cual se realiza la dosificación tanto de la cloración como de cloración, la idea de este proceso es la eliminación de patógenos y disminuir las coliformes fecales a niveles menores de los permitidos por la norma de emisión vigente. Una vez realizado el proceso de desinfección, el efluente puede ser vertido en el cuerpo receptor como un agua tratada.

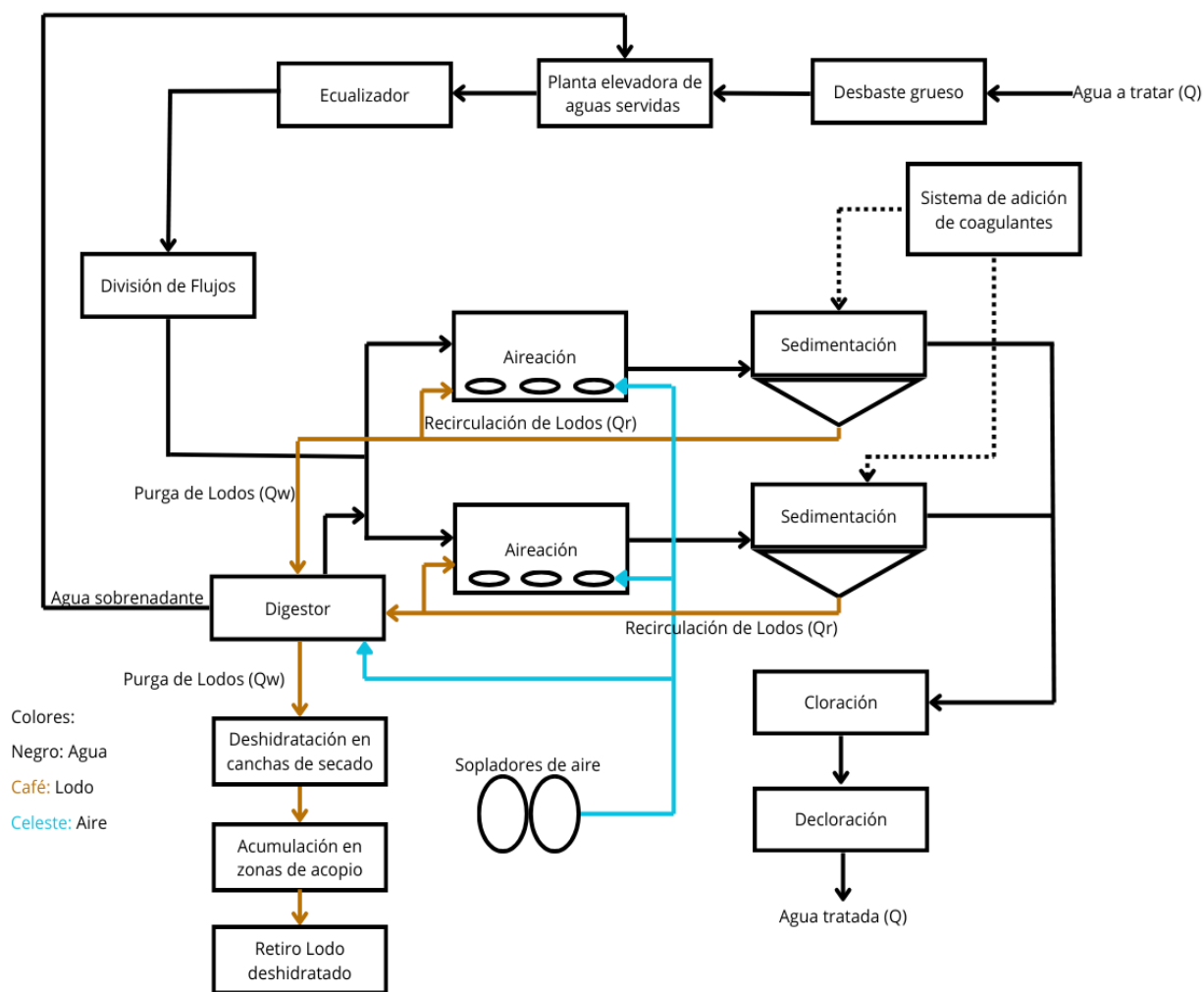


Figura 7 Esquema de procesos planta de tratamiento Las Palmas.

4.3 Cuerpo receptor: Estero Vichiculen

La planta de tratamiento Las Palmas vierte su efluente en el estero Vichiculen (ver figura 4.2) el cual comienza desde la zona sureste hacia el suroeste de Llay Llay. Este cuerpo nace a partir del estero Las Chilcas. El estero Vichiculen es un estero fluvial, por lo cual, todas las descargas de los establecimientos emisores deben responder las normas de emisión del decreto supremo 90 tabla 1.

	cantidad de humedad presente en la muestra. Una vez obtenida la masa de los sólidos, estos se dividen por el volumen de la muestra para obtener la concentración de sólidos totales.	Método gravimétrico
Sólidos volátiles	Corresponden a los sólidos con capacidad de volatilizarse, estos pueden contener un porcentaje de materia orgánica. El análisis de sólidos volátiles se realiza con ayuda de una mufla, ésta calienta la muestra a 500°C. La diferencia de peso entre los sólidos totales antes y después de someterse a la mufla son los sólidos volátiles. Al igual que el caso anterior, la masa de los sólidos totales se divide por el volumen de la muestra para obtener la concentración de sólidos volátiles de la muestra.	Método 2540 del A.S.T.M Método gravimétrico.
Sólidos fijos	Son los sólidos sin capacidad de volatilizar y corresponden a los sólidos finales de la muestra posterior a la mufla. Debido a que ya se cuenta con la muestra del paso anterior, su medición consiste sólo en medir su masa mediante una balanza.	Método 2540 del A.S.T.M Método gravimétrico.
Sólidos suspendidos totales	Corresponden a la masa de residuos secos que es retenida por medio de filtración y secados en una estufa a 103 ° C – 105 ° C para tener una masa constante.	Método 2540 del A.S.T.M NCh2313/3 of 95
Sólidos sedimentables	Son sólidos con la densidad suficiente para sedimentar en el agua a tratar. Su medición es utilizando un cono Imhoff el cual se llena con la mezcla y se deja reposar durante una hora, pasado ese tiempo, los sólidos sedimentables decantarán.	Método 2540F del A.T.S.M. NCh2313/4 of 95
Conductividad	Corresponde a la capacidad del agua para mover electrones, se encuentra estrechamente ligado con la salinidad del agua. El método de análisis es mediante un medidor de electroconductividad y su unidad de medida es $\mu\text{S}/\text{cm}$.	
Turbidez	La turbiedad representa el grado de falta de transparencia en el agua, la cual tiene incidencia directa con la cantidad de luz que permite atravesar la misma, debido a, debido a la naturaleza del parámetro,	

DQO	Demanda química de oxígeno, representa los compuestos químicamente oxidables, dentro de esta se pueden distinguir dos mediciones en distintas etapas del proceso, previo al tratamiento primario (DQO) y posterior al tratamiento primario (DQOf). El análisis de este parámetro se realiza con la ayuda de un compuesto oxidante, generalmente dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$).	Método Standard Methods for Waste Water Método volumétrico
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno. Al igual que el caso anterior, este parámetro mide la cantidad de oxígeno que consume una muestra en 5 días. La principal diferencia se encuentra en que el consumo de oxígeno es llevado a cabo por microorganismos al momento de degradar la materia orgánica, por lo cual, este es uno de los mayores indicadores del nivel de biodegradabilidad del agua residual a tratar. El análisis se realiza midiendo el nivel de oxígeno disuelto en la muestra y posteriormente esta es llevada a una incubadora de una muestra a 20°C durante 5 días donde mediante procesos metabólicos de las bacterias, degradan la muestra.	NCh2313/5 of 96
pH	El pH es la medición del nivel acidez o alcalinidad de una solución acuosa y sus valores van desde 0 a 14. El método de medición es a través de un medidor de pH	
NTK	Nitrógeno total Kjeldahl representa las formas de hidrógeno orgánicos presentes en la muestra de agua	Espectrofotómetro HACH DR3900
NO ₃	Nitrato presente en la muestra	
NO ₂	Nitrito presente en la muestra	
PO ₄	Fosfato presente en la muestra	
H ₂ S	Ácido sulfhídrico presente en la muestra	
Fe	Hierro presente en la muestra	
Cr	Cromo presente en la muestra	

Mn	Manganeso presente en la muestra	
Coliformes totales	Coliformes presentes en la muestra mediante NMP	NCh1620/1

Tabla 8. Cálculos para la caracterización de los distintos parámetros físicos, químicos y biológicos.

Parámetro	Cálculo	Variables
Sólidos totales (ST)	$ST(mg/L) = ((B-A)/V) * 100$	A: Peso del crisol
		B: Peso del crisol + muestra seca (g)
		V: Volumen de la muestra (L)
Sólidos volátiles (SV)	$SV(mg/L) = ((B-C)/V) * 100$	B: Peso crisol + muestra seca (g)
		C: Peso crisol + muestra seca incinerada (g)
		V: Volumen de muestra inicial (L)
Sólidos fijos (SF)	$SF(mg/L) = ((C-A)/V) * 100$	A: Peso crisol seco (g)
		C: Peso crisol + muestra seca incinerada (g)
		V: Volumen de muestra inicial (L)
Sólidos suspendidos totales (SST)	$SST(mg/L) = ((B-A)/V) * 100$	A: Peso filtro seco (g)
		B: Peso filtro + muestra seca (g)

		V: Volumen de muestra filtrada (L)
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	$SSV(mg/L) = ((B-C)/V) * 1000$	B: Muestra seca + filtro + crisol (g)
		C: Muestra incinerada + filtro + crisol (g)
		V: Volumen de muestra filtrada (L)
M_{FAS}	$M_{fas} = \frac{Md * Vd * 6}{Vfas}$	Md: Molaridad solución digestora
		Vd: Volumen de solución digestora (mL)
		Vfas: Volumen de FAS usado en titulación
Demanda química de oxígeno (DQO)	$DQO = \frac{(V_{Blanco} - V_{Muestra})}{M} * 8000 * M_{fas} * F \left(\frac{mgO_2}{L} \right)$	V_{Blanco} : Volumen de FAS gastado en la titulación del blanco (mL)
		$V_{Muestra}$: Volumen de FAS gastado en la titulación de la muestra (mL)
		M: Volumen de muestra (mL)
		M_{FAS} : Molaridad de la solución de FAS estandarizada
		F: Factor de dilución de la muestra analizada
DBO ₅ (dilución no inocula)	$DBO_5(mg/L) = \frac{D1 - D2}{P}$	D1: Oxígeno disuelto (mg/L), de la muestra diluida inmediatamente después de la preparación
		D2: Oxígeno disuelto (mg/L), de la muestra al quinto día de incubación a 20°C
		P: Fracción volumétrica

		decimal de la muestra
DBO ₅ (dilución inocula)	$DBO_5(mg/L) = \frac{(D1-D2)-(B1-B2)}{P} f$	D1: Oxígeno disuelto (mg/L), de la muestra diluida inmediatamente después de la preparación
		D2: Oxígeno disuelto (mg/L), de la muestra al quinto día de incubación a 20°C
		B1: Oxígeno disuelto (mg/L) del control inóculo antes de la incubación
		B2: Oxígeno disuelto (mg/L), del control inóculo después de la incubación
		f: Proporción entre inóculo en la muestra diluida e inóculo en el control inóculo (% inóculo en la muestra diluida)(% inóculo en el control inóculo)
		P: Fracción volumétrica decimal de la muestra

4.4 Estudio del diseño y operación de la planta de tratamiento

Se realizó un análisis de la planta en cada una de sus etapas con el fin de identificar el tipo de tratamientos utilizados y tratamientos que deberían incorporarse al proceso. Una vez identificados los distintos equipos utilizados, se realizaron los cálculos sobre el volumen útil de las mismas con el fin de determinar la velocidad de carga orgánica (VCO) como los tiempos de residencia de sólidos (TRS) y los tiempos de residencia hidráulicos (TRH). Una vez obtenido los valores, tanto de los tiempos de residencia como la caracterización del agua de entrada y de salida, se analizarán los valores con el fin de encontrar algunos problemas ya sea en la concentración de sólidos, carga orgánica, oxígeno disuelto, nitrógeno, fósforo, pH y conductividad, con el fin otorgar posibles soluciones que se puedan implementar.

Una vez obtenida la información necesaria, se estimaron las áreas del clarificado, los flujos másicos, el volumen del sedimentador y el mejor procedimiento para el tratamiento de nitrógeno. Por otra

parte, se calculó el volumen del reactor con el fin de que este no se encuentre subestimado o sobreestimado.

Con el motivo de determinar el estado general de la planta, como evitar fugas, problemas de purga de lodos, mala cloración y decoloración o problemas de recirculación, se realizaron inspecciones visuales a través de fotografías con el fin de identificar posibles fallas estructurales a la vez que se realizan entrevistas a los operarios con el fin de diagnosticar problemas específicos que puedan encontrarse en los procesos operativos de la planta de tratamiento.

En conjunto, se llevó a cabo una inspección administrativa de los documentos asociados a las plantas de tratamiento para obtener información relevante sobre el diseño y funcionamiento de las plantas de tratamiento, entre los cuales se determinan la población a la que sirve la planta de tratamiento y la cantidad de litros por habitante por día. Todos estos aspectos analizados permitirán obtener datos valiosos sobre las estimaciones realizadas al momento de diseñar la tabla y poder generar un contraste con las estimaciones reales a las que se encuentra expuesta la planta de tratamiento de aguas.

4.5 Mejoras operacionales

Para el desarrollo de las mejoras operacionales, se hizo una revisión bibliográfica, con el fin de diseñar procesos o cambios necesarios para el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento de acuerdo a los parámetros esperados para una planta de tratamiento de aireación extendida.

5. Resultados

5.1 Caracterización de aguas influente y efluente de la planta de tratamiento de aguas

Los resultados tanto del día 10 de enero de 2024 como del 17 de abril de 2024 se encuentran reflejados en la tabla 9, junto a las concentraciones obtenidas, se entregan el porcentaje de remoción y una comparativa con el decreto supremo 90 tabla 1 en caso de que esta cuente con un límite máximo para dicho contaminante. En cuanto al porcentaje de remoción estos se encuentran reflejados para determinar si la planta está funcionando de manera correcta en el sentido de lo que se espera de una planta de tratamiento en sus distintas etapas. Con esto nos referimos a que cada etapa ya sea primaria, secundaria o terciaria, cuenta con un porcentaje de remoción esperable para ciertos contaminantes (revise tabla 3).

Tabla 9 Caracterización día 10 de enero y 17 de abril de 2024

Parámetros	Unidad	Verano			Otoño		Remoción verano	Remoción otoño	DS 90 tabla 1
		Afluyente	Reactor	Efluente	Reactor	Efluente	%	%	Límite máximo
Conductividad	μS/cm	1600	608	-	-	-	-	-	-
Oxígeno disuelto	Ppm(%)	2,80(34)	5,99(73)	-	-	-	-	-	-
ORP	V	-244,6	-107,1	-	-	-	-	-	
pH		8,08	7,62	-	-	-	-	-	6-8
Turbiedad	NTU	300	<1000	-	-	-	-	-	-
Temperatura	°C	23,67	23,38	-	-	-		-	35°C
Amonio	mg/L	79,4	-	5,4	-	-	93,2	-	
Nitrito	mg/L	0,192	-	0,044	-	0,006	77,1	-	-
Nitrato	mg/L	3,4	-	15,7	-	15,1	0	-	-
Nitrógeno total	mg/L	94	-	90	-	-	4,2	-	-
Fosfato	mg/L	60,17	-	42,97	-	-	28,6	-	-
Hierro total	mg/L	-	-	0,353	-	-	-	-	5

Parámetros	Unidad	Verano			Otoño		Remoción verano	Remoción otoño	DS 90 tabla 1
		Afluente	Reactor	Efluente	Reactor	Efluente	%	%	Límite máximo
Manganeso	mg/L	-	-	0,8*	-	-	-	-	0,3
Sulfuro	µg S2 - /L	-	-	15*	-	-	-	-	1
Sulfato	mg/L	-	-	180	-	-	-	-	1000
DQO	mg/L	601	-	27	19	25	95,5	0	*DBO5 35. DQO al ser menor, teóricamente cumple el decreto supremo 90
Cloro total	mg/L	-	-	0	-	-	-	-	-
Cromo total	mg/L	-	-	0,12	-	-	-	-	-
ST	mg/L		-	-	6410	1320	-	79,4	-
SF	mg/L		-	-	1,9135	1192	-	0	-
SV	mg/L		-	-	4,51	125	-	0	-
SST	mg/L	335	6250		2870	345	-	87,9	80
SSF	mg/L	248	3686		-	-	-	-	-

Parámetros	Unidad	Verano			Otoño		Remoción verano	Remoción otoño	DS 90 tabla 1
		Afluente	Reactor	Efluente	Reactor	Efluente	%	%	Límite máximo
SSV	mg/L	86	2563		-	-	-	-	
Coliformes fecales	NPM/100 ml	-	NM	-	-	$1,1 \cdot 10^4$	-	-	1000

* representan concentraciones del efluente que superan el límite máximo permitido o no cuentan con los valores de remoción esperados.

La planta de tratamiento de aguas no cuenta con un sistema de decantación primaria, si bien los SST que entran al reactor biológicos no son un valor elevado (335 mgSST/L), este podría ayudar a disminuir a la reducción de DBO asociada con los sólidos suspendidos que son retirados a ingresar al sistema de lodos activos reduciendo un gasto energético importante.

En relación al verano, la caracterización evidenció una concentración alta de sólidos suspendidos en el efluente, esto debido a que la planta no cuenta con un sistema de purga de lodos, en consecuencia de esto, desde su funcionamiento, los sólidos suspendidos se mantuvieron en recirculación, generando una carga de SSV mayor en el reactor, las soluciones que se derivan de este problema deberán enfocarse en la eliminación del lodo, manteniendo un tiempo de residencia de sólidos de 16 a 24 horas (Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 1989).

Si bien, los sólidos suspendidos volátiles dentro del reactor estos son valores normales para sistemas de lodos activos de tipo aireación extendida, sin embargo, los valores obtenidos en la etapa de post cloración sobrepasan la tabla 1 para este parámetro, por lo que es evidente que la etapa del sedimentador secundario no está funcionando de manera adecuada, en especial debido a la falta de purga del lodo.

En relación a materia orgánica para el muestreo verano y otoño considerando que la DQO es un valor mayor que la DBO₅ no se debería superar el decreto supremo 90 tabla 1. Por lo que la remoción del reactor biológico está funcionando de manera adecuada. Esta fue de un 95,5% lo que es bastante adecuado para estos reactores de aireación extendida, de acuerdo a literatura estos reactores pueden remover hasta 90% (Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 1989). El reactor de aireación extendida debe mantenerse a una carga volumétrica de 0,16 - 0,3 Kg DBO₅/m³ (Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 1989).

Otros parámetros importantes que la planta de tratamiento no está cumpliendo es el manganeso y el sulfuro, lo cual no suele ser común encontrar en aguas residuales domésticas, sin embargo, entre las posibilidades de que estas se encuentren presentes, se destaca refiere comúnmente al uso de manufactura producida a base de manganeso, también se destaca la presencia de manganeso de forma natural en el agua, comúnmente el agua subterránea pueda poseer concentraciones altas de manganeso (*Resumen de Salud Pública: Manganeso (Manganese) | PHS | ATSDR*, 2016).

En cuanto a la caracterización biológica, se puede determinar de forma conclusiva que el sistema está teniendo fallas en su etapa de desinfección para la etapa de otoño. Siendo más específicos, la línea de cloración donde no se está entregando las dosis correspondientes, por lo cual los coliformes fecales superan la norma. Esto pudo ser evidenciado de manera visual en la visita a la planta en otoño ya que la ubicación de la sala de mezcla para cloración y de cloración se encuentra demasiado alejada de la zona de desinfección de la planta, como consecuencia, las bombas dosificadoras no cuentan con la potencia y presión necesarios para mover el fluido a la zona de entrega. Las soluciones deben estar enfocadas en lograr que el sistema pueda volver a tener una etapa de cloración y de cloración adecuada.

En relación al nitrógeno total Kjeldahl en el Decreto supremo 90, considerando que este es el nitrógeno orgánico y el amonio, al menos el amonio no sobrepasa la tabla 1, por lo tanto, en el sistema de lodos activos estaría ocurriendo la nitrificación también.

5.2 Análisis de diseño

La planta las Palmas fue diseñada para una población inicial de 1035 habitantes el año 2016 y con una población proyectada al año 2032 de 1857 habitantes, considerando una dotación de 160 L/hab/día por lo tanto el caudal de diseño es 3,4L/s, sin embargo, la planta tiene caudales muy irregulares.

A continuación, en la tabla 10, se presentan las características técnicas presentes en cada etapa de la planta de tratamiento Las Palmas. A la vez, se dejan comentarios respecto al análisis del diseño de la planta y detalles de los mismos.

Como se observa en la tabla 10, si bien no se observaron sólidos grandes retenidos en la rejilla, pero sin embargo en estas plantas de aguas residuales domésticas es usual utilizar rejillas de 0,59 X 0,59cm un tamaño menor al que se espera para una etapa de pretratamiento, donde las rejillas se clasifican en finas, medias y gruesas, siendo de 1,5cm las finas, 1,5cm y 5,0cm las medias y 5 y 15 cm las gruesas (Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 1989), por lo cual se considera que criterio de separación de la rejilla es menor al adecuado.

Para el tratamiento biológico en base al volumen útil del reactor y la dotación de caudal estimada, el tiempo de residencia hidráulico (TRH) es de 31 horas, en comparación con la revisión bibliográfica (Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 1989) y los datos planteados en la tabla 4, el TRH esperado para un sistema de aireación extendida oscilan entre los 16 y 24 horas, por lo cual, el diseño de la planta de tratamiento se encuentra sobrestimado en cuanto al volumen de los reactores implementados.

En cuanto a la implementación de un digestor, debido a que el TRH es considerablemente mayor, los lodos ya se encuentran estabilizados, como consecuencia, es probable que los microorganismos logren llegar a su fase endógena permitiendo realizar un purgado directamente desde el sedimentador sin la necesidad de que el lodo se someta a un sistema de digestión aerobia posterior, mejorando la eficiencia energética de la planta de tratamiento.

La presencia de grasa en las plantas de tratamiento es un problema que puede afectar el paso de agua en las rejillas, deteriorar los equipos, adherirse a las bombas sumergibles, problemas en los decantadores y dificultar los procesos de aireación, por lo tanto, sería adecuado agregar un desgrasador.

Tabla 10. Descripción de operaciones unitarias en la planta de tratamiento.

Etapas	Descripción	Comentarios visuales o técnicos
Pretratamiento: Separación de sólidos grandes	Reja fina de acero inoxidable de 0,1 cm, de dimensiones 0,59 x 0,59 cm Número de unidad: 1	El criterio de separación de las rejillas es menor al adecuado, por lo cual, es posible que sucedan problemas de obstrucción.
Tratamiento Biológico: Reactor aerobio: Estanque de hormigón armado	Sistema de aireación extendida Unidades: 8 Volumen total reactor: 381,2 m ³ Largo útil reactor: 3,8 m Ancho útil reactor: 3,8 m Profundidad útil: 3,3 m 3 Sopladores DRESSER tipo Roots, modelo URAI 42. Motor marca VEM DE 5 Hp y 3600rpm. 128 Difusores de aire de burbuja fina marca Airflex USA, modelo AFD 350, diámetro 12"	En el sedimentador secundario se observa grasa alojada en la rejilla de paso, por lo que se recomienda mantención y limpieza.
Sedimentador secundario: Estanque de hormigón armado	Número de Unidades: 2 Ancho: 3,1 m Largo: 3,8 m Profundidad útil máxima: 3,3 m Volumen unitario: 43,3 m ³ 2 bombas neumáticas por cada Espesador, marca SERECO SRL modelo Air Lift, diámetro 3".	Sedimentador secundario no cuenta con bomba de purga de lodos y genera problemas de concentración de sólidos en el clarificado
Digestor de lodos: Estanque de hormigón armado	Número de unidades: 2 Volumen unitario: 23,8 Ancho útil: 1,9 m Largo útil: 3,8 m Profundidad útil: 3,3 16 Difusores de aire de burbuja fina marca Airflex USA, modelo AFD 350, diámetro 12".	
Purgado de Lodo	-	La purga de lodo debe desarrollarse en este sistema. Se espera la instalación de una bomba KBZ 31.5 T de 2 HP
Cámara de contacto para desinfección: Estanque de hormigón	Número de unidades: 2 Volumen unitario: 7,5 m ³ 4 Bombas dosificadoras de solución clorada y declorada marca PROMINENT	Bomba dosificadora muy alejada del punto de cloración y decloración.

armado		
Deshidratación de lodos	Los lodos espesados son enviados a una cancha de secado de 152 m ² . Ancho útil: 8 m Largo útil: 19 m Profundidad útil máxima: 0,45 m	La cancha de secado no presenta lodo deshidratado o características de un uso, por lo que resulta evidente que no se ha realizado una purga de lodo del sistema.
Galpón del sistema deshidratador de lodos	Ancho útil: 10 m Largo útil: 18 m	
Galpón de acopio de lodos	Ancho útil: 10 m Largo útil: 17 m	

5.3 Identificación de problemas y posibles soluciones

La implementación de una sedimentación primaria traería consigo una serie de beneficios como lo son la reducción del coste energético asociado al nivel de oxígeno tanto en el reactor como en el digestor. En cuanto a la sedimentación, se han estandarizado algunos tipos de métodos para llevarse a cabo en distintas etapas y condiciones hasta llegar a poseer cuatro tipos de sedimentación. En la tabla 11 se describen los procesos de cada uno de ellos y sus aplicaciones.

Tabla 11. Descripción de tipos de sedimentación

Tipos de fenómeno de sedimentación	Descripción	Aplicación/Situaciones en que se presenta
De partículas discretas	Se refiere a la sedimentación de partículas en una suspensión con baja concentración de sólidos. Las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción sustancial con las partículas vecinas	Eliminación de las arenas del agua residual
Floculenta (Tipo 2)	Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se agregan, o floculación, durante el proceso de sedimentación. Al unirse, las partículas aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad	Eliminación de una fracción de los sólidos en suspensión del agua residual bruta en los tanques de sedimentación primaria, y en la zona superior de los decantadores secundarios. También elimina los flóculos químicos de los tanques de sedimentación.

Retardada, también tallada zonal (tipo 3)	Se refiere a suspensiones de concentración intermedia en las que las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta como una unidad. Se desarrolla una interfase sólido-líquido en la parte superior de la masa que sedimenta	Se presenta en los tanques de sedimentación secundaria empleados en las instalaciones de tratamiento biológico.
Compresión (tipo 4)	Se refiere a la sedimentación en la que las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura, y la sedimentación sólo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de esta estructura. La compresión se produce por el peso de las partículas, que se van añadiendo constantemente a la estructura por sedimentación desde el líquido sobrenadante.	Generalmente, se produce en las capas inferiores de una masa de fango de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los decantadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamiento de fangos.

Según lo descrito, la propuesta para el diseño de un sedimentador primario es la implementación de una sedimentación floculenta (Tipo 2), esto aliviaría la carga sobre el reactor de lodos y el digestor generando disminuyendo el DBO requerido para las actividades metabólicas de los microorganismos y mejorando la eficiencia de la planta en varias etapas.

En cuanto a los datos obtenidos durante la caracterización del efluente, los resultados son claros, tres problemas destacados principalmente en la presencia en exceso de lodo, como fallas en la etapa de desinfección y un exceso de nitrógeno total kjeldahl en el efluente en base a estos problemas presentes en la planta de tratamiento.

En relación al exceso de lodos, esto está referido al diseño, la aplicación de un sistema de aireación extendida en una zona rural como Llay Llay es una de las opciones más acertadas. Las plantas de aireación extendida debido a que poseen un tiempo de retención hidráulico mayor, el caudal que reciben está limitado a una población más acotada siendo una de las opciones predilectas para

zonas rurales como lo es la localidad de las Palmas el cual cuenta con una proyección de 1857 habitantes para 2032. Las zonas rurales se caracterizan principalmente por poseer largas extensiones de terreno y una baja densidad demográfica, permitiendo desarrollar sistemas de tratamiento con dimensiones mayores en comparación con sistemas convencionales. Un sistema de aireación extendida se caracteriza por poseer piscinas de tratamiento más largas de lo normal, debido a la combinación de estos dos factores, es una idea acertada implementar un sistema de aireación extendida respecto a otros tipos de tratamiento. Al tratarse de zonas rurales, es común que las cargas orgánicas no se mantengan constantes en el tiempo, debido principalmente a la baja población, el cual no mantiene un caudal constante tanto en cantidad de agua como en las características de esta misma. Un sistema de aireación extendida se encuentra adecuado a este tipo de fluctuaciones sin comprometer el tratamiento biológico y asegurando un funcionamiento correcto aún bajo estas condiciones. Las plantas de aireación extendida poseen un tiempo de residencia hidráulico mayor, siendo de entre 16 y 24 horas, lo que significa que la digestión de la materia orgánica es más largo en el tiempo, como consecuencia, las bacterias digieren la suficiente materia orgánica hasta agotar la misma y a su vez aumentan su población el tiempo suficiente para llegar a la fase endógena, donde el crecimiento de la población microbiana se detiene y comienzan a estabilizarse. En este caso la planta tiene un TRH de 31,9 h con un caudal de diseño de 3,4L/s, lo cual se extiende del valor esperado a una sistema de aireación extendida convencional, por otra parte, este TRH teórico es menor al TRH real que posee la planta de tratamiento Las Palmas, debido a que el TRH teórico se encuentra en base a 3,4L/s funcionando de manera continua durante las 24 horas, mientras que la planta Las Palmas recibe un caudal de manera irregular en el tiempo habiendo periodos en los que no hay un afluente ingresando al sistema, por lo cual, es probable que el uso de un digestor es redundante, para determinar con certeza si el uso de un digestor es beneficioso para la planta de tratamiento o resulta solo en pérdidas energéticas es necesario un estudio de biodegradabilidad del lodo, de esta forma se asegura que el tiempo que se demora en degradar la materia es concordante con los tiempos de residencia hidráulicos y celulares. Los resultados de tratamientos de aireación extendida son claros, son mucho más permisibles en su manipulación y operación, al mismo tiempo que ofrece una menor cantidad de lodos los cuales se encuentran mucho más estabilizados. Por lo cual, la implementación de un sistema con este tipo de técnicas es correcto en la localidad de las Palmas en Llay Llay. Sin embargo, su aplicación no se encuentra exenta de problemas, la falta de equipo necesario para el correcto funcionamiento como la falta de una bomba de purga de lodos, hacen que el lodo este viejo lo que luego genera problemas en la sedimentación secundaria.

En relación a la desinfección, mover la sala de desinfección resulta más complicado debido a que el diseño de la planta de tratamiento ya se encuentra establecido en un decreto respectivo y estos cambios en el diseño de la misma deben contar con el permiso tanto de la dirección de obras municipales, gobierno regional y seremi de salud.

En base al nitrógeno en forma de amonio presente en el efluente, lo cual es bastante común que se presente en aguas domésticas, su remoción ocurre sobre un 90% en el sistema de lodos activos. Un TRH de 31,9 h permite realizar una nitrificación de las aguas lo que claramente disminuye el

nitrógeno total Kjeldahl. Debido a que los organismos nitrificantes están presentes en casi todos los procesos aerobios de tratamiento biológico, esto permite llevar a cabo la aplicación de un método de nitrificación para convertir el amonio en exceso en nitrato. Debido a la baja densidad poblacional de los organismos nitrificantes, es necesario mantener niveles de DBO_5/NKT en una relación adecuada para mantener la población de organismos nitrificantes en el reactor, en la tabla 13 se muestra la relación entre la fracción de organismos nitrificantes y la relación de DBO_5/NKT , en el caso de esta agua residual la relación sería de 601/79,4 lo que es 8 y la fracción de nitrificantes sería del orden de 0,033. Otra solución para eliminar el alto contenido de nitrógeno sería implementar un sistema de nitrificación/desnitrificación conjunta (fango único), un sistema de dos etapas de nitrificación-desnitrificación debido a que el decreto supremo 90 tabla 1 no tiene requisitos para nitrito o nitrato, no es una obligación. Para el desarrollo de un sistema de nitrificación/desnitrificación conjunta, debido a que este cuenta con una eficiencia de remoción entre un 60-80 % de nitrógeno total, sería suficiente ya que no se necesita cumplir con el límite máximo de emisión porque no está establecido en el decreto supremo 90. En cuanto al funcionamiento de este método, se basa en utilizar el carbono presente en el agua residual y el que queda en los fragmentos de tejido celular bacteriano después de la degradación endógena de los organismos. Actualmente existen varios métodos de nitrificación/desnitrificación patentados, entre todas estas, se propone los canales de oxidación, funcionan haciendo que el líquido mezcla fluya dando cuentas en un canal cerrado, impulsado y aireado por mecanismos de aireación mecánica. En este canal se establecen dos zonas, una zona aerobia, y otra anóxica en la zona situada a continuación del aireador (véase la figura 9).

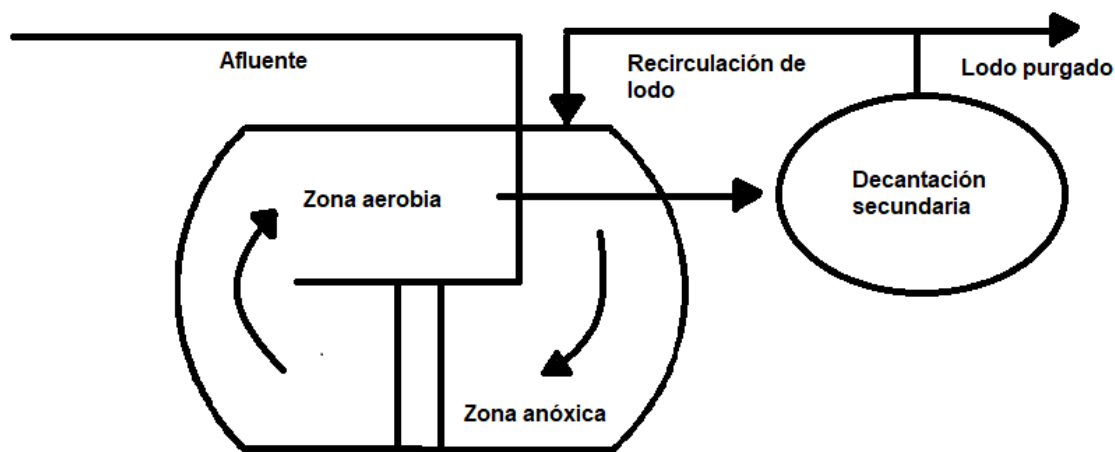
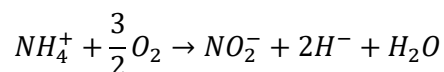
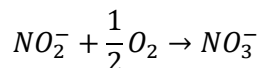


Figura 9 Diseño de canal de oxidación
Fuente: Metkalf & Eddy, INC. 1998

La forma en la que esta etapa realiza el ciclo del nitrógeno es mediante bacterias *Nitrosomas*, las cuales oxidan el amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-):



Posteriormente el nitrito es oxidado mediante bacterias llamadas *Nitrobacter* y convertido en nitrato (NO_3^-):



Una vez obtenido el nitrato, se procede a una etapa anaerobia, donde las bacterias proceden a utilizar el oxígeno presente en el nitrato para sus actividades metabólicas convirtiendo el nitrato en nitrógeno gaseoso (N_2). (Metcalf & Eddy, Inc, 1994)

El tratamiento de compuestos como el manganeso, suelen requerir el empleo de métodos y técnicas específicas, entre las que se recomienda el uso de una precipitación química, el cual se suele conseguir mediante la adición de coagulantes como alúmina, cal o sales metálicas, y polímeros, para ser luego retirados mediante un sedimentador. Este método aumenta la cantidad de lodo producido

Debido a que la planta ya cuenta con una etapa de desarenado, es posible realizar un desarenado-desengrasado conjunto, lo cual mejoraría la eficiencia de remoción de estos compuestos que pueden afectar los procesos posteriores. La propuesta es la instalación un sistema de flotación el cual mediante difusores se inyecta aire para producir burbujas capaces de atrapar la grasa y ser enviada a la superficie (Metcalf & Eddy, Inc, 1994).

Tabla 12 Problemas encontrados en el diseño y operación de la Planta de tratamiento Las Palmas y sus soluciones.

Problema	Comentarios	Solución
Exceso de lodo en reactor de lodos activos	La presencia de lodo se encuentra afectando a toda la planta en general, generando que el sedimentador secundario no cuente con valores adecuados para su correcto funcionamiento. el efluente contiene altas cargas de sólidos suspendidos, siendo el problema específico la falta de purga del sistema	Instalación de la bomba destinada a la purga de lodo la (revise apéndice para detalles técnicos de la bomba).
Alto parámetro de Coliformes	La potencia de las bombas dosificadoras no es suficiente para generar la fuerza necesaria para empujar el fluido a la zona de	Cambiar las bombas dosificadoras por unas que cuenten con una potencia mayor para trasladar el fluido a su zona de destino o mover

fecales en efluente de la planta	desinfección de la planta de tratamiento, como consecuencia, el agua no está recibiendo las dosis de cloración y decoloración.	la sala donde se realiza la mezcla de cloración y decoloración hacia un punto donde el trabajo realizado sobre el fluido sea suficiente para ser entregado en la zona de desinfección
Alto parámetro de manganeso en el efluente	Se ha encontrado una concentración de manganeso mayor al límite máximo permitido, por lo cual es necesario un proceso para la de la reducción de esta concentración en el efluente	Se propone la utilización de métodos de precipitación química para retirar este compuesto durante la sedimentación.
Desengrasado	Se han observados rejillas de paso con acumulación de grasas impidiendo el correcto paso hacia el sedimentador secundario	Un sistema de desengrasado trabajando en conjunto con el desarenado del agua con el método de flotación por inyección de aire mediante difusores.

Tabla 13 Relación entre la fracción de organismos nitrificantes y la relación DBO_5NKT .

Relación DBO_5NKT	Fracción de nitrificantes
0,5	0,35
1	0,21
2	0,12
3	0,083
4	0,064
5	0,054
6	0,043
7	0,037
8	0,033
9	0,029

6. Conclusión

El estudio del diseño y funcionamiento de la planta demostró las fallas que se pueden presentar en las plantas de tratamientos rurales, en cuanto al caso específico de la planta de tratamiento Las Palmas, la caracterización resultó necesario para determinar los problemas y falencias que se encontraban en la planta, donde las fallas resultaron evidentes, con problemas de sólidos suspendidos generando un mal funcionamiento del sedimentador secundario y etapa de desinfección con una falla en la dosificación.

Por otra parte, los cálculos de TRH en base al análisis de diseño de la planta, advirtió sobre la sobrestimación de los volúmenes tanto de los reactores, dejando en duda el si era necesario la aplicación de una etapa de digestión aerobia de lodos o si los lodos ya se encontraban lo suficientemente estabilizados para ser purgados directamente desde el sedimentador secundario y ser enviados a las canchas de secado para su deshidratación. Para una respuesta conclusiva, es necesario un análisis de biodegradabilidad del lodo, con esto se sabrá la necesidad de seguir estabilizando en un digestor aerobio.

En cuanto a los parámetros de diseño, el sistema de lodos activos es suficiente para remover nitrógeno total kjeldahl en aguas provenientes de un área rural. Sin embargo, el nitrato también puede afectar los cuerpos receptores generando problemas en la fauna, la propuesta de una etapa de canal de oxidación cuenta con el porcentaje de remoción suficiente de un 60 a 80 por 100 del nitrógeno, suficiente para alcanzar los niveles de concentración de nitrógeno adecuados para no afectar el cuerpo receptor con el efluente (Metcalf & Eddy, INC. 1998).

Los aspectos positivos de la planta de tratamiento Las Palmas, se destaca la eficiencia en la remoción de materia orgánica, alcanzando niveles de remoción de DQO de un 95%, como también la remoción de amonio que fue de un 93,2% lo cual se considera correcto para sistemas de lodos activos con nitrificación y concluye el hecho de una elección correcta de un método de aireación extendida como reactor.

Referencias

- Segui, P. S. (s. f.). *Cadena alimenticia y red trófica; terrestres y acuáticas*. OVACEN.
- World Health Organization: WHO. (2023, 13 septiembre). Agua para consumo humano. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Baeza, E. B. G. (2020, noviembre). *Contaminación N*. Biblioteca del congreso nacional. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33830/1/PR_Contaminacion_N.pdf
- Zarza, L. F. Z. (s. f.). *¿Qué son los contaminantes emergentes?* IAgua. <https://www.iagua.es/respuestas/que-son-contaminantes-emergentes>
- AMULEN. (s. f.-a). del agua rural de Chile: Visualización de un problema oculto. *Pobres de agua*. https://www.fundacionamulen.cl/wpcontent/uploads/2020/07/Informe_Amulen.pdf
- *Los procesos básicos del tratamiento de las aguas residuales*. (s. f.). <https://www2.aerzen.com/es/aplicaciones/agua-y-tratamiento-de-aguas-residuales/asesoramiento-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales/procesos-del-tratamiento-de-las-aguas-residuales.html>
- Fragkou, Maria-Christina, Monsalve-Tapia, Tamara, Pereira-Roa, Vicente, & Bolados-Arratia, Maximiliano. (2022). Abastecimiento de agua potable por camiones aljibe durante la megasequía. Un análisis hidrosocial de la provincia de Petorca, Chile. *EURE (Santiago)*, 48(145), 1-22. <https://dx.doi.org/10.7764/eure.48.145.04>
- Vargas, Adriana K.N., Calderón, Jimmy, Velásquez, David, Castro, Milton, & Núñez, Diego A.. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales

domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 315-322. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315>

- («Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds», 2017)
- Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos. (1989). *Depuración de aguas residuales*.
- Metcalf & Eddy, Inc. (1994). *Ingeniería de aguas residuales* (3.^a ed.).
- *Resumen de Salud Pública: Manganeso (Manganese) | PHS | ATSDR*. (2016). Agencia Para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs151.html.

Apéndice

Bomba Purga de Lodos

A continuación se detallan las especificaciones técnicas de la bomba destinada a la instalación en el sistema de digestión para realizar la labor de la purga de lodos.

Bomba de Lodos KBZ 31.5T

El cuerpo del motor y de la bomba están fabricados en hierro fundido rígido para una mayor durabilidad. Profundidad de inmersión fuertemente incrementada gracias a su sello mecánico resistente a alta presión (0.5Mpa). Impulsor semi abierto hecho de aleación al cromo y placa de desgaste en acero dúctil, logrando una durabilidad superior.

- 1.- potencia 2.0 hp
- 2.- voltaje 380 volts
- 3.- corriente 3.5 a.
- 4.- descarga 3"
- 5.- 2900 rpm
- 6.- paso libre de sólidos 8.5mm
- 7.- altura máxima de descarga 14.0 mts.
- 8.- caudal máximo 500 lts/min.



Figura 10. Bomba para Lodos KBZ 31.5

Tabla 7. Caudales máximos para bomba KBZ 31.5

Trifase 400V- 50HZ	HP	Q= Caudal	m3/h	6	12	18	24	30
			L/min	100	200	300	400	500
KBZ 31.5	2,0			14	13,3	12	10,8	8,1