UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA TERMINAL DE RECOPE DE BARRANCA, PUNTARENAS

AUTOR:

FRANCINIE DE LOS ÁNGELES SALAS CRUZ

TUTOR:

ING. ALBERTO GONZÁLEZ SOLERA

HEREDIA

ABRIL, 2021

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD (PROYECTO DE GRADUACIÓN)

Heredia, 16 de abril del 2021

Sres.

Miembros del Comité de Trabajos de Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Proyecto de Graduación bajo el titulo **PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA TERMINAL DE RECOPE DE BARRANCA, PUNTARENAS** por parte de la estudiante: Francine Salas Cruz como requisito para que el citado estudiante pueda optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenidos exigidos por la Universidad, y por lo tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe Cordialmente.

LEONARDO MOYA GONZALEZ (FIRMA)

Firmado digitalmente por LEONARDO MOYA GONZALEZ (FIRMA)
DN: SERIALNUMBER=CPF-01-0406-0491, SN=MOYA GONZALEZ, G=LEONARDO, C=CR, O=PERSONA FISICA, OU=CIUDADANO, CN=LEONARDO MOYA GONZALEZ (FIRMA)
Razón: Soy el autor de este documento
Ubicación: la ubicación de su firma aquí
Fecha: 2021.04.16 16:38:12-06'00'
Foxit Reader Versión: 10.1.3

Ing. Leonardo Moya González.

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
POWERED BY Arizona State University

INGENIERÍA CIVIL

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD PROYECTO DE GRADUACIÓN

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD PROYECTO DE GRADUACIÓN

Heredia, 6 de Abril del 2021

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Proyecto de Graduación bajo el título "PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA TERMINAL DE RECOPE DE BARRANCA, PUNTARENAS" por parte de la estudiante: Francinie Salas Cruz, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,

ALBERTO GONZALEZ SOLERA (FIRMA)

Firmado digitalmente por ALBERTO GONZALEZ SOLERA (FIRMA)
Fecha: 2021.05.03 12:48:54 -06'00'

Esp. Ing. Alberto González Solera
IC-16251
Consultor Ambiental CI-232-2015-SETENA
Fiscal de Inversión CFIA/ Perito Poder Judicial.

Constancia de revisión filológica

Yo, Yessenia Pérez Cisneros, cédula 2-0607-0752, vecina de El Carmen de Guadalupe, de profesión filóloga y profesora universitaria, bachiller en Filología Española y licenciada en Docencia, inscrita ante el Colegio de Licenciados y Profesores en Letras, Filosofía, Ciencias y Artes (COLYPRO) bajo el carné 59520, con conocimientos y vasta experiencia en revisión y corrección de estilo de textos, doy fe de que he revisado y corregido la tesis de la estudiante Francinie de los Ángeles Salas Cruz, cédula 1-1265-0821, de título *Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la terminal de Recope de Barranca, Puntarenas*, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina de Costa Rica.

Después de la revisión y corrección considero que la tesis indicada anteriormente cuenta con todos los aspectos fundamentales en tanto estilo y redacción que la hacen apta para ser presentada al proceso de evaluación correspondiente al nivel de licenciatura y en miras a ser tomada como referencia en otros futuros trabajos de investigación.

Quedo a disposición para cualquier consulta en:

Correos electrónicos: yessmay85@gmail.com / yperezci@colegiadoscolypro.com

Teléfonos: 8776-3166 / 8494-1133

Sin otro particular, firmo en San José a las 14:00 horas del 3 de mayo de 2021.

YESENIA PEREZ CISNEROS (FIRMA)

Firmado digitalmente por YESENIA PEREZ CISNEROS (FIRMA)
Fecha: 2021.05.03 14:04:27 -06'00'

"Carta autorización del autor (es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación"

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016, revisada el 24 de Abril de 2020

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):
Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

Salas Cruz Francinie de los Ángeles

De la Carrera / Programa:
autor(es) del trabajo final de graduación titulado:

Ingeniería Civil
"Propuesta de Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la terminal de Recope de Barranca, Puntarenas".

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página Web institucional, así como medios electrónicos en general, Internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo a lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de la misma.

La presente autorización se extiende el día *(Día, fecha)* 03 del mes mayo de año 2021 a las 15:00 . Asimismo doy fe de la veracidad de los datos incluidos en el documento y eximo a la Universidad de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores
Según orden de mención al inicio de ésta carta:

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia.

A mis padres, a mi hermana y a mis hijos, a quienes amo con todo mi corazón y han sido una fuente de inspiración para superarme día con día.

Han estado presentes en todas las etapas de mi vida, forman parte de mis logros y triunfos, por su apoyo incondicional y desinteresado en cada una de las aventuras que Dios me ha permitido vivir.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por estar presente en mi vida, por ser mi fuerza interior para lograr mis sueños y metas.

A mis compañeros de trabajo y amigos que me han apoyado de una u otra manera para poder concluir esta carrera, y que sin el aporte que he recibido de ellos hubiese sido un camino más largo y difícil de sobrellevar.

Al ingeniero Alberto González Solera quien ha servido de guía y apoyo incondicional para lograr concluir este trabajo.

A mi familia en general, que con sus oraciones y acciones han contribuido con mi desarrollo profesional.

Resumen

La terminal de Recope, ubicada en Barranca, Puntarenas, es una de las estaciones de trabajo claves para el abastecimiento de combustible en la Región Pacífica de nuestro país, cuenta actualmente con un área de operación de 9,88 hectáreas aproximadamente, por su actividad comercial recibe alrededor de 80 camiones diarios para el suministro y trasiego de combustibles, y sus instalaciones se componen de varias edificaciones dentro de la terminal, las cuales fueron diseñadas cada una con su respectivo tanque séptico para la recolección de las aguas residuales, actualmente se dispone de 12 tanques para estos fines.

Sin embargo, para estas soluciones no se cuenta con un programa de limpieza y han sido objeto de contaminación, debido a que en época lluviosa el nivel freático del terreno tiende a subir y provocar infiltraciones por los drenajes de estos tanques, estimulando la deficiencia en los procesos de depuración, además de estancamientos de agua que generan la presencia de microorganismos patógenos y causantes de enfermedades.

Con el presente trabajo se pretende brindar una propuesta preliminar de diseño hidráulico y sanitario de una planta de tratamiento de aguas residuales, con el fin de solventar los problemas anteriormente expuestos y mejorar las condiciones del lugar de trabajo para los usuarios de estas instalaciones.

La propuesta de diseño de esta planta se realiza con base en el método de lodos activados de aireación extendida, debido a que es uno de los procesos de tratamiento de aguas residuales que menor generación de malos olores producen en su entorno, lo cual es beneficioso para la empresa, dada la actividad humana que se presenta diariamente en estas instalaciones.

ABSTRACT

The Recope terminal located in Barranca, Puntarenas, is one of the key work stations for the supply of fuel in the Pacific Region of our country it currently has an area of operation of approximately 9.88 ha for its commercial activity it receives around 80 trucks per day for the supply and fuel transfer and its facilities are made up of several buildings within the terminal, which were designed each with its respective septic tank for the collection of wastewater currently there are 12 tanks for these purposes.

However, for these solutions there is no cleaning program, and it has been subject to contamination, because in the rainy time the groundwater table tends to rise and cause infiltrations through the drains of these tanks stimulating the deficiency in purification processes as well as water stagnations that generate the presence of pathogenic and disease-causing microorganisms.

The present work is intended to provide a preliminary proposal for the hydraulic and sanitary design of a wastewater treatment plant in order to solve the problems previously exposed, and improve workplace conditions for the users of these facilities.

The design proposal for this plant is based on the extended aeration activated sludge method, because it is one of the wastewater treatment processes that produces less bad odors in its environment which is beneficial for the company according to human activity that occurs daily in these facilities.

Tabla de contenidos

1.) INTRODUCCIÓN 1

1.1.) Antecedentes 1

1.2.) Planteamiento del problema 2

1.3.) Objetivos 4

1.4.) Justificación 5

1.5.) Alcances y limitaciones 6

1.6.) Impacto 7

2.) MARCO TEÓRICO 8

2.1.) Marco situacional 8

2.2.) Marco conceptual 8

2.3.) Plantas de tratamiento de aguas residuales 13

2.4.) Pretratamiento 15

2.5.) Canal de entrada 16

2.6.) Pozo de muy gruesos 17

2.7.) Desbaste 18

2.8.) Rejillas mecánicas 19

2.9.) Desarenador 20

2.10.) Dilaceración 20

2.11.) Tratamiento primario 21

2.12.) Tratamiento secundario 23

2.13.) Lodos activados 24

2.14.) Sistemas de aireación 25

2.15.) Decantador secundario 30

2.16.) Lechos de secado de lodos 32

2.17.) Tratamientos de aguas residuales más utilizados en Costa Rica 33

3.) MARCO METODOLÓGICO 36

3.1.) Paradigma 36

3.2.) Enfoque metodológico 37

3.3.) Técnicas e instrumentos para la recolección de datos 37

3.4.) Cálculo del caudal de diseño 38

3.5.) Canal de entrada 39

3.6.) Rejillas de retención 40

3.7.) Pérdida de carga 41

3.8.) Cantidad de barrotes 42

3.9.) Longitud de barras 42

3.10.) Desarenadores 43

3.11.) Reactor biológico 46

3.12.) Tanques de sedimentación 51

3.13.) Tanque digestor de lodos 51

3.14.) Lecho secado de lodos 52

4.) ANÁLISIS DE RESULTADOS 54

4.1.) Ubicación de la planta de tratamiento 54

4.2.) Cumplimiento de normativas 55

4.3.) Resultados de diseño 57

4.4.) Tanques de sedimentación 70

4.5.) Tanque digestor de lodos y lechos de secado 72

5.) PROPUESTA DE DISEÑO 75

Conclusiones 76

Recomendaciones 78

Glosario 79

Bibliografía 80

Anexos 84

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Secuencia de la degradación de los compuestos orgánicos. 12

Ilustración 2. Situación de las operaciones físicas unitarias en el diagrama de flujo de una planta de tratamiento de agua residual..... 14

Ilustración 3. Zona de rejillas..... 16

Ilustración 4. Pozo de muy gruesos. 17

Ilustración 5. Corte del pozo de muy gruesos..... 18

Ilustración 6. Rejilla media con lámina perforada para escurrimiento del material extraído. 19

Ilustración 7. Rejas automáticas de limpieza mecánica..... 20

Ilustración 8. Decantadores..... 22

Ilustración 9. Zonas de un decantador secundario. 25

Ilustración 10. Teoría de la doble capa de difusión molecular gas – líquido..... 26

Ilustración 11. Implementos para la aireación mediante aire difundido. 27

Ilustración 12. Aireador mecánico superficial. 28

Ilustración 13. Aireador de turbina. 28

Ilustración 14. Difusores de un reactor biológico de lodos activados. 29

Ilustración 15. Decantador circular y rectangular..... 32

Ilustración 16.) Esquema de una planta depuradora de filtración sobre lechos de turba..... 33

Ilustración 17. Diagrama de flujo de tratamiento de lodos activados convencional. 34

Ilustración 18. Reactor biológico anaerobio UASB 35

Ilustración 19. Laguna facultativa..... 35

Ilustración 20. Cámara de rejillas y desarenador. 46

Ilustración 21. Difusores de burbuja fina..... 47

Ilustración 22. Zona propuesta para ubicación de planta de tratamiento..... 54

Ilustración 23. Tanques de aireación. 70

Ilustración 24. Lecho de secado..... 74

Ilustración 25. Ingreso al área operativa. 84

Ilustración 26. Zona de ubicación de la Planta de Tratamiento. 84

Ilustración 27. Ruta hacia Río Naranjo..... 85

Ilustración 28. Río Naranjo..... 85

Índice de tablas

Tabla 1. Grado de tratamiento obtenido mediante diversas operaciones y procesos unitarios empleados en el tratamiento primario y secundario del agua residual. 15

Tabla 2. Composición típica de una agua residual doméstica. 30

Tabla 3. Criterios de diseño para el canal de entrada: 39

Tabla 4. Criterios de diseño de los desarenadores: 43

Tabla 5. Retiros mínimos a linderos de propiedad: 55

Tabla 6. Facturación de agua potable: 57

Tabla 7. Rejillas de retención: 60

Tabla 8. Solubilidad de oxígeno en el agua: 67

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo del caudal promedio de aguas residuales ordinarias: 38

Ecuación 2. Cálculo del caudal promedio de aguas residuales: 38

Ecuación 3. Cálculo del caudal máximo: 38

Ecuación 4. Cálculo del caudal mínimo: 39

Ecuación 5. El área del canal se calculó con la siguiente fórmula: 40

Ecuación 6. La pendiente del canal de entrada se calculó con la fórmula Manning: 40

Ecuación 7. Profundidad en la zona de rejilla: 41

Ecuación 8. Pérdida de carga: 41

Ecuación 9. Cálculo del número de barrotes: 42

Ecuación 10. Cálculo de longitud de las barras: 42

Ecuación 11. Cálculo del área del canal desarenador: 43

Ecuación 12. Cálculo del volumen del canal desarenador: 44

Ecuación 13. Tiempo de retención hidráulica: 44

Ecuación 14. Cálculo del área transversal: 45

Ecuación 15. Cálculo del ancho del canal desarenador: 45

Ecuación 16. Cálculo del largo del canal: 45

Ecuación 17. Cálculo de volumen: 46

Ecuación 18. Cálculo del área del tanque: 47

Ecuación 19. Cálculo de cantidad de aire requerido: 48

Ecuación 20. Se calcula la presión hidrostática del agua con el fin de corroborar que la presión de los

po

ros de los difusores sea mayor que la presión absoluta: 48

Ecuación 21. Cálculo de la presión absoluta o presión de aire requerida en la descarga: 48

Ecuación 22. Cálculo de saturación de oxígeno para una presión de trabajo distinta a la normal: 49

Ecuación 23. Cálculo de las condiciones reales de los difusores: 49

Ecuación 24. Cálculo de cantidad de difusores: 50

Ecuación 25. Cálculo de espaciamiento entre unidades: 50

Ecuación 26. Cálculo de la potencia: 50

Ecuación 27. Cálculo del área del tanque digestor: 52

Ecuación 28. Cálculo del volumen del tanque digestor: 52

Ecuación 29. Cálculo de volumen de lecho de secado: 53

Ecuación 30. Cálculo del área del lecho de secado: 53

1.) INTRODUCCIÓN

1.1.) Antecedentes

¿Cuál es el tratamiento comúnmente utilizado en Costa Rica para el manejo de las aguas residuales?

¿Cuáles son los lineamientos con los que se debe cumplir según la ley costarricense para el manejo de plantas de tratamiento de aguas residuales?

Según Fallas (2012), estudios realizados con base en la población costarricense, el 73,82% cuenta con servicios de saneamiento como tanques o fosas sépticas y letrinas. Entretanto, solo el 0,39 % no posee cobertura alguna.

Los tanques sépticos han sido utilizados a través de los años en nuestro país como primera medida adoptada en todo el territorio nacional; sin embargo, ha sido necesario ampliar nuevas disposiciones para el manejo de las aguas residuales, con el fin de reducir la contaminación ambiental por filtraciones y mal manejo de estos sistemas. Es por lo anterior que se ha desarrollado un avance en el tema de las plantas de tratamiento y del alcantarillado sanitario "cubriendo al 25,56% de la población con su servicio" (Fallas, 2012, pág. 11).

"La cobertura de los servicios de saneamiento en Costa Rica está a cargo del AyA, la Municipalidad de Alajuela, la Municipalidad de Cartago, JASEC, ESPH S.A., ASADAS, el MSP y en menor grado de operadores privados" (Fallas, 2012, pág. 21).

Dentro de algunos lineamientos a mencionar con los que deben cumplir los entes generadores de aguas residuales están la confección de reportes para verificar el cumplimiento de los parámetros permitidos para el vertido en cuerpos de agua, esto según el Artículo 5 del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (Ministerio de Ambiente y Energía; Ministerio de Salud, 2016), el pago por carga contaminante neta vertida (DQO) en función de los servicios prestados por los cuerpos de agua, regulado mediante el decreto No. 34431/MINAE Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos (Gutiérrez & González, Canon Ambiental por Vertidos en Costa Rica, 2020), entre otros

reglamentos y normativas costarricense expuestos en el informe presentado por Fallas, 2012, pág.18.

1.2.) Planteamiento del problema

¿Por qué se requiere una planta de tratamiento de aguas residuales en la terminal Recope de Barranca, Puntarenas?

La terminal de Recope ubicada en Barranca, Puntarenas, actualmente cuenta con diversas edificaciones para uso de oficinas, vestidores, comedor y casetas de seguridad, en su mayoría construidas desde los inicios de operaciones de dicha empresa; se puede decir que algunas de estas edificaciones cuentan con más de 30 años de construcción, motivo por el cual se entiende el deterioro de las obras existentes y la necesidad de implementar nuevos sistemas y obras en esta terminal.

Es una terminal con grandes proyecciones y metas empresariales por su ubicación estratégica en la zona de Puntarenas, su enfoque va dirigido a un crecimiento en activos, es decir, implementar nuevos procesos operacionales para almacenaje y distribución de combustible, tales como construcción de más tanques de almacenamiento y una extensión del oleoducto de Barranca, Puntarenas hasta Liberia, Guanacaste, con el fin de garantizar un servicio constante a toda la población en general.

Es por lo anterior que se considera necesario velar por un buen funcionamiento de los procesos y la infraestructura existente, que contribuyan a obtener cada vez mejores resultados, eficiencia en los procesos, equilibrio con el medio ambiente y uso racional de los recursos.

Actualmente se cuenta con una área de 9,88 hectáreas aproximadamente para uso de esta terminal, su área operativa recibe alrededor de 80 camiones diarios para compra de combustible como: diésel, gasolina súper y gasolina plus o regular, y se dispone de 68 colaboradores en total, lo que permite valorar la posibilidad de hacer uso de áreas que aún no son usadas para el desarrollo de un proyecto como este que pretende mejorar la recolección y el manejo de las aguas residuales, que además son producto constante del empleo de estas instalaciones.

Las edificaciones existentes poseen áreas entre 100 y 300 m² aproximadamente para los usos antes mencionados, y para la recolección de las aguas residuales se utiliza la solución de tanques sépticos, lo cual ha generado inconvenientes por infiltración de aguas en los drenajes que a su vez provoca deficiencia en el proceso de depuración, además da como resultado el estancamiento de aguas residuales en la superficie del terreno, principalmente en presencia de lluvias. Esto por su parte genera existencia de microorganismos causantes de enfermedades y malos olores en el medio ambiente en el que se encuentran las personas.

Los tanques sépticos se han convertido en una solución cada vez menos utilizada dentro de la medida de lo posible debido a las fallas por infiltraciones del agua residual en el suelo, falta de mantenimiento y contaminación generada por agua estancada y malos olores, problemas que se vuelven aún más evidentes en épocas lluviosas.

1.3.) Objetivos

1.3.1.) Objetivo general

Proponer un diseño hidráulico y sanitario para una planta de tratamiento de aguas residuales en la terminal de Recope Barranca, que contribuya con un manejo óptimo de las aguas residuales.

1.3.2.) Objetivos específicos

- Analizar los factores que contribuyen a la mejor ubicación para el desarrollo de este proyecto dentro de las instalaciones de la terminal.
- Determinar el tipo de tratamiento adecuado para el diseño de la planta.
- Calcular las dimensiones de los sistemas que forman parte del diseño hidráulico y sanitario de una PTAR.

1.4.) Justificación

Es a partir de la toma de conciencia de las personas que se puede pensar en proteger el recurso hídrico que nos rodea. Se estima que el 80% del agua potable utilizada para el consumo humano es retornada como agua residual al medio ambiente, y en una sociedad que crece constantemente estos valores de agua procesada aumentan considerablemente, por lo que se vuelve necesario vivir en equilibrio con el medio ambiente.

El problema expuesto en la terminal de Recope requiere tomar medidas para tratar las aguas residuales que actualmente están generando contaminación por estancamiento, malos olores, infiltraciones en el terreno y falta de mantenimiento a los tanques sépticos, motivos por los que se considera necesaria la utilización de una planta de tratamiento.

Es importante tomar en cuenta que además de los colaboradores la terminal recibe visitantes continuamente por la actividad comercial a la que se dedica, por lo que la propuesta va dirigida a un tratamiento de tipo aireación prolongada con el fin de no generar molestias por malos olores dentro y fuera del área de operaciones de Recope, además se cuenta con un cuerpo de agua receptor de flujo continuo para el efluente tratado.

1.5.) Alcances y limitaciones

El diseño propuesto de la planta de tratamiento es hidráulico y sanitario. Para el análisis y cálculos de este proyecto se utilizaron datos reales de las facturaciones de agua potable de esta terminal, datos con los que se calculó el caudal de diseño.

En la zona donde se encuentra la terminal no se cuenta con alcantarillado sanitario, por lo que se propone desfogar el efluente en el río Naranjo, mismo que posee un flujo continuo.

Dentro del uso de normativas a utilizar para el cumplimiento del marco legal se menciona: Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales del MINAE-S Nº33601, 2007 y vigente a la fecha, Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos Nº 39316-S, 2015, Reglamento de aprobación de sistemas de tratamiento de aguas residuales emitido por el Ministro de Salud y el Ministerio de Ambiente y Energía según decreto ejecutivo 39.887-S-MINAE.

La propuesta de este proyecto se limitará a presentar los resultados sobre dimensionamientos y factores importantes para el diseño del sistema en cada una de sus etapas, como caudales, longitudes, áreas, volúmenes, dispositivos, equipos, entre otros, requeridos para que posteriormente y fuera del alcance de este trabajo se desarrolle el diseño estructural que soporte las condiciones que se necesitan para la construcción de este sistema.

1.6.) Impacto

El proyecto propuesto beneficia directamente a los usuarios en general de estas instalaciones, debido a que se obtendría una mejora en el aspecto físico y ambiental del área de operaciones de la terminal de Recope, Barranca, al eliminar malos olores, estancamientos de agua, tuberías en mal estado por deterioro y falta de mantenimiento, es decir, la propuesta contribuye a un avance en la infraestructura y ambiente de la compañía.

Además, el agua tratada puede ser reutilizable en labores de riego para las mismas zonas verdes de trabajo, y los lodos podrían ser utilizados en compostaje como parte de las contribuciones ambientales de las que participa la empresa.

Por tanto, a diferencia de los tanques sépticos que cada vez se vuelven una propuesta menos viable por contaminación debido a infiltraciones, la planta de tratamiento de aguas residuales cumple la función de generar otras alternativas de uso con las aguas residuales y desechos obtenidos de los procesos que se llevan a cabo en este tratamiento.

2.) MARCO TEÓRICO

2.1.) Marco situacional

La terminal de Recope para la cual se presenta el objeto de estudio está ubicada en la zona de Barranca, perteneciente a la provincia de Puntarenas, sobre carretera Interamericana, a una elevación aproximada de 42 m.s.n.m.

El diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales se plantea realizar en una propiedad de Recope ubicada en el sector este de la terminal, fuera del área de operaciones, en un terreno extenso que actualmente se encuentra improductivo y sin construcciones.

El desfogue de la planta de tratamiento de aguas residuales se plantea realizar sobre el río Barranca, el cual presenta un flujo continuo y se ubica en los límites del costado sur de la terminal.

2.2.) Marco conceptual

La presente propuesta de proyecto se enfoca en el diseño hidráulico y sanitario de una planta de tratamiento de aguas residuales de tipo lodos activados, aireación extendida, por tanto, el desarrollo del diseño se llevó a cabo con base en libros de texto, informes, reglamentos, entre otras fuentes que serán indicadas en este trabajo.

Además, los resultados obtenidos fueron corroborados con base en la normativa costarricense, con el fin de cumplir con los parámetros establecidos para el funcionamiento, reúso y vertido de las aguas residuales. Por ello se darán a conocer los tipos de cargas contaminantes, valor de la carga a utilizar, caudales, entre otros conceptos propios de esta investigación.

2.2.1.) Aguas residuales

Las aguas residuales pueden ser de tipo ordinarias o especiales, se diferencian unas de otras por su procedencia: las aguas residuales ordinarias son producto de las actividades domésticas humanas, por ejemplo: de inodoros, duchas, fregaderos, entre

otras, mientras que las de tipo especial proceden de medios distintos al ordinario, como por ejemplo: actividades industriales, aires acondicionados, alcantarillado pluvial, entre otros.

El tratamiento de aguas residuales depende del contenido de estas, ya que los procesos de eliminación de las sustancias pueden ser por medios aeróbicos como es el caso de mayor contenido de materia orgánica, por medios anaeróbicos o anóxicos.

En los procesos anaerobios el oxidante se encuentra en el propio sustrato orgánico, tomando la denominación de fermentación, siendo el dióxido de carbono (CO_2) el principal producto oxidado final y el reducido, el metano (CH_4).

La respiración anóxica transcurre en los procesos de biodegradación en donde el nitrato (NO_3) y sulfatos (SO_4) son los compuestos aceptores de electrones.

Los microorganismos en los procesos de biodegradación con respiración aeróbica utilizan el oxígeno del agua, de modo que controlando la medida de la concentración del oxígeno disuelto se sigue este proceso.

Las técnicas de la medida de la utilización o consumo del oxígeno disuelto en procesos de lodos activos se denominan respirometría de lodos (Rodríguez, 2006).

En Costa Rica el tratamiento de las aguas residuales ha sido objeto de debate desde tiempo atrás, por adecuar una normativa que satisfaga los requerimientos de vertidos y reúsos de los efluentes. Anteriormente no se contaba con un reglamento que se encargara de regular la salud de los cuerpos receptores de agua, es por ello que a partir del año 2008 se aprobó el Canon Ambiental por Vertidos (CAV) mediante el Decreto 34431/MINAET, el cual se define de la siguiente manera:

> “Es un instrumento económico de regulación que se fundamenta en el principio de "quien contamina paga" y que pretende el objetivo social de alcanzar un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, de conformidad con lo dispuesto en el Artículo 50 de la Constitución Política, a través del cobro de una contraprestación en dinero a quienes usen el servicio ambiental de los cuerpos de agua” (Gutiérrez & González, 2020, pág. 40).

Además, el Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales también ha sido un aporte fundamental para los proyectos que implican un tratamiento de aguas residuales, debido a que se establecen parámetros para cumplir con la aceptabilidad de los resultados obtenidos por el proceso de tratamiento.

Lo anterior expuesto forma parte de los recursos teóricos y prácticos con los que se debe cumplir para el diseño y desarrollo de un proyecto de tratamiento de aguas residuales, entre otras normativas.

2.2.2.) Composición de las aguas residuales

La composición de las aguas residuales se basa en agua potable, sólidos, gases disueltos y componentes biológicos. Los sólidos se clasifican en suspendidos, disueltos y totales, a su vez, estos se dividen en orgánicos e inorgánicos, de manera que según esta última clasificación se puede deducir la carga orgánica que puede contener un agua residual, es decir, según el origen del agua residual se puede estimar si su contenido es alto en sustancias orgánicas y/o inorgánicas, esto varía según la actividad del ser humano, por ejemplo, el agua residual recolectada de una granja tendrá mayores contenidos de sustancias orgánicas y por ende mayor carga contaminante, en comparación con aguas residuales recolectadas de uso de oficinas.

El contenido de sustancias orgánicas se puede encontrar en proteínas, carbohidratos y grasas, y estas pueden ser degradadas mediante bacterias, mientras que las sustancias inorgánicas se refieren a componentes inertes que no se pueden degradar por organismos vivos o bacterias, tales como arenas y sales minerales; para su eliminación se requiere acudir a procesos físicos o químicos como la oxidación.

Algunos de los organismos que se encargan de optimizar las aguas residuales son:

Bacterias: son las principales responsables de la degradación y estabilización de la materia orgánica contenida en las aguas residuales. Su crecimiento óptimo ocurre a pH entre 6,5 y 7,5.

Hongos: predominan en las aguas residuales de origen industrial debido a que resisten muy bien valores de pH bajos y la escasez de nutrientes.

Protozoos: en especial los ciliados, se alimentan de bacterias y materia orgánica, mejoran la calidad microbiológica de los efluentes de las PTAR.

Actinomicetos: son bacterias filamentosas conocidas por causar problemas en reactores de lodos activados, generan la aparición de espumas (*foaming*) y pérdida de sedimentabilidad del lodo, hinchamiento *o bulking* filamentoso, incrementado los sólidos del efluente y la disminución de la eficiencia de la PTAR. Uno de los actinomicetos más recurrente en los reactores es la Nocardia (Rivas, 2012).

2.2.3.) Demanda biológica de oxígeno

La cantidad de carga contaminante orgánica de un agua residual se denomina DBO, demanda biológica o bioquímica de oxígeno.

La determinación de la DBO implica conocer el oxígeno consumido por las bacterias en un intervalo de tiempo, ya que existe una relación cuantitativa entre el oxígeno consumido y la concentración de material orgánico que se transforma en dióxido de carbono y amoníaco (Gutiérrez & Olmo, 2007, pág. 3).

Se trata de una prueba biológica realizada en un laboratorio, toma en cuenta parámetros como tiempo y temperatura de incubación del agua residual, normalmente se establece que el agua residual permanezca retenida durante 5 días a una temperatura de 20ºC, con lo cual se analizan el tiempo y velocidad de consumo de oxígeno que requieren las bacterias para degradar la carga contaminante.

El resultado de DBO permite conocer la calidad del agua de un efluente y evaluar su resultado con los parámetros establecidos en el Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales. Para el caso de vertidos de aguas residuales a un cuerpo receptor se indica que el límite máximo permitido por este reglamento es de 50 mg/L.

Cuando las bacterias mueren este tejido celular se convierte en alimento de otras y prosigue la conversión de la materia orgánica en dióxido de carbono y agua. Una parte de las bacterias vivas y muertas sirven de alimento a los protozoos y continúa la degradación de la materia orgánica (Gutiérrez & Olmo, 2007, pág. 10).

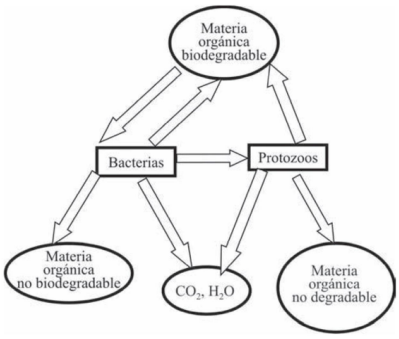


Ilustración 1. Secuencia de la degradación de los compuestos orgánicos.

Fuente: Gutiérrez & Olmo (2007).

Según Metcalf & Eddy (1995), los resultados de los ensayos de DBO se emplean para:

1) Determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente.
2) Dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales.
3) Medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento.
4) Controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos.

2.2.4.) Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO), al igual que la DBO, es una prueba que mide el grado de contaminación en el agua, pero (a diferencia de la DBO) utiliza medios químicos. La DQO se encarga de medir sustancias orgánicas no biodegradables, tales como pesticidas e insecticidas presentes en las aguas residuales y por su naturaleza podrían ser tóxicas o de reducción muy lenta para los microorganismos que sí trabajan bajo condiciones biológicas.

Para el control de una depuradora este método se prefiere sobre el de la DBO, debido a que el resultado de la DQO se obtiene en unas 3 horas y con un error mucho menor que la DBO, obtenida a los 5 días (Rivas, 2012).

El valor máximo permitido de la DQO para el vertido en cuerpos de agua, según el Artículo 20 del Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales, es de 150 mg/L.

2.3.) Plantas de tratamiento de aguas residuales

El desarrollo de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales conlleva un análisis de diferentes factores como caudales, tipos de residuos o cargas contaminantes, clasificación del agua residual a tratar; posteriormente se requiere valorar los procesos que mejor se adecúan al tratamiento, ya sea por un tema de espacio físico para su construcción, presupuesto económico, mano de obra especializada para la operación, entre otros.

Las plantas de tratamiento se diseñan para un periodo de 20 a 25 años, según Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (2017), para estos periodos se proyectan una población y dotación por habitante con las cuales se calculan los caudales de diseño. Sin embargo, para esta propuesta el caudal de diseño se dedujo a partir de las facturaciones de agua potable mensuales durante los meses de enero a diciembre del año 2020 de la terminal de Recope en Barranca.

La primera fase a tomar en cuenta para el diseño de los elementos que componen el tratamiento del agua residual es la separación de los sólidos que van a ingresar al sistema, para lo cual es necesario diseñar un canal de entrada del agua con un sistema de rejillas, las cuales pueden ser de tipo manual o mecánico; posteriormente se requiere un tanque o canales para el desarenador, el cual se diseña con una velocidad adecuada para que se puedan separar las partículas más densas como las arenas y continúe el flujo de agua hacia la entrada de los tanques de aireación; estos cumplen la función de eliminar las sustancias orgánicas biodegradables. Posteriormente se redirige el agua a los tanques de sedimentación, mientras los lodos se dirigen al tanque digestor y al lecho de secado, etapas que se desglosarán en el presente proyecto.

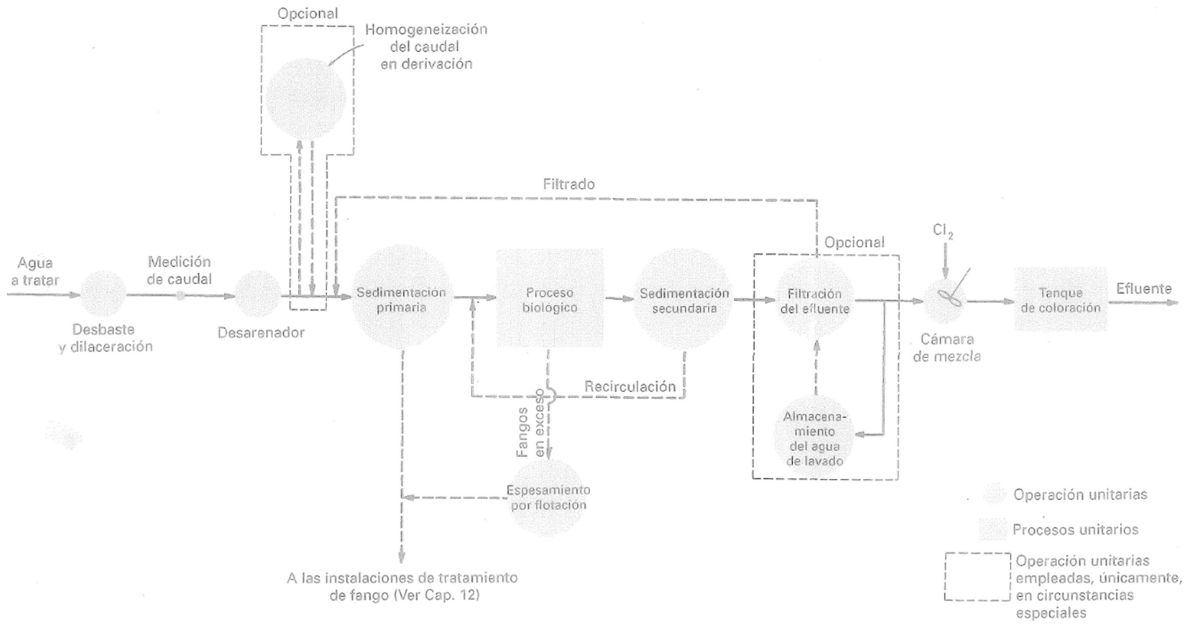


Ilustración 2. Situación de las operaciones físicas unitarias en el diagrama de flujo de una planta de tratamiento de agua residual.

Fuente: Metcalf & Eddy (1995).

Los porcentajes de eliminación de contaminantes en una planta de tratamiento son los que determinan el rendimiento del sistema, para ello es necesario analizar la calidad y la variación del afluente que ingresará a la planta, es decir, que la eficacia del sistema es evaluada según cumpla con los parámetros permitidos por la normativa de cada país. Para valorar el grado de rendimiento de cada unidad que compone la planta de tratamiento se ha realizado un análisis en el cual se aprecian el tipo de constituyente del agua residual y el porcentaje de depuración que puede ser eliminado.

Tabla 1. Grado de tratamiento obtenido mediante diversas operaciones y procesos unitarios empleados en el tratamiento primario y secundario del agua residual.

	Rendimiento de eliminación del constituyente, porcentaje					
Unidades de tratamiento	DBO	DQO	SS	P [b]	N-Org [c]	NH_3-N
Rejas de barras	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo
Desarenadores	0-5 [d]	0-5 [d]	0-10 [d]	nulo	nulo	nulo
Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0
Fangos activados (proceso convencional)	80-95	80-85	80-90	10-25	15-50	8-15
Filtros percoladores						
Alta carga, medio pétreo	65-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15
Carga muy alta, medio sintético	65-85	65-85	65-85	8-12	15-50	8-15
Biodiscos (RBCs)	80-85	80-85	80-85	10-25	15-50	8-15
Cloración	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo

[a] Adaptado parcialmente de la bibliografía [10, 14].
[b] Fósforo total.
[c] N-Org = Nitrógeno orgánico.
[d] Los límites superiores se corresponden con el caso en que no se lava la arena.

Fuente: Metcalf & Eddy (1995).

A continuación se detallan cada uno de los componentes principales de una planta de tratamiento de aguas residuales.

2.4.) Pretratamiento

El pretratamiento de las aguas residuales se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Como ejemplos de pretratamientos se pueden citar el desbaste y la dilaceración para eliminar sólidos gruesos y trapos, la flotación para eliminar grasas y aceites, y el desarenado para eliminar materia en suspensión gruesa que pueda causar obstrucciones en los equipos y un desgaste excesivo en los mismos (Metcalf & Eddy, 1995, pág. 145).

- A partir de la definición del pretratamiento expuesta anteriormente, cabe aclarar que este no considera eliminar la carga contaminante que se encuentra en el agua residual; esta fase se utiliza para eliminar aquellos elementos que se encuentran a flote y son de mayor visibilidad en las aguas residuales.

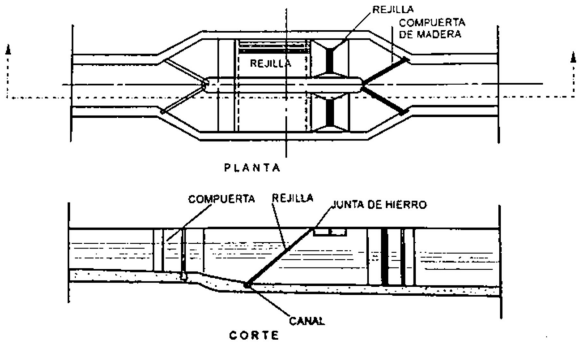


Ilustración 3. Zona de rejillas.

Fuente: Rivas (2012).

A continuación se detallarán las operaciones que se llevan a cabo en el pretratamiento.

2.5.) Canal de entrada

El canal de entrada es la línea de ingreso del agua residual, el cual va a contener las rejillas de retención en dos fases: una primera malla de barrotes para la separación de sólidos de mayor tamaño, y la segunda malla con menor separación para la retención de la basura que no fue retenida en el primer paso.

Este módulo se diseña con una profundidad, ancho y altura óptimos según el caudal de diseño para contener variaciones por fluctuaciones en el fluido recibido.

Puede ser diseñado en forma rectangular o cuadrada, se utiliza con mayor frecuencia un módulo rectangular.

2.6.) Pozo de muy gruesos

El pozo de muy gruesos es diseñado principalmente cuando se reciben aguas de un alcantarillado sanitario en las cuales se encuentran sólidos muy grandes como desechos plásticos, botellas, pedazos de tubos, juguetes, trapos, entre otros.

Este tipo de desechos arrastra con mayor facilidad arenas, aceites y grasas, por lo que se requiere un módulo adicional o de mayor tamaño que separe estos elementos antes de ingresar al reactor biológico, por ello es que se hace necesario disponer de un pozo de muy gruesos. Este pozo se diseña con una profundidad según el tipo de agua residual y con una cuchara electro hidráulica o prensa que se encarga de retirar los sólidos atrapados en el pozo.

Los residuos que se extraen de este pozo son colocados en un contendedor y llevados a un vertedero.

Ilustración 4. Pozo de muy gruesos.

Fuente: Garay (2016).

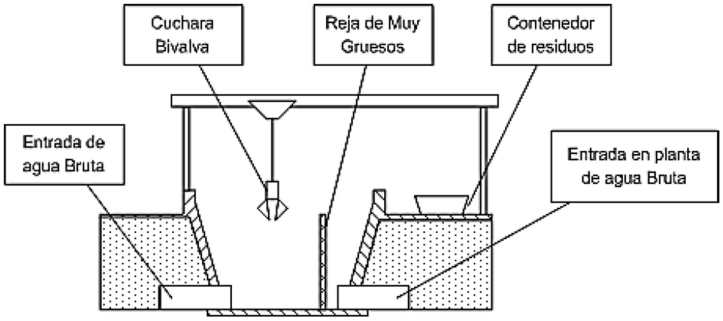


Ilustración 5. Corte del pozo de muy gruesos.

Fuente: Rivas (2012).

2.7.) Desbaste

Se le llama desbaste a la retención de sólidos en la superficie. Tal como las rejillas de barrotes, se pueden clasificar en manual o mecánicas.

Las rejillas de tipo manual:

Se instalan en depuradoras pequeñas y son inclinadas (usualmente a 60º respecto de la horizontal) para facilitar las labores de limpieza del operario, quien retira los sólidos retenidos en la rejilla con ayuda de un rastrillo u otra herramienta similar dentada y los dispone temporalmente en una lámina perforada o canastilla, conocida como depósito escurridor, para eliminar el agua. Posteriormente, estos desechos se llevan a incineración o a un relleno sanitario (Rivas, 2012).

Se les conoce a los elementos retenidos en esta fase como residuos de desbaste (Metcalf & Eddy, 1995).

Ilustración 6. Rejilla media con lámina perforada para escurrimiento del material extraído.

Fuente: Rivas (2012).

2.8.) Rejillas mecánicas

Llamadas también rejillas de limpieza automática, estas suelen instalarse en depuradoras grandes cuyos caudales arrastran ingentes cantidades de materiales gruesos de forma permanente, que no podrían ser evacuados normalmente. Estas rejillas suelen ser verticales, con inclinaciones que varían entre los 80º y 90º respecto de la horizontal.

Los mecanismos de limpieza son variables dependiendo del fabricante, los más usuales son las barras dentadas o los de peines giratorios (Rivas, 2012).

La limpieza mecánica, en comparación con la limpieza manual, tiende a reducir los costos laborales, mejorar las condiciones de flujo y de captura de cribado y reducir las molestias de malos olores. En los sistemas combinados que manejan aguas pluviales mejoran la operación de limpieza de grandes cantidades de sólidos.

Se fabrican muchos tipos de rejillas de limpieza mecánica, como las de cadena o cable accionadas con el frente hacia atrás o de limpieza con movimiento alternativo o continuo.

En el mercado existen diferentes modelos de rejillas automáticas para diferentes caudales, con diferente espacio entre barras y variedad de profundidades y anchos de canal de colocación (Comisión Nacional del Agua, 2019).

Ilustración 7. Rejas automáticas de limpieza mecánica.

Fuente: Comisión Nacional del Agua (2019).

2.9.) Desarenador

El desarenador trata las partículas de arenas y grasas que se encuentran en suspensión, puede diseñarse un solo tanque, o bien, dos módulos para facilitar la limpieza.

Consiste en ampliar el ancho del canal para distribuir el caudal de ingreso y su diseño se realiza con base en parámetros de velocidad del fluido y tiempo de retención, para lograr sedimentación y evitar que se produzcan asentamientos.

Se debe tomar en cuenta como mínimo dos módulos para facilitar el mantenimiento (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2017).

2.10.) Dilaceración

La dilaceración suele utilizarse cuando no hay un desbaste, ya que este proceso se encarga de eliminar los sólidos mediante la trituración, y posteriormente reincorporar el fluido al sistema de tratamiento. Al igual que el desbaste, no se considera en este tratamiento la eliminación de carga contaminante sino el tratamiento de sólidos.

2.11.) Tratamiento primario

Es una etapa que promueve eliminar los sólidos en suspensión debido a la gravedad, por lo cual se produce el efecto de la sedimentación, misma que se puede clasificar por ser discreta, floculenta, retardada o por compresión.

La sedimentación discreta se debe a que las partículas no cambian sus características físicas como su tamaño, forma o densidad, tal es el caso de las arenas y cenizas, y su velocidad es constante durante el proceso de sedimentación.

Es la decantación de una suspensión diluida de partículas floculantes. Se caracteriza por la afluencia de las partículas a medida que sedimentan y las características de las mismas se modifican durante el proceso.

Este tipo de sedimentación se encuentra en los sedimentadores secundarios de las plantas de tratamiento después de la unidad biológica donde se forma el biofloc y en la salida de los floculadores de las plantas potabilizadoras (Pulido, 2015).

La sedimentación retardada o por zona se presenta en suspensiones de concentración intermedia. Son característicos de este tipo de suspensión los flóculos de aluminio de concentración comprendida entre 500 mg/L y 1000 mg/L y los efluentes de los tanques de aireación de los lodos activados.

Por lo general las aguas residuales que se encuentran en el tratamiento primario suelen contener gran cantidad de materia orgánica e inorgánica, además se llevan a cabo procesos tanto químicos como físicos. En cuanto a procesos químicos se encuentran: la coagulación y la neutralización, en procesos físicos se pueden mencionar la flotación, sedimentación o decantación, filtración o floculación.

Según Rivas (2012), las operaciones utilizadas frecuentemente para el tratamiento primario de aguas residuales domésticas son los decantadores, tamices y unidades de decantación asistida químicamente.

Para el diseño de los decantadores se toman en cuenta las características de los elementos que se requieren sedimentar, tales como su densidad, forma o tamaño. A continuación se detallan los tipos de sedimentadores:

- Sedimentadores rectangulares: la velocidad horizontal del agua es constante y se suelen utilizar para separar partículas densas y grandes (arenas). Suelen ser equipos poco profundos.
- Sedimentadores circulares: en ellos el flujo del agua suele ser radial desde el centro hacia el exterior, por lo que la velocidad de desplazamiento disminuye al alejarse del centro del sedimentador.
- Sedimentadores lamelares: han surgido como alternativa a los sedimentadores poco profundos, al conseguirse una mayor área de sedimentación en el mismo espacio. Consisten en tanques de poca profundidad que contienen paquetes de placas (lamelas) o tubos inclinados respecto a la base, y por cuyo interior se hace fluir el agua de manera ascendente. En la superficie inferior se van acumulando las partículas, desplazándose de forma descendente y recogiéndose en el fondo del sedimentador (Cyclusid, 2020).

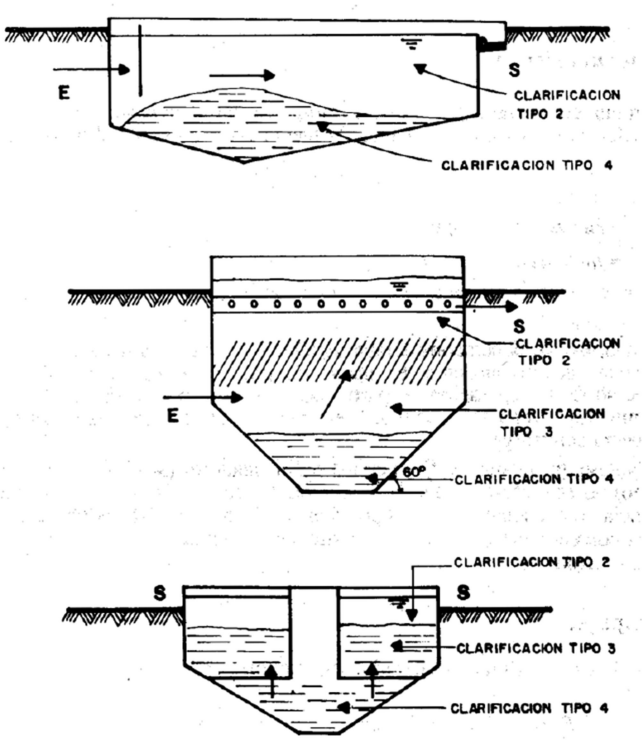


Ilustración 8. Decantadores.

Fuente: Rivas (2012).

Los decantadores de mayor uso son los circulares, usualmente son diseñados con un diámetro entre 10 y 60 m, poseen una campana en el centro del tanque por el cual se da el ingreso del agua, lo que provoca que el agua ingrese al fondo del decantador y se eviten turbulencias; utilizan un puente móvil para realizar un barrido de lodos y empujarlos hacia el centro del tanque.

Los decantadores rectangulares poseen vertederos para el ingreso del agua, también utilizan un sistema de puente para barrer los lodos a lo largo de la unidad, o bien, pueden utilizar un tornillo sin fin.

2.12.) Tratamiento secundario

El tratamiento secundario de las aguas residuales está principalmente encaminado a eliminar los sólidos en suspensión y los compuestos orgánicos biodegradables, aunque a menudo se incluye la desinfección. Se define el tratamiento secundario convencional como la combinación de diferentes procesos normalmente empleados para la eliminación de estos constituyentes, e incluye el tratamiento biológico con fangos activados, reactores de lecho fijo, los sistemas de lagunaje y la sedimentación (Metcalf & Eddy, 1995, pág. 145).

Algunos de los procesos que se pueden utilizar en un tratamiento secundario son:

- Lodos activados en modalidad convencional, aireación extendida o estabilización por contacto
- Filtros percoladores
- Tratamientos anaerobios
- Lagunas de aireación
- Lagunaje

2.13.) Lodos activados

El lodo activo es la suma de la biomasa formada en el reactor y los sólidos suspendidos (materia inerte y compuestos inorgánicos) aportados por el agua residual. Esta mezcla de microorganismos y materia inerte tiene una alta capacidad de absorción de la materia orgánica y por ello se le llama “activo” o “activado” (Rivas, 2012).

El tratamiento secundario para lodos activados de aireación extendida realiza su proceso de eliminación de contaminantes orgánicos en un reactor biológico, compuesto por agua residual y un cultivo de microorganismos y bacterias, los cuales se nutren de la carga orgánica presente en el agua, además se reproducen continuamente formando la biomasa mediante la alimentación de oxígeno disuelto por requerimiento de las bacterias, transmitido por sistemas de difusión.

Parte de estos lodos son recirculados nuevamente en el reactor para mantener la concentración adecuada del cultivo de microorganismos.

Según Metcalf & Eddy (1995), la temperatura ideal para que se desarrolle el cultivo bacteriano se encuentra entre los 25 y 35ºC.

Posteriormente a la oxidación de las sustancias orgánicas, el fluido se transfiere a los tanques de sedimentación, en donde se separa el lodo del agua y se recircula parte de estos lodos para que los microorganismos mantengan la continuidad del sistema, evitando la acumulación de bacterias bajo los tiempos de retención utilizados en los tanques.

Los principales reactores utilizados para el tratamiento del agua residual son:

2.13.1.) Lodos activados en reactores de mezcla completa

La mezcla completa se produce cuando las partículas que entran en el tanque se dispersan de manera inmediata por todo el volumen del mismo. Las partículas salen del tanque en proporción a su población estadística.

La mezcla completa se puede obtener en tanques circulares o cuadrados si el contenido del tanque se distribuye uniforme y continuamente.

2.13.2.) Lodos activos en reactores de flujo a pistón

Las partículas del fluido pasan a través del tanque y salen con la misma secuencia con la que entran. Las partículas conservan su identidad y permanecen en el interior del tanque por un tiempo igual al tiempo teórico de detención. Este tipo de flujo puede aproximarse al que se produce en un tanque de gran longitud con una relación longitud/anchura elevada, en la cual la dispersión longitudinal es mínima o nula (Metcalf & Eddy, 1995).

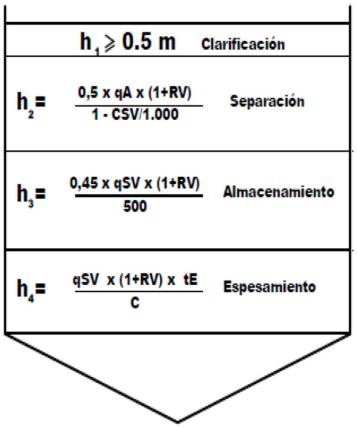


Ilustración 9. Zonas de un decantador secundario.

Fuente: Gandarillas (2016).

2.14.) Sistemas de aireación

En la interface entre el líquido (agua residual) y el gas (aire u oxígeno) se forma una película a través de la cual se transfiere el gas hacia el líquido por difusión molecular. La cantidad de gas transferido por unidad de tiempo (coeficiente de transferencia) es un valor constante a través de cada película y es dependiente del tipo de aireador y de la geometría del tanque de aireación (Rivas, 2012, pág. 86).

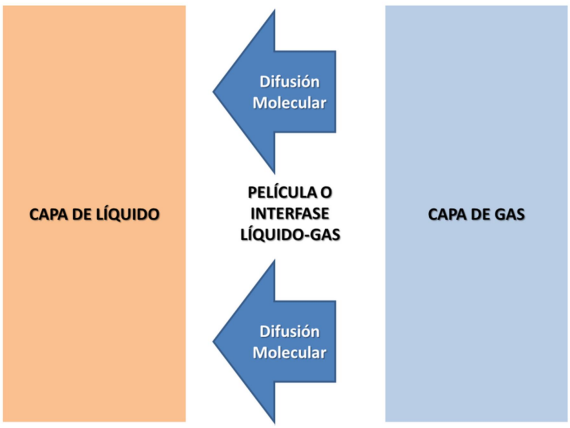


Ilustración 10. Teoría de la doble capa de difusión molecular gas – líquido.

Fuente: Rivas (2012).

Los sistemas de aireación cumplen la función de proporcionar el oxígeno disuelto requerido por las bacterias en el agua residual, la inducción del aire puede ser implementada mediante difusores o turbinas superficiales.

De acuerdo al equipo que se utilice se pueden clasificar en:

- Sistemas de aire difundido
- Sistemas de aireación mecánica

Según Rivas (2012), producto de una mezcla aireada se obtiene:

- Transferencia de oxígeno disuelto
- Remoción de sustancias volátiles
- Eliminación de CO_2
- Eliminación de gas metano

2.14.1.) Sistemas de aire difundido

Los elementos de los cuales se componen los sistemas de aire difundido son: difusores, tuberías para la conducción del aire, compresores para el suministro de aire.

En cuanto a los difusores, se conocen de burbuja fina o de burbuja gruesa, para lo cual se pueden encontrar en el mercado de diferentes materiales, en formas de disco o tubulares.

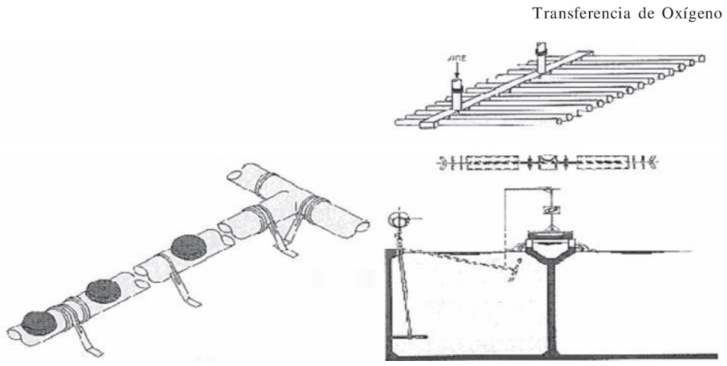


Ilustración 11. Implementos para la aireación mediante aire difundido.

Fuente: Gutiérrez & Olmo (2007).

Los difusores se deben colocar en toda la longitud y a los lados del tanque de aireación, con un rango de separación entre 15cm y 75cm, pueden estar fabricados de diferentes materiales como cerámica, nylon, sarán, dacrón. A los difusores porosos se les conoce como de burbuja fina y presentan mayor rendimiento en comparación con los de burbuja gruesa, los cuales son menos porosos y proporcionan burbujas de mayor diámetro.

"La aeración mediante difusores es recomendada fundamentalmente para profundidades de líquido en el reactor entre 2,5 y 5,0 m y valores de velocidades de consumo de oxígeno inferiores a 1 mgL/min" (Gutiérrez & Olmo, 2007).

2.14.2.) Sistemas de aireación mecánica

Para los aireadores mecánicos se toma el oxígeno directamente de la atmósfera, un tipo de aireador mecánico son las turbinas, pueden ser superficiales o sumergidos y según Gutiérrez & Olmo (2007), entre sus funciones se encuentran:

- Disolver oxígeno en el tanque de aireación.
- Mantener los SSV en suspensión.
- Distribuir el afluente por todo el volumen del tanque de aireación.
- Remover parte del CO_2 que se genera.

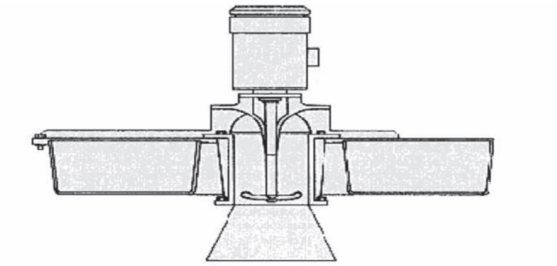


Ilustración 12. Aireador mecánico superficial.

Fuente: Gutiérrez & Olmo (2007).

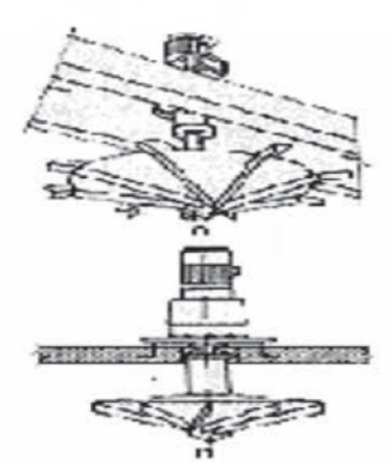


Ilustración 13. Aireador de turbina.

Fuente: Gutiérrez & Olmo (2007).

Ilustración 14. Difusores de un reactor biológico de lodos activados.

Fuente: Rivas (2012).

Es de importancia señalar la composición del agua residual, se debe conocer el tipo de concentración y sus contaminantes, estos valores son fundamentales para analizar y calcular la cantidad de aire que requieren los microorganismos en la mezcla para su depuración, las unidades de la masa contaminante generalmente se expresan en kg/día, mientras que la demanda de aire para su eliminación se expresa en kg de aire por hora, y según Gutiérrez & Olmo (2007), con estudios realizados se puede obtener la cantidad de kg de aire de acuerdo al tipo de carga contaminante.

Los contaminantes típicos de una agua residual doméstica se pueden obtener de la siguiente tabla:

Tabla 2. Composición típica de una agua residual doméstica.

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1.200
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/l: 5 días, 20 °C (DBO_5, 20 °C)	mg/l	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1.000
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros [a]	mg/l	30	50	100
Sulfato [a]	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como $CaCO_3$)	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales [b]	n.º/100 ml	10^6-10^7	10^7-10^8	10^7-10^9
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	μg/l	<100	100-400	>400

Fuente: Metcalf & Eddy (1995).

2.15.) Decantador secundario

Los decantadores secundarios son utilizados para separar el agua tratada proveniente de los tanques de aireación, son elementos de mayor tamaño que los tanques decantadores primarios y de ellos también depende que los resultados de DBO y SST sean óptimos en el cumplimiento de la normativa legal de cada país; para módulos con profundidades de 3 m se pueden utilizar tiempos de retención de entre 60 min y 120 min.

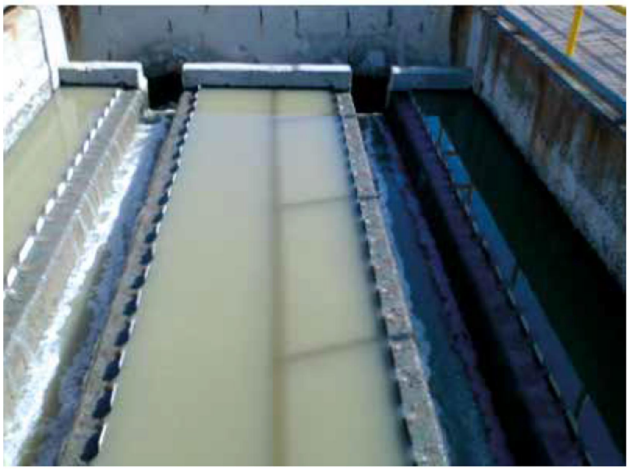
Para su buen funcionamiento se requiere que los lodos obtengan una buena decantación, es decir, que la biomasa no produzca el efecto de hinchamiento (*bulking* filamentoso), este tipo de lodo no actúa por gravedad, y por ende, no es filtrado en el fondo del tanque sino que fluye con el efluente de salida. Según Rivas (2012), algunos factores que influyen en que los lodos no sean decantables son: la edad de los lodos, la toxicidad, la actividad abundante de protozoos y relaciones elevadas entre 0,6 y 1 kg/DBO SSVLM.

El clarificador secundario posee un ambiente inactivo donde los lodos activados sólidos y floculantes se sedimentan por gravedad. El objetivo es obtener un flujo clarificado con baja cantidad de sólidos suspendidos y baja turbidez, llamado efluente secundario, y un flujo con una elevada carga de sólidos suspendidos llamado lodos de retorno. Para un tratamiento eficiente ambos reactores deben funcionar satisfactoriamente. La eficiencia de los procesos está en función de una serie de factores que pueden afectar la oxidación biológica y la separación de los sólidos (Carreño, 2016).

Por lo general, el diseño de los decantadores secundarios suele ser de tipo:

a) Circular
b) Rectangular

a)



b)

Ilustración 15. Decantador circular y rectangular.

Fuente: Comisión Nacional del Agua (2019).

2.16.) Lechos de secado de lodos

Los lechos de secado de lodos se componen de elementos filtrantes para lograr un mejor drenaje y evaporación del agua que compone los lodos. Según Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (2017), se debe disponer de dos módulos para el acondicionamiento y deshidratación de los lodos residuales.

Los espesores deben ser de entre 20 y 30 cm; sin embargo, el lodo podría alcanzar hasta 45 cm de espesor si se cuenta con altas temperaturas, el material drenante que se

utiliza usualmente es arena, con 10 cm de espesor, esta se coloca sobre una capa de 20 cm de piedra.

La evaporación que se puede llegar a alcanzar en este sistema es de hasta un 40% y para el retiro de los lodos estos deben tener una consistencia paleable y se deben ver agrietados. El retiro del lecho es realizado de manera manual.

Una vez que se ha retirado el lodo del lecho de secado se debe tener en cuenta que se desprende con facilidad la arena que ha sido impregnada en el lodo, por lo que generalmente se debe volver a colocar esta capa para la filtración de los próximos depósitos.

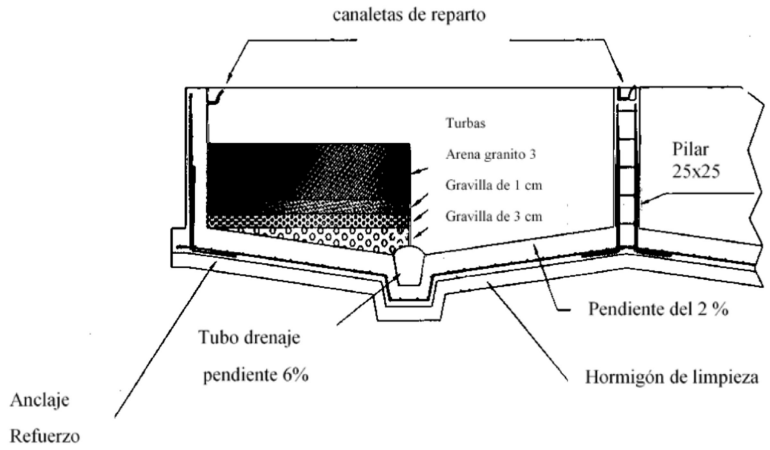


Ilustración 16.) Esquema de una planta depuradora de filtración sobre lechos de turba.

Fuente: Martínez & Torrecillas (2018).

2.17.) Tratamientos de aguas residuales más utilizados en Costa Rica

Según el Informe de gestión de las excretas y aguas residuales en Costa Ricas, los tratamientos de aguas residuales más utilizados en nuestro país son:

1. Sistemas de tratamiento aeróbicos: son sistemas compuestos por reactores biológicos aireados, se utilizan principalmente para plantas de tratamiento medianas y pequeñas, su fuente de alimento es el agua residual, la cual sirve de nutrientes para realizar

procesos de fermentación mediante la inclusión de un cultivo de bacterias y microorganismos; de estos sistemas se obtiene agua tratada, biomasa y gases al ambiente. En relación con otros sistemas su costo de operación es alto por la energía que consumen para la inducción del aire. Los más utilizados para estos sistemas son:

- Lodos activados con aireación extendida
- Lodos activados convencionales

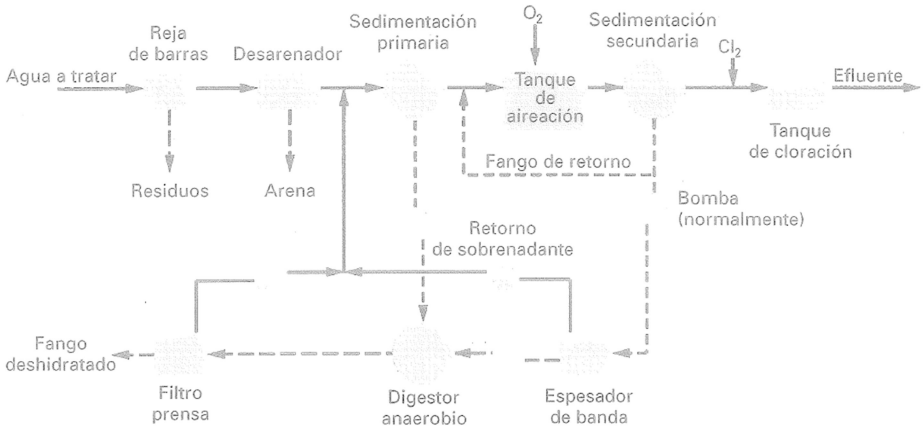


Ilustración 17. Diagrama de flujo de tratamiento de lodos activados convencional.

Fuente: Metcalf & Eddy (1995).

2. Sistemas de tratamiento anaerobios: para estos procesos también se utiliza el agua residual como nutrientes para un cultivo de microorganismos y formar procesos de fermentación en fase líquida, estos sistemas utilizan reactores biológicos en los que las bacterias trabajan con ausencia de oxígeno, como producto se obtienen agua tratada, gases como metano y CO_2 (biogás); producen menos biomasa que los sistemas aeróbicos y son de menor costo operativo. Presentan grandes beneficios económicos y menos mantenimiento; sin embargo, por sus procesos son generadores de malos olores por lo que se debe tomar en cuenta su ubicación. Los más utilizados son:

- Tanque séptico, fosa séptica y drenaje
- Filtro anaerobio de flujo ascendente
- Reactor UASB + filtro percolador

Ilustración 18. Reactor biológico anaerobio UASB

Fuente: Garay (2016).

3. Sistemas de tratamiento facultativos: consisten en lagunas facultativas constituidas por algas, bacterias y protozoos. Las algas se encargan de proporcionar oxígeno disuelto y con ello se considera un reactor biológico con una zona aerobia y otra anaerobia. Como producto de estos sistemas se obtiene una estabilización de la materia orgánica y reducción en bacterias coliformes.

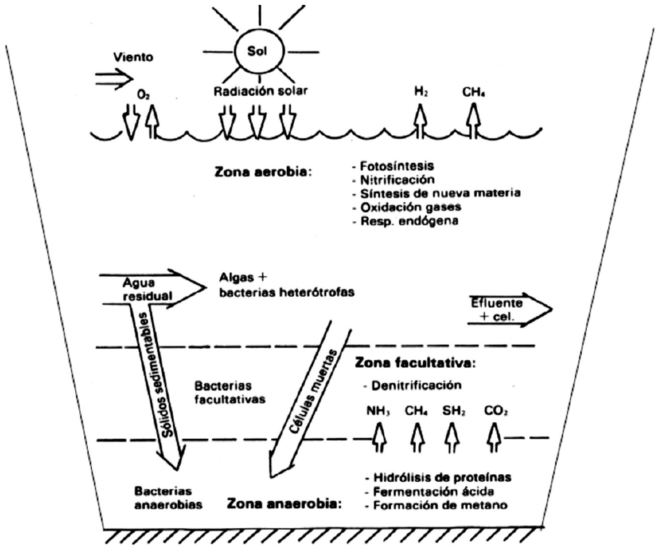


Ilustración 19. Laguna facultativa.

Fuente: Rivas (2012).

4. Sistemas de pre-acondicionamiento con emisario submarino: consisten en diseñar un tramo de tubería que transporte las aguas residuales desde la costa hasta un punto específico en el océano con las condiciones para el proceso de dilución y dispersión, el resultado que se obtiene es la reducción de la contaminación orgánica mediante la mezcla en el agua de mar.

3.) MARCO METODOLÓGICO

3.1.) Paradigma

En Costa Rica existen programas que contribuyen a otorgar a la población sistemas sanitarios para tratar las aguas residuales de origen doméstico en sitios donde las personas no cuentan con esta solución debido a la pobreza en la que se encuentran, por ejemplo, el Programa de Saneamiento Básico Rural (SANEBAR), dirigido por el Ministerio de Salud. Programas como estos contribuyen al desarrollo de infraestructura para el mejoramiento de la salud y el medio ambiente, lo cual es beneficioso y necesario para la sociedad, pero aunque se logre ir avanzando en temas de infraestructura es preciso desarrollar modelos de negocios para la reutilización de los recursos que se vierten en ríos o se incineran por falta de soluciones sostenibles.

El avance de los proyectos de saneamiento a nivel nacional considera sumas importantes de dinero, motivo por el que han ido evolucionando lentamente o han quedado rezagados por falta de recursos, tal como se menciona en el Informe de gestión de excretas y aguas residuales en Costa Rica, debido a que las tarifas institución-usuario no cubren los costos operativos de los servicios brindados.

Es por lo anterior que buscar incentivos para fomentar inversiones que consideren la reutilización y recuperación de recursos se convierte en una acción importante para plantear otras soluciones que reactiven la economía del país en esta área.

La gestión del manejo de las aguas residuales puede valorarse como un recurso importante para la sociedad, contribuyendo en sectores como agricultura, para el uso de riegos, generación eléctrica, actividades económicas en temas de industria, entre otros, con lo cual se podría ver como un sector auto sostenible.

3.2.) Enfoque metodológico

La presente propuesta de proyecto se rige bajo condiciones cuantitativas como caudales, cargas contaminantes, temperatura, entre otros, para obtener resultados de una misma índole como volúmenes y áreas, por tanto, se pretende dar una solución a la contaminación ambiental en una proporción de resultados cuantificables, como lo muestra un diseño hidráulico.

Según los objetivos planteados, se procede con el detalle de las acciones necesarias para el cumplimiento de cada uno de ellos:

a) La ubicación de la planta de tratamiento se propuso en una zona aparte de la operación diaria a la que se dedica la empresa, con base en los lineamientos del Reglamento de aprobación de sistemas de aguas residuales para el cumplimiento de los retiros, según el sistema para el tratamiento propuesto. Además, se tomó en cuenta la Ley forestal Nº 7575 (Energía & República, 2015) para no incurrir en desconocimiento sobre las facultades del Ministerio de Ambiente y Energía en manejos de áreas silvestres en dominio privado.
b) El tipo de tratamiento seleccionado fue con base en la información real de la empresa, como caudales mensuales. Se analizó que las aguas que se requieren tratar son de tipo doméstico, de uso de oficinas; además es de importancia el tema de no generar malos olores para no afectar a las personas que diariamente hacen uso de estas instalaciones.
c) Las dimensiones de los sistemas fueron calculadas con base en los factores mencionados en el punto b) y mediante parámetros teóricos establecidos en referencias bibliográficas según la fase del tratamiento a diseñar.

3.3.) Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Se utilizaron programas como *Sketchup* y *Google Earth Pro* para establecer las curvas de nivel del terreno y establecer límites de la propiedad para el cumplimiento de los retiros. Los datos de caudales utilizados para el diseño fueron tomados de referencias de facturaciones de agua potable consumida mensualmente durante todo el año 2020.

Otros datos utilizados como temperatura de la zona y presión atmosférica fueron tomados de referencias en sitios web, entre ellos el Instituto Meteorológico Nacional.

También se realizó una visita al sitio para la verificación del flujo del río Naranjo, con la finalidad de proponer la opción de desfogar el agua tratada a este cuerpo de agua.

3.4.) Cálculo del caudal de diseño

El caudal de trabajo para este proyecto es de tipo ordinario. El caudal de diseño se calculó con base en la Norma técnica para diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial.

Ecuación 1. Cálculo del caudal promedio de aguas residuales ordinarias:

$$Q_{paro}=FR*Q_{pap}$$

Ecuación 2. Cálculo del caudal promedio de aguas residuales:

$$Q_{par}= Q_{paro}+Q_{pare} +Q_{ext}$$

Donde:

Q par: caudal promedio de aguas residuales

Q pare: caudal promedio de aguas residuales especiales

Q ext: contribuciones externas

Ecuación 3. Cálculo del caudal máximo:

$$Q_{max}= Q_{par}*FMH+Q_{inf}$$

Donde:

Q max: caudal máximo

FMH: factor máximo horario (1,80)

Q inf: caudal de infiltración

Ecuación 4. Cálculo del caudal mínimo:

$$Q_{min}=FMD*Q_{par}+Q_{inf}$$

Este no debe ser inferior a 1,5 L/s según la Norma técnica para diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial.

3.5.) Canal de entrada

El canal de entrada se encargará de recibir el agua residual procedente del alcantarillado sanitario. Sus dimensiones fueron calculadas con base en el caudal de diseño. Se propuso un canal de sección rectangular a cielo abierto y se consideraron los siguientes parámetros:

Tabla 3. Criterios de diseño para el canal de entrada:

Parámetro	Valor o rango
Altura mínima de lámina de agua	0,3 m (a caudal medio)
Velocidad de flujo en el canal	0,6 a 1,0 m/s (a caudal medio)
Borde libre (por encima del caudal punta al final del periodo de diseño)	0,3 a 0,4m
Coeficiente de rugosidad de Manning	0,014

Fuente: Rivas (2012).

Ecuación 5. El área del canal se calculó con la siguiente fórmula:

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

Donde:

Q: caudal (m^3/s)

V: velocidad del flujo (m/s)

Ecuación 6. La pendiente del canal de entrada se calculó con la fórmula Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

V: velocidad (m/s)

n: coeficiente de Manning

Rh: radio hidráulico (m)

S: pendiente (%)

3.6.) Rejillas de retención

Se proponen rejillas de tipo manual.

La separación entre barras puede ser entre 0,5 y 1,5 cm para rejilla fina, entre 1,5 y 5 cm para rejilla media, y mayor a 5 cm de separación para rejilla gruesa, según Rivas (2012).

Se debe tomar en cuenta que se requieren "al menos dos juegos de rejillas con inclinación entre 45º y 60º, una para sólidos gruesos, otra para sólidos más finos, ambos con bandeja para deshidratación de sólidos" (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2017, pág. 202).

La velocidad de paso del flujo para el diseño de las rejillas debe ser entre 0,6 m/s y 1,4 m/s, con un grado de colmatación de 30% según Rivas (2012).

Ecuación 7. Profundidad en la zona de rejilla:

$$P = Q \cdot \frac{b + L}{\left(1 - \frac{G}{100}\right) \cdot V_p \cdot L \cdot B_c}$$

Donde:

P: profundidad en la zona de rejillas (m)

Q: caudal del agua residual (m^3/s)

Vp: velocidad de paso entre la rejilla (se considera de 0,6 m/s)

Debido a que los barrotes restan área útil del canal incrementando la velocidad del flujo entre la rejilla, se hace necesario, en ocasiones, incrementar el ancho del canal en la zona donde está ubicada la criba o aumentar la profundidad (Rivas, 2012).

3.7.) Pérdida de carga

Se calcula la pérdida de carga en las rejillas según la velocidad del flujo a través de los barrotes.

Ecuación 8. Pérdida de carga:

$$\Delta H = \frac{{V_p}^2}{9{,}1}$$

Donde:

ΔH: pérdida de carga en la rejilla (m)

Vp: velocidad de paso del agua a través de la rejilla (m/s)

La ecuación de la pérdida de carga brinda un valor de la disminución del nivel del agua en el canal de entrada debido a obstrucciones en la zona de las rejillas, producidas por ingreso de sólidos de mayor tamaño o elementos como trapos que quedan atascados.

3.8.) Cantidad de barrotes

Ecuación 9. Cálculo del número de barrotes:

$$N = \frac{B_R - L}{b + L}$$

Dónde:

N: número de barrotes

B_R: ancho del canal en la zona de rejilla (m)

L: luz o espacio entre barrotes (m)

b: ancho de los barrotes (m)

3.9.) Longitud de barras

Ecuación 10. Cálculo de longitud de las barras:

$$L_b = \frac{H_f}{\text{Sen}\ \Theta}$$

Donde:

Lb: longitud de barra (m)

H_f: profundidad en la zona de rejilla

Θ: ángulo de los barrotes

Es importante indicar que para el diseño de estos elementos se debe cumplir con la normativa del AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2017).

Las unidades de pretratamiento tales como canal de entrada, rejillas y desarenadores deben diseñarse con la finalidad de obtener un buen rendimiento en la eliminación de sólidos en suspensión y arenas, lo anterior con el fin de contribuir a la obtención de mejores procesos en el funcionamiento del reactor biológico, por ende, buenos resultados en la calidad del agua tratada y cumplimiento de los parámetros establecidos en los reglamentos.

3.10.) Desarenadores

Se considera la mitad del caudal de diseño para el ingreso del agua en cada desarenador y se dimensiona cada módulo. Para este proyecto se consideran módulos rectangulares.

Tabla 4. Criterios de diseño de los desarenadores:

Parámetro	Valor o rango
Carga superficial	40 a 70 m^3/m^2*h
Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)	100 a 300 s
Velocidad horizontal	0,20 a 0,40 m/s
Longitud	10 a 30 veces la altura de la lámina de agua
Altura mínima de la unidad	1,0 m
Altura máxima de la unidad	2,5 m

Fuente: Rivas (2012).

Ecuación 11. Cálculo del área del canal desarenador:

$$As = \frac{Q}{Cs}$$

Donde:

Q: caudal (m^3/s)

Cs: carga superficial ($m^3/h.m^2$)

La carga superficial se considera como una velocidad y se despeja la ecuación. El valor de esta carga puede estimarse según los parámetros indicados en la tabla 4.

Ecuación 12. Cálculo del volumen del canal desarenador:

$$Vd = As \times P$$

Donde:

Vd: volumen de desarenador

As: área superficial

P: profundidad del desarenador

Una vez que se ha calculado el volumen se verifica el tiempo de retención hidráulica según los criterios de la tabla 4.

Ecuación 13. Tiempo de retención hidráulica:

$$T_{RH} = \frac{V_d}{Q}$$

Donde:

T_{RH}: tiempo de retención hidráulica (s)

V_d: volumen desarenador (m^3)

Q: caudal (m^3/s)

Se verifica que este T_{RH} cumpla con el rango indicado en la tabla 2.

Se propone una velocidad horizontal de 0,30 m/s.

Se calcula el área transversal del desarenador para una velocidad horizontal propuesta de 0,30 m/s.

Ecuación 14. Cálculo del área transversal:

$$A_t = \frac{Q}{V_H}$$

Donde:

At: área transversal (m^2)

Q: caudal (m^3/s)

V_H: velocidad horizontal (m/s)

Ecuación 15. Cálculo del ancho del canal desarenador:

$$B = \frac{A_t}{P}$$

Donde:

B: ancho (m)

At: área transversal (m^2)

P: profundidad efectiva (m)

Ecuación 16. Cálculo del largo del canal:

$$L = \frac{A_s}{B}$$

Donde:

L: largo (m)

As: área superficial (m^2)

B: ancho del canal (m)

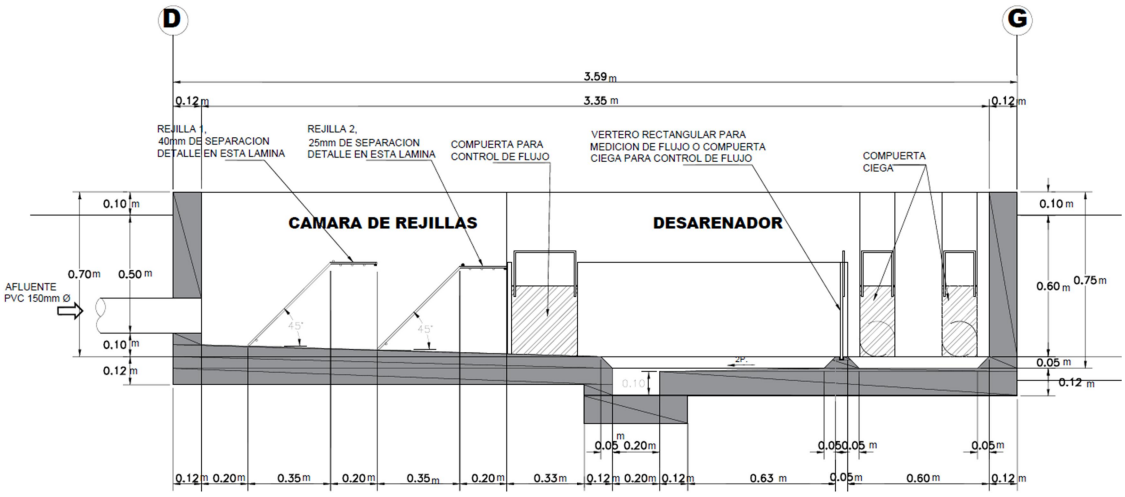


Ilustración 20. Cámara de rejillas y desarenador.

3.11.) Reactor biológico

3.11.1.) Tanque de aireación

El volumen del tanque aireador se calcula con base en el tiempo de retención hidráulica, mismo que se establece en un rango de 16 a 24 horas según Metcalf & Eddy (1995).

Se propone un T_{RH} = 16 horas.

Ecuación 17. Cálculo de volumen:

$$V = T_{RH} * Q$$

Donde:

T_{RH}: tiempo de retención hidráulica (s)

V: volumen (m^3)

Q: caudal (m^3/s)

Ecuación 18. Cálculo del área del tanque:

$$A_T = \frac{V_T}{H\ agua}$$

Donde:

A_T: área del tanque (m^2)

V_T: volumen del tanque (m^3)

H: altura de lámina de agua (m)

3.11.2.) Cálculos para el sistema de aireación

La aireación difusa es la inyección de gas, aire u oxígeno, bajo presión por la parte inferior de la superficie libre del fluido. Esta aplicación se realiza a través de medios porosos conocidos como difusores, que producen burbujas de diámetros muy pequeños. Los preferidos son los de poro fino (2 a 5 mm), seguidos de los poros semifinos (6 a 10 mm) y los de burbuja gruesa (> 10 mm) (Rivas, 2012).

Ilustración 21. Difusores de burbuja fina.

Fuente: Ingeniería (2016).

Para establecer la cantidad de aire requerido primero se calcula la cantidad de DBO_5 en kg/día presente en el agua residual. Se considera que para un sistema de aireación extendida se consume aproximadamente 90 kg de aire por kg de DBO, según Gutiérrez & Olmo (2007).

Ecuación 19. Cálculo de cantidad de aire requerido:

$$\text{Aire}_{r} = DBO_5 * 90$$

Donde:

Aire r: aire requerido (kg de aire/hora)

DBO_5: valor tomado de tabla 2 para una concentración débil

Ecuación 20. Se calcula la presión hidrostática del agua con el fin de corroborar que la presión de los poros de los difusores sea mayor que la presión absoluta:

$$P_{H_2O} = \rho g h$$

Donde:

P_{H_2O}: presión hidrostática del agua (kPa)

p: densidad del agua (kg/m³)

h: altura de lámina de agua (m)

Ecuación 21. Cálculo de la presión absoluta o presión de aire requerida en la descarga:

$$P_{absoluta} = P_{atm} + P_{H_2O}$$

Donde:

P absoluta: presión absoluta (kPa)

P atm: presión atmosférica (101,3 kPa)

P_{H_2O}: presión hidrostática del agua (kPa)

Ecuación 22. Cálculo de saturación de oxígeno para una presión de trabajo distinta a la normal:

$$Cs,m = Cs\frac{Pa + 0,5P_h}{P_o}$$

Donde:

Cs: concentración de saturación a la temperatura de trabajo y presión normal (mg/L)

Cs,m: concentración de saturación promedio a la temperatura de trabajo y una profundidad que es igual a la mitad de la altura del tanque de aireación (mg/L)

Po: presión normal (101,3 kPa)

Pa: presión atmosférica en las condiciones de trabajo (kPa)

Ph: presión hidrostática a la altura de la descarga del aire (kPa)

Ecuación 23. Cálculo de las condiciones reales de los difusores:

$$G = C\ Qs^{n}\ H^{m}\ W^{-p}\ \alpha\ (\beta\ Cs,m - C)\ 1,02^{\ t-20}$$

Donde:

G: condiciones reales de trabajo (kg/h*ud)

C: coeficiente de fórmula (0,2076)

Qs ^ n: valor teórico proporcionado por fabricante

H ^ m: valor teórico proporcionado por fabricante

W ^ -p: W es el ancho del tanque aireador, p es un valor teórico proporcionado por el fabricante (m)

α : coeficiente de difusor (0,85)

B: factor de corrección (0,9)

t: temperatura promedio (grados centígrados)

Ecuación 24. Cálculo de cantidad de difusores:

$$U = \frac{\text{Aire}_{\,r}}{G}$$

Donde:

U: unidades de difusores

Aire r: aire requerido

G: condiciones reales de trabajo (kg/h*ud)

Ecuación 25. Cálculo de espaciamiento entre unidades:

$$X = \text{Long} \ / \ U$$

Donde:

X: espaciamiento entre unidades (m)

Long: longitud del tanque de aireación (m)

U: unidades de difusores

Para el suministro de oxígeno se requiere calcular la potencia requerida para incrementar la presión del fluido mediante un compresor.

Ecuación 26. Cálculo de la potencia:

$$\text{potencia}\ (\text{kW}) = \frac{Q\,s\ \Delta P}{E}$$

Donde:

Qs: flujo de aire del compresor

ΔP: diferencia de presión a la entrada y descarga del sistema

E: eficiencia 70 %

3.12.) Tanques de sedimentación

Para los tanques de sedimentación se calcula su volumen utilizando el mismo principio del tiempo de retención hidráulica; sin embargo, para estos tanques se utiliza un tiempo de retención de 2 horas. El rango de tiempo de retención va de 1,5 a 2,5 horas según Comisión Nacional del Agua (2019).

$$\text{Volumen del tanque sedimentador} = \text{TRH} * \text{Q diseño}$$

Se calcula el volumen de acumulación de lodos, el cual se considera un 20% del volumen útil del reactor y se recalcula nuevamente el volumen del tanque con la influencia del volumen de acumulación de lodos.

$$\textbf{Volumen total del sedimentador} = \text{Volumen del sedimentador} + \text{Volumen de acumulación de lodos}$$

El área del tanque sedimentador se determina mediante:

$$\text{Área del tanque sedimentador} = \frac{\text{Volumen total del sedimentador}}{\text{Altura de lámina de agua}}$$

3.13.) Tanque digestor de lodos

La digestión de los lodos biológicos procedentes de la depuración de las aguas residuales tiene como objetivos básicos:

- Producir un producto estable que pueda ser llevado a un vertedero, o bien, utilizado como fertilizante.
- Reducir la masa y el volumen que deben verterse (Martínez & Torrecillas, 2018).

Para el diseño del tanque digestor se requiere calcular el volumen de acumulación de lodos, para lo cual se establece un 20% del volumen del tanque sedimentador.

La cantidad de lodos obtenidos de este proceso varía según factores como: suministro de oxígeno, condiciones climáticas, criterios de carga contaminante y tiempos de retención, principalmente.

Ecuación 27. Cálculo del área del tanque digestor:

$$A = \frac{V}{H}$$

Donde:

A: área (m²)

V: volumen de acumulación de lodos

H: altura de lámina de agua

Se propone una altura de lámina de agua de 3 m.

Ecuación 28. Cálculo del volumen del tanque digestor:

$$V = A * H$$

Donde:

V: volumen del tanque digestor

A: área del tanque digestor

H: altura de lámina de agua

3.14.) Lecho secado de lodos

Para el lecho secado de lodos se debe tomar en cuenta que según la normativa del AyA para el diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial, el diseño debe incluir como mínimo dos módulos para cumplir con los requerimientos del proyecto.

Se considera un volumen de recirculación de un 50%, por tanto, se utiliza la siguiente ecuación.

Ecuación 29. Cálculo de volumen de lecho de secado:

$$V_L = \frac{V}{2}$$

Donde:

V_L: volumen de lecho

V: volumen de acumulación de lodo

Ecuación 30. Cálculo del área del lecho de secado:

$$A_L = \frac{V_L}{H}$$

Donde:

A_L: área de lecho

V_L: volumen de lecho

H: altura de lodo

La concentración de los lodos es un factor importante tanto en el diseño como en el manejo de la planta. Su máxima influencia se produce sobre el tiempo de retención. A mayor concentración de lodos en la entrada del digestor aerobio, mayor tiempo de retención para un volumen de reactor dado. A mayor tiempo de retención, mayor estabilización de los lodos y mayor reducción de volumen. Sin embargo, es necesario hacer un balance económico ya que normalmente no se compensan los costes del espesador (Martínez & Torrecillas, 2018).

La estabilización por deshidratación en lecho de secado es un proceso natural donde el lodo se coloca en compartimientos rectangulares de poca profundidad con

fondos porosos, lo cual permite, junto con la incidencia de la luz solar y el viento, la deshidratación y desinfección del lodo.

Las ventajas de este método con respecto a los demás son el bajo nivel de inversión, simplicidad operacional, limitado consumo de energía y la no adición de productos químicos. Los lodos al estabilizarse pueden convertirse en la solución a los problemas de fertilización y restauración de suelos erosionados o degradados, ya que sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas podrían mejorar su calidad (Rozo, Merchán, Galvis, & Manjarres, 2018).

4.) ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.) Ubicación de la planta de tratamiento

Ilustración 22. Zona propuesta para ubicación de planta de tratamiento.

Fuente: Pro, s.f.

En la imagen adjunta se muestra la ubicación propuesta para colocar la planta de tratamiento, cuenta con un retiro aproximado de 300 m hasta el lindero del río, además

se puede visualizar que no interfiere con las labores diarias del personal ya que se encuentra un poco alejada del área operativa. También cuenta con un acceso que facilita el ingreso para mantenimiento del sistema, como lo es el transporte de lodos.

El terreno posee leves pendientes en sentido del flujo hacia el río, por lo que es óptimo para el diseño por gravedad.

Según los lineamientos establecidos por el Reglamento de operación y aprobación de sistemas de tratamiento, se debe cumplir con los siguientes retiros para un sistema de tratamiento de aguas.

4.2.) Cumplimiento de normativas

Tabla 5. Retiros mínimos a linderos de propiedad:

Tipo de Tratamiento		**Retiro mínimo** (m)	**Tipo tratamiento**		**Retiro mínimo** (m)
Lagunas Anaerobias		50	Floculación		10
Lagunas Facultativas,					
Aeróbicas y Aireadas		20	Lechos de secado		10
Lodos Activados		10	Digestores aeróbicos		10
Filtros Biológicos		20	Laguna de lodos		50
Reactores	Abiertos	20	Digestores	Abiertos	20
Anaerobios	Cerrados	10	anaeróbicos	Cerrados	10
Sedimentadores	Abiertos	20	Campos		
primarios y secundarios	Cerrados	10	superficiales de infiltración		
Tanques sépticos y sus Drenajes (Q 14,0 m3/día)		1	Sistemas de evaporación		10
Humedales artificiales		20	Cárcamos de bombeo		5
Sedimentadores con Digestores incorporados (Q 3,5 m3/día	Abiertos Cerrados	20 10	Plantas de tratamiento Químico Tanques de homogeneización compensación		5 5

Fuente: Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente y Energía (2003).

Artículo 20 – La ubicación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en áreas inundables o en otros sitios de alto riesgo deberá contar con la autorización de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias y la aprobación de la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud (Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente y Energía, 2003).

Según lo indicado en el párrafo anterior y para efectos de este estudio, se puede señalar que la zona propuesta es apta y no se considera de riesgo alguno para los usuarios o personal de mantenimiento que intervengan en sus instalaciones.

Artículo 30 – Para el paso de las tuberías de las aguas residuales del ente generador hacia el cuerpo receptor, sea río o sitio de reúso, deberá presentar ante la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud la escritura sobre la constitución de la servidumbre debidamente inscrita en el Registro Público de la Propiedad o certificación expedida con fecha de antes de un mes que compruebe que el desarrollador del proyecto es el propietario del terreno.

Cuando se trate de propiedades públicas deberá contar con el convenio suscrito por parte del jerarca respectivo y cuando se trate de verter dichas aguas en un sistema de alcantarillado deberá contar con el visto bueno del ente administrador de dicho sistema de alcantarillado (Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente y Energía, 2003).

En relación con el Artículo 30 del Reglamento de operación y aprobación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, se justifica que la zona de terreno propuesto es propiedad de Recope y por ende no se requiere crear servidumbres de paso por tema de conducción del fluido.

Artículo 34 – Todo sistema de tratamiento contará con los dispositivos necesarios para que cada uno de sus procesos pueda ponerse fuera de servicio y ser vaciado independiente. Su diseño deberá permitir la operación del resto del sistema durante las labores de mantenimiento o de reparaciones de emergencia, de modo que se minimice el deterioro de la calidad del efluente y se asegure un rápido retorno a las condiciones normales de operación (Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente y Energía, 2003).

Para el diseño de esta planta de tratamiento de aguas residuales ordinarias se considera lo indicado en el párrafo anterior, estableciendo así dos módulos como

desarenadores, dos tanques de aireación, dos tanques de sedimentación y dos lechos para secado de lodos, con el objetivo de prever futuros imprevistos en el funcionamiento del sistema, o bien, por temas de mantenimiento.

Además, se analizó la procedencia y los posibles contaminantes del agua residual, lo cual dio resultados de un agua residual de tipo ordinaria, ya que es producto del uso de inodoros, piletas, fregaderos y duchas. Para el tema de aceites y combustibles la empresa cuenta con un separador de aguas API, mismo que funciona independiente en su totalidad, por lo que este diseño se enfoca solamente en la recolección de aguas residuales de oficinas, comedor y vestidores.

4.3.) Resultados de diseño

4.3.1.) Caudal de diseño

Para el caudal de diseño se utilizaron los datos de las facturaciones mensuales de agua potable del año 2020.

Tabla 6. Facturación de agua potable:

Mes	Facturación (m^3/mes)	m^3/día	m^3/s	L/día	L/s
Enero	416	13,87	0,0001605	13866,67	0,160
Febrero	490	16,33	0,0001890	16333,33	0,189
Marzo	472	15,73	0,0001821	15733,33	0,182
Abril	443	14,77	0,0001709	14766,67	0,171
Mayo	359	11,97	0,0001385	11966,67	0,139
Junio	264	8,80	0,0001019	8800,00	0,102
Julio	331	11,03	0,0001277	11033,33	0,128
Agosto	368	12,27	0,0001420	12266,67	0,142
Setiembre	377	12,57	0,0001454	12566,67	0,145
Octubre	365	12,17	0,0001408	12166,67	0,141
Noviembre	532	17,73	0,0002052	17733,33	0,205
Diciembre	318	10,60	0,0001227	10600,00	0,123
Media		13,15	0,0001522	13152,78	0,15

Fuente: Recope (2020).

Caudal promedio de aguas residuales ordinarias (Ecuación 1):

$$Q_{paro} = 0{,}8 * 0{,}15 \frac{L}{s}$$

$$Q_{paro} = 0{,}13 \frac{L}{s}$$

Caudal promedio de aguas residuales con aportes externos (Ecuación 2):

$$Q_{par} = 0{,}13 + 0 + 0{,}125$$

$$Q_{par} = 0{,}247 \frac{L}{s}$$

Para este caso no se cuenta con caudal de aguas residuales especiales, por tanto, su valor es cero.

Según Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (2017), el caudal por infiltraciones se establece en 0,25 l/s/km, por tanto, el valor de 0,125 L/s se considera como una aportación externa, y se obtiene de la multiplicación de 0,25 l/s/km por la distancia de 0,5 km, que corresponde a la longitud de la red de alcantarillado hasta el ingreso a la planta de tratamiento.

Caudal máximo (Ecuación 3):

$$Q_{max} = 0{,}247 * 1{,}8 + 0{,}125$$

$$Q_{max} = 0{,}569 \frac{L}{s}$$

Caudal mínimo (Ecuación 4):

$$Q_{min} = 1{,}2 * 0{,}247 + 0{,}125$$

$$Q_{min} = 0{,}42 \frac{L}{s}$$

Dado que el caudal mínimo es menor que 1,5 L/s, se establece el caudal de diseño en 1,5 L/s según lo establecido en la norma de diseño del AyA (2017).

4.3.2.) Canal de entrada y rejillas

Para el diseño del canal de entrada se toma en consideración criterios de la tabla 3. Área del canal de entrada (Ecuación 5):

$$A = \frac{0{,}0015}{0{,}6}$$

$$A = 0{,}00250 \text{ m}^2$$

El valor teórico del área del canal es 0,00250 m²; sin embargo, se propone una área de 0,20 m², la cual es mayor que el área requerida.

$$A = 0{,}20 \text{ m}^2$$

Se propone de sección rectangular. Las dimensiones del canal serán:

Ancho: 0,4 m

Alto: 0,5 m

Largo: 1,30 m

El largo del canal no necesariamente se debe calcular. Se requiere que sea capaz de contener la basura que queda atrapada en las rejillas.

Se debe calcular el radio hidráulico, el cual se obtiene del área mojada del canal entre el perímetro mojado:

$$R_h = \frac{0{,}20}{1{,}40}$$

$$R_h = 0{,}143 \text{ m}$$

La pendiente del canal (Ecuación 6):

$$S = \left(\frac{0{,}6 * 0{,}014}{(0{,}143)^{2/3}} \right)^2$$

Los siguientes datos son propuestos según la información teórica sobre rejillas de retención.

Tabla 7. Rejillas de retención:

Rejillas de limpieza manual		
Ancho del canal (Bc)	0,4	metros
Separación media (L)	0,04	metros
Rejas finas (b)	0,008	metros

Cálculo del área útil del canal en la zona de rejillas:

$$A_R = B_c \cdot \frac{L}{L+b} \cdot \left(1 - \frac{G}{100}\right)$$

Donde G es el grado de colmatación, 30% y los demás valores son tomados de la tabla 7.

$$A_R = 0{,}4 * \frac{0{,}04}{0{,}04 + 0{,}008} * \left(1 - 0{,}30\right)$$

$$A_R = 0{,}23 \text{ m}^2$$

El área de la rejilla 0,23 m² corresponde a la rejilla No.1, se requieren dos juegos de rejillas según Normativa de diseño de acueductos y alcantarillados, por lo que se calcula también el área útil de la rejilla No. 2 de la misma manera que la primera, con la única diferencia de que la separación media entre barras, es decir, (L), será de 0,025 m.

La reja No.2 debe fabricarse con barras más continuas ya que se encarga de filtrar los sólidos que logran pasar en la reja No.1.

Área útil para la rejilla No.2:

$$A_{R2} = 0{,}21 \text{ m}^2$$

Profundidad en la zona de la rejilla (Ecuación 7):

$$P = 0{,}0015 * \frac{0{,}008 + 0{,}04}{(1 - 0{,}3) * 0{,}6 * 0{,}4}$$

$$P = 0{,}0107 \text{ m}$$

Profundidad en la zona de rejilla No.2 se calcula igual que la ecuación 7, cambian los valores correspondientes a la rejilla No.2 como la separación entre barras, la cual es menor para la rejilla No.1.

$$P = 0{,}0118 \text{ m}$$

Pérdida de carga (Ecuación 8):

$$\Delta H = \frac{(0{,}6)^2}{9{,}1}$$

$$\Delta H = 4 \text{ cm}$$

La pérdida de carga se considera aceptable para valores menores de 15 cm.

Cantidad de barrotes (Ecuación 9):

$$N = \frac{0{,}4 - 0{,}04}{0{,}008 + 0{,}04}$$

$$N = 8 \text{ barrotes}$$

El valor de N = 8 corresponde a la reja No.1, se proponen 10 barrotes.

Para la reja No.2 se proponen 16 barrotes.

Longitud de barrotes (Ecuación 10):

$$L_b = \frac{0,25}{\text{Sen } 45^o}$$

$$L_b = 0,35 \text{ m}$$

4.3.3.) Desarenadores

Se requieren dos módulos, según Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (2017), por lo que se considera que el 50% del fluido que ingrese se redirigirá a cada uno de los módulos, por tanto, el caudal de diseño se divide en dos. Esta fórmula se utiliza en unidades de m^3/h.

Para el cálculo del área se toma en cuenta la carga superficial del agua residual, factor que puede operar en función de la velocidad y utilizarse despejando la fórmula del cálculo del caudal, es decir, Q = A * V.

La carga superficial considerada se establece con base en la tabla 4, en unidades de medida de $m^3/h.m^2$.

Área del desarenador (Ecuación 11):

$$A = \frac{2,70}{40}$$

$$A = 0,0675 \text{ m}^2$$

Se propone un área de 0,30 m^2, la cual se cumple dado que es mayor a la requerida.

$$A = 0,30 \text{ m}^2$$

Volumen del desarenador (Ecuación 12):

$$V = 0,75 * 0,3$$

$$V = 0,2250 \text{ m}^3$$

Se verifica que el tiempo de retención hidraúlica cumpla con los parámetros establecidos según la tabla 4.

Tiempo de retención hidráulica (Ecuación 13):

$$T_{RH} = \frac{0{,}2250}{0{,}00075}$$

$$T_{RH} = 300 \text{ s}$$

Cumple con los parámetros de tiempo de retención.

Área transversal del desarenador (Ecuación 14):

Se propone una velocidad horizontal de 0,3 m/s según los parámetros establecidos en la tabla 4.

$$A = \frac{0{,}00075}{0{,}3}$$

$$A = 0{,}003 \text{ m}^2$$

Se propone una área transversal para el desarenador de 0,210 m². Cumple con área mínima de 0,003 m².

$$A = 0{,}210 \text{ m}^2$$

Ancho del canal desarenador (Ecuación 15):

$$B = \frac{0{,}210}{0{,}75}$$

$$B = 0{,}30 \text{ m}$$

Se propone una profundidad de 0,75 m.

Largo del canal desarenador (Ecuación 16):

$$L = \frac{0,30}{0,30}$$

$$L = 1 \text{ m}$$

4.3.4.) Tratamiento secundario

4.3.4.1.) Tanques de aireación

Volumen del tanque de aireación (Ecuación 17):

El volumen del tanque se calculó con base en un tiempo de retención hidráulica de 16 horas, es decir, 57600 s, y se consideró el caudal total de diseño, por tanto, el resultado refleja el volumen total:

$$V = 0,0015 * 57600$$

$$V = 86,40 \text{ m}^3$$

Se recomienda dos tanques para evitar pérdidas de eficiencia y/o inconvenientes en el desempeño del sistema a causa de mantenimientos o factores ajenos que se puedan presentar, por lo tanto, el volumen para cada tanque es de:

$$V = \frac{86,40}{2}$$

$$V = 43 \text{ m}^3$$

Área del tanque de aireación (Ecuación 18):

Para esta ecuación se considera una altura del agua de 3 m.

$$A = \frac{86,40}{3}$$

$$A = 28,80 \text{ m}^2$$

El área para cada tanque es de:

$$A = \frac{28,80}{2}$$

$$V = 14,40 \text{ m}^2$$

Se proponen las dimensiones de cada tanque:

Ancho: 2,5 m

Largo: 5,5 m

4.3.4.2.) Sistema de aireación

Se tomó un valor de carga contaminante de la tabla 2. Composición típica del agua residual doméstica para un tipo de concentración débil, debido a que se considera un tipo de concentración media o mayor cuando el agua residual se compone de un 75% de sólidos suspendidos y un 40% de sólidos orgánicos filtrables de origen animal, vegetal y actividades humanas. En relación con los sólidos filtrables un 50% de ese porcentaje se atribuye a sustancias como proteínas, las cuales son componentes por lo general de origen animal y de alimentos crudos de origen vegetal.

Por lo anterior no se considera que la concentración de carga contaminante del agua recolectada en la terminal, de uso de oficinas, posea una media o alta carga de contaminación.

Carga contaminante: la estimación de la carga contaminante en el caso de entes generadores existentes deberá realizarse a partir de las caracterizaciones realizadas por laboratorios debidamente habilitados por el Ministerio de Salud. La estimación de la carga contaminante en el caso de entes generadores que aún no existen debe efectuarse a partir de criterios de diseño recomendados por fuentes bibliográficas o por experiencias documentadas.

La caracterización por un laboratorio deberá cumplir con los requisitos estipulados en el Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales (Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente y Energía, 2003).

Por tanto:

DBO_5 = 110 mg/L según tabla 2.

Q = 129,6 m³/día.

$$DBO_5 = \left(\frac{110}{1\ 000\ 000} * 10000 \right) * 129{,}6$$

$$DBO_5 = 14{,}26 \frac{kg\ DBO}{día}$$

Se considera 90 kg de aire por kg de DBO según Gutiérrez & Olmo (2007).

Cantidad de aire requerido (Ecuación 19):

$$Aire_{req} = \frac{14{,}26 * 90}{24}$$

$$Aire_{req} = 53{,}46 \frac{kg\ Aire}{hora}$$

Es decir, para remover 110 mg/L DBO se requiere 53,46 kg aire /hora.

Presión hidrostática del agua (Ecuación 20):

Datos:

Densidad del agua (ρ) = 1000 $\frac{Kg}{m^3}$

g = 9,80 m/s²

h = 3 m (altura del agua)

$$P_{H2O} = 1000 * 9{,}80 * 3$$

$$P_{H2O} = 29\ 400 \frac{kg}{m.s^2}$$

$$P_{H2O} = 29.4\ kPa$$

Presión absoluta en el tanque de aireación (Ecuación 21):

Datos:

Presión atmosférica (Patm) = 101,3 kPa.

P absoluta = 101,3 + 29,4

P absoluta = 130,70 kPa

Saturación de oxígeno (Ecuación 22):

$$Cs,m = Cs\frac{Pa + 0{,}5P_h}{P_o}$$

Tabla 8. Solubilidad de oxígeno en el agua:

Temperatura °C	Concentración de cloruro en agua mgL^{-1}				
	0	5	10	15	20
16	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0
17	9,7	9,3	8,8	8,3	7,8
18	9,5	9,1	8,6	8,2	7,7
19	9,4	8,9	8,5	8,0	7,6
20	9,2	8,7	8,3	7,9	7,4
21	9,0	8,6	8,1	7,7	7,3
22	8,8	8,4	8,0	7,6	7,1
23	8,7	8,3	7,9	7,4	7,0
24	8,5	8,1	7,7	7,3	6,9
25	8,4	8,0	7,6	7,2	6,7
26	8,2	7,8	7,4	7,0	6,6
27	8,1	7,7	7,3	6,9	6,5
28	7,9	7,5	7,1	6,8	6,4
29	7,8	7,4	7,0	6,6	6,3
30	7,6	7,3	6,9	6,5	6,1

Fuente: Gutiérrez & Olmo (2007).

Datos:

Cs: 7,6 (coeficiente ver tabla 8)

Pa: 101,4 kPa (presión distinta a la normal)

Ph: 29,4 kPa

Po: 101,3 kPa

$$Cs,m = 7,6 * \left(\frac{101,4 + (0,5 * 29,4)}{101,3}\right)$$

$$Cs,m = 8,71 \frac{mg}{L}$$

Condiciones de trabajo reales de los difusores (Ecuación 23):

Datos:

Qs: 0,50.

α : 0,85 coeficiente de difusor

C: 0,2076 coeficiente de fórmula

n: 1,05 dato del difusor

m: 0,7 dato del difusor

p: 0,32 dato del difusor

β: 0,9 factor de corrección

t: 33º temperatura promedio en Barranca

H: 3 m profundidad

W: 2,5 m ancho

$$G = C\ Qs^{n}\ H^{m}\ W^{-p}\ \alpha\ (\beta\ Cs,m - C)\ 1,02^{\ t-20}$$

G = 0,2076 * (0,50^1,05) * (3^0,7) * (2,5^ -0,32) * (0,85) * ((0,9 * 8,71) – 0,2076) * (1,02^ 33-20)

G = 1,35 Kg / h * ud

Las condiciones reales de los difusores son de 1,35 kg/h.

Cantidad de difusores (Ecuación 24):

$$U = \frac{53,46}{1,35}$$

$$U = 40 \text{ uds}$$

Son 20 unidades para cada tanque aireador.

Espaciamiento entre difusores (Ecuación 25):

$$X = \frac{5,5}{1,35}$$

$$X = 28,54 \text{ cm}$$

El máximo espaciamiento es de 28 cm, se propone a cada 20 cm.

Cálculo de potencia del compresor (Ecuación 26):

Para saber la potencia requerida del compresor primeramente se calcula la presión del flujo del aire, multiplicando el flujo del aire del difusor (m^3/min) indicado en la información técnica, por la cantidad total de difusores.

Es decir, Qs = 0,50 * 40

Qs = 20 m^3/min

Datos para el cálculo de la potencia:

Eficiencia: 70%

ΔP = 130,70 – 101,4

ΔP = 29,30 kPa

$$\text{potencia}\,(\text{kW}) = \frac{Q\,s\,\Delta P}{E}$$

$$PT = \frac{20 * 29{,}30}{0{,}7 * 60}$$

$$PT = 13{,}95\ \text{kW}$$

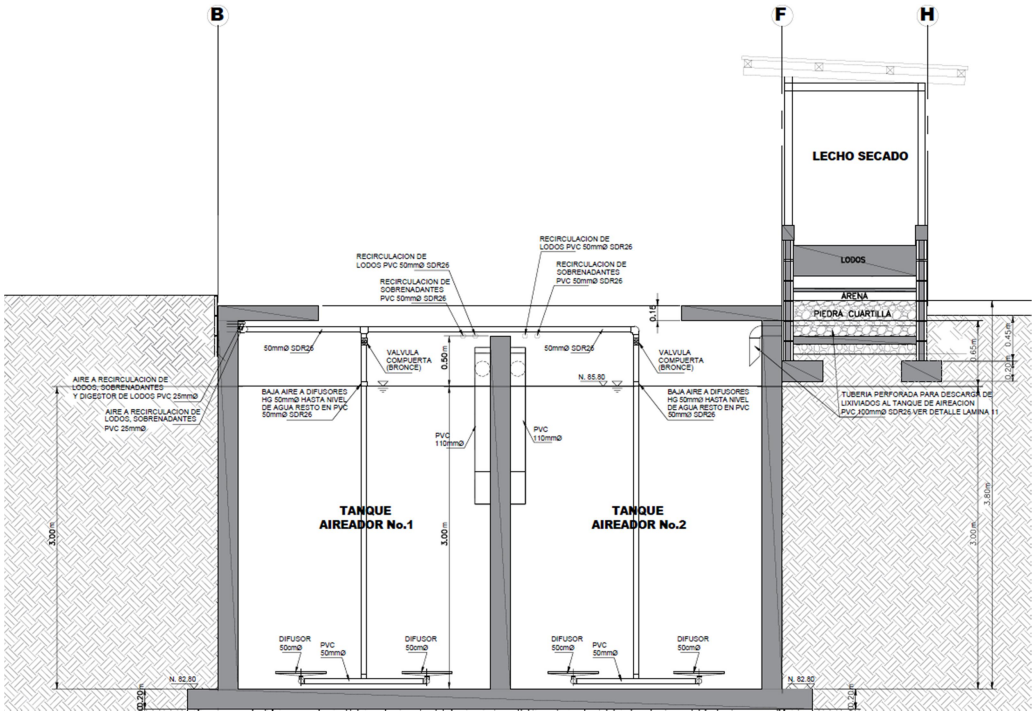


Ilustración 23. Tanques de aireación.

Fuente: Salas (2021)

4.4.) Tanques de sedimentación

Volumen del tanque sedimentador

Para el cálculo del volumen del tanque sedimentador se utilizó un tiempo de retención hidráulica de 2 horas.

$$V_{TS} = T_{RH} * Q$$

Por tanto:

$$V_{TS} = 2\ h * 5{,}4\ \frac{m^3}{h}$$

$$V_{TS} = 10{,}8\ m^3$$

Volumen de acumulación de sólidos (Vas):

Se calcula como el 20% del volumen del tanque sedimentador, es el 20% del volumen útil del reactor.

Por tanto:

$$Vas = 0{,}20 * V_{TS}$$

$$Vas = 0{,}20 * 10{,}8$$

$$Vas = 2{,}16\ m^3$$

Volumen total del sedimentador:

$$V_{Total_S} = V_{TS} + Vas$$

$$V_{Total_S} = 10{,}8 + 2{,}16$$

$$V_{Total_S} = 12{,}96\ m^3$$

Dado que se proponen dos tanques de sedimentación para garantizar la continuidad del sistema en caso de mantenimiento y/o factores que afecten algún proceso, el volumen total del tanque sedimentador se divide entre 2 para obtener el volumen de cada tanque.

Por tanto:

$$V_{Total_S} = \frac{12,96}{2}$$

$$V_{Total_S} = 6,48 \text{ m}^3$$

Área para el tanque sedimentador:

$$A_{TS} = \frac{V_{Total_S}}{H_{agua}}$$

H agua: altura de lámina de agua, se propone 3 m.

Por tanto:

$$A_{TS} = \frac{12,96}{3}$$

$$A_{TS} = 4,32 \text{ m}^2$$

Dado que son dos módulos, el área para cada sedimentador es de 4,32 m².

Una vez obtenidos el área y volumen, se proponen las siguientes dimensiones:

Ancho: 1,3

Largo: 2 m

Profundidad del agua: 3 m

4.5.) Tanque digestor de lodos y lechos de secado

Área del tanque digestor (Ecuación 27):

$$A = \frac{2,16}{3}$$

$$A = 0,72 \text{ m}^2$$

Una vez obtenida el área, se proponen las siguientes dimensiones:

Ancho: 0,8 m

Largo: 1,3 m

Por tanto, el área es de 1,04 m² > 0,72 m². Cumple con el área requerida.

Volumen del tanque digestor (Ecuación 28):

$$V_{TD} = 1{,}04 * 3$$

$$V_{TD} = 3{,}12 \text{ m}^3$$

Volumen del lecho de secado (Ecuación 29):

Para el cálculo del volumen del lecho de secado se considera un 50% de recirculación de lodos.

Por tanto:

$$V_{LS} = \frac{2{,}16}{2}$$

$$V_{LS} = 1{,}08 \text{ m}^3$$

Área del lecho de secado (Ecuación 30):

Se considera una altura de lodo o espesamiento de 0,3 m.

Por tanto:

$$A_{LS} = \frac{1{,}08}{0{,}3}$$

$$A_{LS} = 3{,}6 \text{ m}^2$$

Dimensiones del lecho de secado:

Ancho: 1,2 m

Largo: 1,5 m

Área para cada módulo: 1,8 m² (se consideran dos módulos)

Área total: 3,6 m²

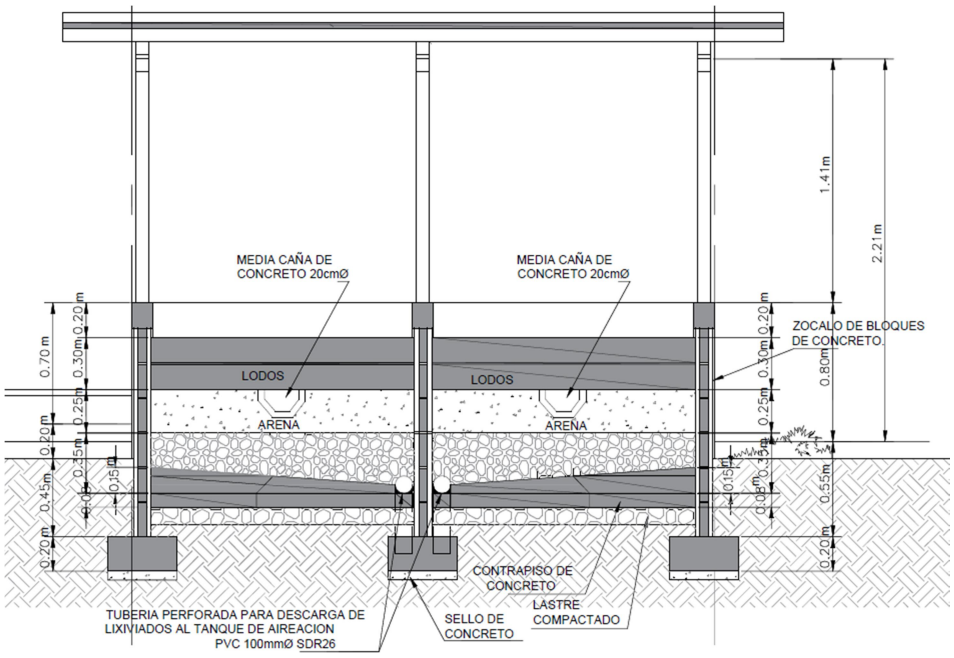
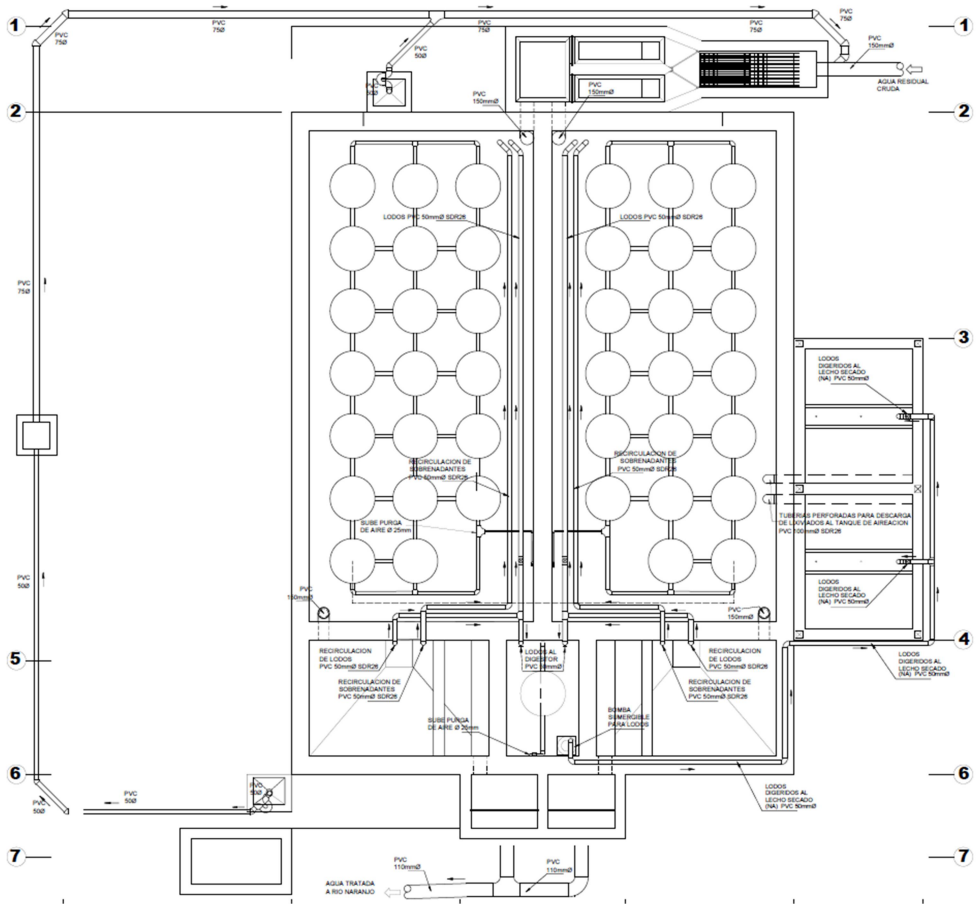
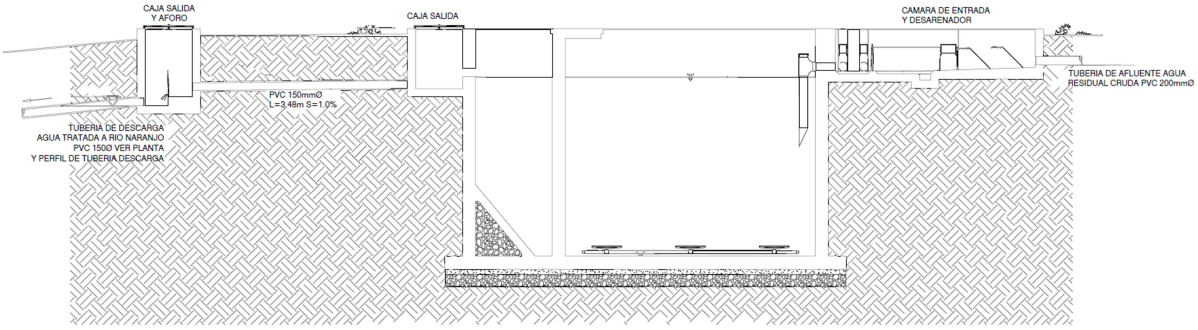


Ilustración 24. Lecho de secado.

Fuente: Salas (2021).

5.) PROPUESTA DE DISEÑO





PERFIL PLANTA DE TRATAMIENTO ESCALA 1:50

Conclusiones

1- Las plantas de tratamiento se convierten cada vez en un alternativa más eficiente para dar solución a las aguas residuales, debido a que los resultados obtenidos con otros procesos como tanques sépticos no se consideran como alternativas eficientes para el medio ambiente, han provocado variedad de inconvenientes en terrenos por infiltraciones, las cuales debido a la escorrentía generada por las lluvias llegan a las cuencas contaminando ríos y cuerpos de agua en general; además, son sistemas que requieren de mantenimiento periódico y se ha comprobado que no siempre se cumple con este requisito, motivo por el que su funcionamiento en ocasiones no es el más adecuado.

El proyecto en estudio se ubicó, según la propuesta que se ha desarrollado, en una área que cumple con los lineamientos establecidos por el Reglamento de aprobación y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, y el Manual de regulaciones jurídicas para la gestión del recurso hídrico en Costa Rica, por tanto, cumple con la normativa que rige para la ubicación de estos sistemas de tratamiento.

Generar proyectos de plantas de tratamiento, además de exigir un análisis para determinar un sistema que cumpla con los requerimientos y se adecúe a la normativa legal y técnica, debe considerar la ampliación, mantenimiento o construcción de nuevas redes de alcantarillado sanitario que transporten las aguas residuales hasta los sistemas de tratamiento, lo cual representa un desarrollo en la infraestructura en saneamiento, no siempre se cuenta con los recursos presupuestarios para los requerimientos de la población; sin embargo, Costa Rica es un país destacado por ser amigable con el medio ambiente y requiere de soluciones que contribuyan a mantener el equilibrio entre el consumismo diario de la población, que genera desechos constantemente, y el medio ambiente al cual vertemos estos desechos.

2- Los sistemas de tratamientos con base en lodos activados de aireación extendida son de las propuestas más confiables que se pueden presentar, por tanto, se propuso este proceso debido a su eficacia en la eliminación de las sustancias contaminantes, en tiempos más reducidos en comparación con un sistema anaeróbico. Otro factor a considerar es que son los procesos con menor riesgo de generación de malos olores, lo

cual es de suma importancia para todas las personas, los malos olores producen efectos perjudiciales en los seres humanos y son causa de problemas legales para los entes generadores.

3- El diseño de las unidades de tratamiento que componen la planta propuesta fue determinado con base en datos reales de la empresa y posibles proyecciones de crecimiento en la terminal, por lo que las dimensiones propuestas cumplen con lo requerido para su funcionamiento.

El saneamiento ambiental siempre será un tema de interés público y privado, ya que es un asunto que nos compete a todos. Algunas formas de contribuir con este tema son fomentar programas para el mejoramiento de los sistemas y proponer prácticas para la reutilización de estos recursos en las diferentes actividades humanas.

Recomendaciones

Para el manejo actual de las aguas residuales en la terminal de Barranca se recomienda valorar presupuestariamente esta propuesta de sistema de tratamiento; para su desarrollo se han valorado factores como el clima del lugar, el área propuesta, el tipo de agua y residuos que se requieren tratar, entre otros puntos. Además, su diseño fue evaluado a largo plazo por lo que se convierte en una inversión dado que brindará solución por largo periodo.

De llevarse a cabo la construcción de esta propuesta, se recomienda la participación de un profesional en la rama de ingeniería química, con el fin de apoyar los cálculos hidráulicos realizados con los procesos químicos que demanda un sistema de aguas residuales como este.

También es necesaria, para contribuir con este estudio, la intervención de un profesional en topografía para la generación de curvas de nivel y un estudio de suelos del sitio, con el fin de establecer las condiciones reales del terreno, su capacidad soportante, tipo de suelo y asegurar el buen funcionamiento de todos los procesos que conlleva esta planta de tratamiento.

Por último pero no menos importante, se recomienda brindar asesoramiento al personal que se encargue del mantenimiento de los equipos y la eficacia de sus procesos, lo cual proporcionará seguridad en los resultados obtenidos y buen manejo del sistema.

Glosario

- Aguas residuales: es esencialmente el agua que se desprende de la comunidad una vez ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales ha sido empleada (Metcalf & Eddy, 1995).
- Efluente: en lo relativo a los sistemas de tratamiento es el caudal que sale de la última unidad de tratamiento (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2017).
- Afluente: se refiere a las aguas que ingresan al tratamiento preliminar, o a la primera unidad de tratamiento (Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente y Energía, 2003).
- Alcantarillado sanitario: red pública de tuberías que se utilizan para recolectar y transportar las aguas residuales hasta su punto de descarga a un medio receptor (Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente y Energía, 2003).
- Carga másica o carga orgánica "Cm": conocida también como carga contaminante, es el producto de la concentración de un contaminante "C" y el caudal de aguas residuales vertidas "Q". Es entendida como el aporte en masa de contaminantes de un vertido kg/día (Rivas, 2012).
- Carga superficial: corresponde al cociente entre la carga másica (carga contaminante) "Cm" por unidad de área superficial del reactor "S" (kg/día.m^2) (Rivas, 2012).
- Planta de tratamiento de aguas residuales: conjunto de infraestructura, equipamiento y demás elementos necesarios para ejecutar los procesos de tratamiento de las aguas residuales, incluidas las de tipo ordinario, las de tipo especial y los aportes por infiltración; incluye tratamientos especiales o no convencionales requeridos para cumplir con la calidad del vertido del agua residual. También incluye la correcta disposición de los desechos que se generen de cada unidad de tratamiento, según la legislación nacional y normativa técnica aplicable (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2017).

Bibliografía

Carreño, C. A. (2016). *Biotecnología Ambiental de Aguas y Aguas Residuales.* Bogotá, Colombia: ECOE.

Colomer, F. L. (2016). *Cinética de Procesos Biológicos en Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.* España: Universitat d`Alacant.

Comisión Nacional del Agua. (2019). Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento. *Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento*. Coyoacán, México, México.

Cyclusid. (24 de Marzo de 2020). *Cyclusid*. Recuperado el Abril de 2021, de Cyclusid: https://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-primario/#:~:text=Los%20tratamientos%20primarios%20son%20aquellos,%2C%20coagulaci%C3%B3n%20%E2%80%93%20floculaci%C3%B3n%20y%20filtraci%C3%B3n.

Energía, M. d., & República, P. d. (07 de Abril de 2015). Reglamento a la ley forestal. *Reglamento a la ley forestal*. San José, San José, Costa Rica.

Fallas, F. R. (2012). *Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Costa Rica.* San José.

Galvín, R. M. (2014). *Tratamiento y Depuración Industrial de Aguas.* Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

Gandarillas, J. L. (2016). Clarificador. Decantación Secundaria Gestión de Aguas Residuales y Reutilización. *Clarificador. Decantación Secundaria Gestión de Aguas Residuales y Reutilización*. España, España.

Garay, M. M. (2016). *Tratamiento de Aguas Residuales Técnicas Convencionales.* Ecuador: ISBN.

Gutiérrez, C. M., & Olmo, J. P. (2007). *Procesos para el Tratamiento Biológico de Aguas Residuales Industriales.* La Habana: Felix Varera.

Gutiérrez, R. S., & González, W. V. (07 de Mayo de 2020). Canon Ambiental por Vertidos en Costa Rica. *Canon Ambiental por Vertidos en Costa Rica*. San José, San José, Costa Rica.

Gutiérrez, R. S., & González, W. V. (2020). *Canon Ambiental por vertidos en Costa Rica como instrumento económico en la gestión de aguas residuales.* Heredia.

Ingeniería, R. (2016). *RDE ING*. Recuperado el Marzo de 2021, de RDE ING: http://www.rdeing.com/productos4.html

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. (Julio de 2017). Norma Técnica para Diseño y Construcción de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Pluvial. *Norma Técnica para Diseño y Construcción de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Pluvial*. Costa Rica.

Llodra, E. R., & Dapena, J. L. (2002). *Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales.* España: Ediciones Díaz de Santos.

Martínez, Á. R., & Torrecillas, A. S. (2018). *Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales (3a.ed.).* Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.

Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales.* España: McGRAW-HILL.

Ministerio de Ambiente y Energía; Ministerio de Salud. (Junio de 2016). Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. San José, San José, Costa Rica.

Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente y Energía. (9 de Octubre de 2003). Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. *Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. San José, San José, Costa Rica: 31545-S-MINAE.

Pistonesi, C., Haure, J. L., & ElMar, R. D. (2017). *Energía a partir de las Aguas Residuales.* Córdoba, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.

Pro, G. E. (s.f.). *Google Earth Pro*. Recuperado el Abril de 2021, de Google Earth Pro: Google Earth Pro

Pulido, D. D. (Setiembre de 2015). Sistemas de tratamiento . *Sistemas de tratamiento operaciones unitarias de potabilización*. México, México, México.

Rica, C. F. (Enero de 2017). Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias de Costa Rica. *Código de Instalaciones Hidraúlicas y Sanitarias de Costa Rica*. San José, San José, Costa Rica: Imprenta Nacional.

Rivas, W. A. (Octubre de 2012). *Researchgate.* Recuperado el Febrero de 2021, de Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/298354134_Diseno_de_Plantas_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales

Rodríguez, M. G. (2006). *Depuración de Aguas Residuales: modelización de procesos de lodos activos.* Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Rozo, J. C., Merchán, N., Galvis, J., & Manjarres, E. (15 de Diciembre de 2018). Deshidratación de los lodos en lechos de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. *Deshidratación de los lodos en lechos de secado y su influencia sobre*

la actividad biológica de los microorganismos. Tunja, Tunja, Colombia: Gestión y Ambiente.

Anexos

Ilustración 25. Ingreso al área operativa.

Fuente: Salas (2021).

Ilustración 26. Zona de ubicación de la Planta de Tratamiento.

Fuente: Salas (2021).

Ilustración 27. Ruta hacia Río Naranjo

Fuente: Salas (2021).

Ilustración 28. Río Naranjo.

Fuente: Salas (2021).