



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO**

DIRECCIÓN DE POSGRADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL CON MENCIÓN EN
RECURSOS HÍDRICOS**

TEMA:

**“PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES URBANAS PARA LA PARROQUIA DE SICALPA,
CANTÓN COLTA”**

AUTOR:

Ing. Erick Efraín Cuesta Zuñiga

TUTOR:

PhD. José Gregorio Prato Moreno

Riobamba – Ecuador

2025

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: “PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS PARA LA PARROQUIA DE SICALPA, CANTÓN COLTA”, ha sido elaborado por el Ing. Erick Efraín Cuesta Zuñiga, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta anti plagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 13 de marzo, de 2025

A handwritten signature in blue ink that reads "José G. Prato Moreno". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

PhD. José Gregorio Prato Moreno

TUTOR

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, Erick Efraín Cuesta Zuñiga, con número único de identificación 0605904614, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS PARA LA PARROQUIA DE SICALPA, CANTÓN COLTA”, previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos Hídricos.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 13 de marzo de 2025



Ing. Erick Efraín Cuesta Zuñiga

N.U.I. 0605904614

Agradecimiento

A Dios, fuente inagotable de sabiduría y fortaleza, quien ha guiado cada paso de mi camino y me ha permitido culminar esta etapa con éxito. Su amor y bendiciones han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante en los momentos más desafiantes.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente en un ambiente de excelencia y crecimiento profesional. Gracias por proporcionarme los conocimientos y herramientas necesarias para contribuir al desarrollo de nuestra sociedad.

A mi tutor de tesis, el Doctor José Prato, por su invaluable orientación, paciencia y apoyo durante el desarrollo de esta investigación. Su experiencia y compromiso han sido fundamentales para la culminación de este trabajo, y le estaré eternamente agradecido por compartir su conocimiento conmigo.

A mis amigos cercanos, quienes han sido mi apoyo incondicional en esta travesía. Gracias por su aliento, por escucharme en los momentos difíciles y por celebrar conmigo cada logro alcanzado. Su amistad ha sido un pilar esencial en este proceso.

A los amigos que se convirtieron en familia durante esta maestría, gracias por los momentos compartidos, por las risas, el compañerismo y el aprendizaje mutuo. La experiencia de esta etapa no habría sido la misma sin ustedes, y me llevo recuerdos imborrables de nuestra convivencia.

A la Fundación World Vision, por su valiosa ayuda con la logística y la movilidad, facilitando así el desarrollo de esta tesis. Su apoyo ha sido fundamental para llevar a cabo este proyecto de manera eficiente y organizada.

A todos los que, de una u otra manera, han sido parte de este camino, les expreso mi más sincero agradecimiento. Este logro también es suyo.

Dedicatoria

A mi padre, Wilson Cuesta, por ser el hombre con una fuerza inquebrantable, por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles, no solo como padre, sino también como amigo. Tu apoyo incondicional y ejemplo de perseverancia han sido mi mayor inspiración.

A mi madre, María Zuñiga, quien, a pesar de los desafíos de la enfermedad, ha velado por mi bienestar, preocupándose por mi salud y felicidad. Su amor y fortaleza han sido el pilar que me ha sostenido en cada paso de este camino.

A Mateo Cuesta, mi hermano menor, a quien considero como un hijo. Espero que este logro sirva como ejemplo y que puedas recorrer un camino lleno de bendiciones y éxitos, sin rendirte ante las adversidades del futuro. Siempre estaré aquí para apoyarte.

A Wilson Andrés Cuesta, mi hermano mayor, por ser parte fundamental de mi vida y acompañarme en este viaje con su cariño y consejos. Su presencia ha sido un soporte invaluable en mi crecimiento personal y profesional.

A Cristian Aldas, más que un primo, un segundo hermano mayor y mentor. Gracias por enseñarme disciplina, madurez y convicción para enfrentar la vida con determinación y salir adelante. Tus enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi camino.

A Rosa Ortiz, mi abuela, quien con su fe inquebrantable en Dios siempre ha apoyado a toda nuestra familia. Su amor, oraciones y ejemplo de vida han sido una fuente de fortaleza y esperanza en nuestro camino.

A todos ustedes, dedico este logro con amor y gratitud.

Índice General

| | |
|---|------------|
| Certificación del Tutor | ii |
| Declaración de Autoría y Cesión de Derechos | iii |
| Agradecimiento | iv |
| Dedicatoria | v |
| Índice General | vi |
| Índice de Tablas | ix |
| Índice de Figuras | xi |
| Resumen | 12 |
| Abstract | 13 |
| Introducción | 14 |
| Capítulo 1 Generalidades | 16 |
| 1.1 Planteamiento del Problema | 16 |
| 1.2 Justificación de la Investigación..... | 17 |
| 1.3 Objetivos..... | 18 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 18 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 18 |
| Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica | 19 |
| 2.1 Fundamentación Legal | 19 |
| 2.1.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)..... | 19 |
| 2.1.2 Código Orgánico del Ambiente (2017) | 19 |
| 2.1.3 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua | 20 |
| 2.1.4 Normativas Técnicas | 20 |
| 2.1.5 Plan Nacional para el Buen Vivir | 20 |
| 2.2 Fundamentación Teórica | 20 |
| 2.2.1 Aguas Residuales..... | 20 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.2.2 | Características de las Aguas Residuales | 21 |
| 2.2.3 | Tratamiento de Aguas Residuales | 26 |
| Capítulo 3 Diseño Metodológico..... | | 31 |
| 3.1 | Enfoque de la Investigación | 31 |
| 3.2 | Diseño de la Investigación..... | 31 |
| 3.3 | Técnicas de Recolección de Datos | 31 |
| 3.3.1 | Consulta de Documentos Institucionales..... | 31 |
| 3.3.2 | Entrevista Semi-estructurada..... | 31 |
| 3.3.3 | Observación Directa | 32 |
| 3.3.4 | Uso de Tecnología Geoespacial | 32 |
| 3.4 | Caracterización de las Aguas Residuales de la Zona de Estudio | 32 |
| 3.4.1 | Toma de Muestras de Aguas Residuales de la Zona de Estudio | 32 |
| 3.4.2 | Caracterización de las Aguas Residuales | 33 |
| 3.5 | Elección y Pre-diseño del Sistema de Tratamiento | 34 |
| 3.5.1 | Selección del Sistema de Tratamiento..... | 34 |
| 3.5.2 | Pre-diseño y dimensionamiento del sistema de tratamiento..... | 37 |
| Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados..... | | 47 |
| 4.1 | Ubicación..... | 47 |
| 4.2 | Punto de Descarga | 48 |
| 4.3 | Punto de Muestreo | 48 |
| 4.4 | Caracterización de las Aguas Residuales | 50 |
| 4.5 | Elección del Sistema de Tratamiento | 52 |
| 4.6 | Dimensionamiento del Sistema de Tratamiento..... | 57 |
| 4.6.1 | Diseño del Sistema de Tanque de Homogenización | 57 |
| 4.6.2 | Diseño del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)..... | 58 |
| 4.6.3 | Reactor Anaerobio UASB | 60 |

| | | |
|-----|---|-----------|
| 4.7 | Materiales de Construcción | 64 |
| 4.8 | Propuesta de la Ubicación más Adecuada para el Sistema de Tratamiento | 65 |
| | Capítulo 5 | 66 |
| | Conclusiones..... | 66 |
| | Recomendaciones..... | 67 |
| | Referencias Bibliográficas | 68 |
| | Anexos..... | 72 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Características de las Aguas Residuales Rurales..... | 22 |
| Tabla 2. Condiciones necesarias para la recolección de muestras. | 33 |
| Tabla 3. Indicadores analizados en las aguas residuales. | 34 |
| Tabla 4. Escala de evaluación cuantitativa de criterios. | 36 |
| Tabla 5. Datos de población y tasa de crecimiento anua..... | 38 |
| Tabla 6. Dotaciones de agua para estudio y diseño de sistemas de aguas residuales..... | 40 |
| Tabla 7. Parámetros de diseño para el dimensionamiento del Tanque de Homogenización. | 42 |
| Tabla 8. Parámetros de diseño para el dimensionamiento del Sistema de flotación por aire disuelto (D.A.F.)..... | 43 |
| Tabla 9. Rendimientos y porcentaje de remoción en el Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)..... | 43 |
| Tabla 10. Parámetros de diseño para el dimensionamiento del Reactor UASB..... | 45 |
| Tabla 11. Parámetros de diseño para el dimensionamiento del Reactor UASB..... | 46 |
| Tabla 12. Caracterización de las aguas residuales de la parroquia de Sicalpa | 51 |
| Tabla 13. Valoración cuantitativa de criterios por método de factores ponderados..... | 54 |
| Tabla 14. Selección del sistema de tratamiento | 55 |
| Tabla 15. Caudal de diseño y población futura | 57 |
| Tabla 16. Dimensionamiento del Tanque de Homogenización..... | 57 |
| Tabla 17. Dimensionamiento del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)..... | 58 |
| Tabla 18. Balance de remoción del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.). | 60 |
| Tabla 19. Dimensiones generales del Reactor UASB | 60 |
| Tabla 20. Dimensionamiento de la sección del sedimentador y acumulación de lodos del Reactor UASB | 61 |
| Tabla 21. Dimensionamiento de la sección de la campana del Reactor UASB | 61 |
| Tabla 22 Balance de remoción del sistema UASB..... | 62 |

| | |
|--|----|
| Tabla 23 Materiales de Construcción para el Sistema de Tratamiento | 64 |
| Tabla 24 Solubilidad de saturación del aire en agua a una atmósfera..... | 87 |
| Tabla 25 Densidad del aire a 1 atmósfera..... | 88 |
| Tabla 26 Presión de vapor de agua..... | 88 |
| Tabla 27. Dimensionamiento del Tanque Séptico..... | 98 |
| Tabla 28. Balance de remoción del Tanque Séptico. | 99 |

Índice de Figuras

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Ubicación de la parroquia de Sicalpa..... | 47 |
| Figura 2. Área de descargas a estudiar | 49 |
| Figura 3. Punto de muestreo | 50 |
| Figura 4. Esquema del Sistema de Tratamiento | 56 |
| Figura 5. Esquema del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)..... | 58 |
| Figura 6. Esquema del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)..... | 59 |
| Figura 7. Esquema del Reactor UASB | 62 |
| Figura 8. Esquema de Reactor UASB - Vista en Corte..... | 63 |
| Figura 9. Ubicación para el sistema de tratamiento de la parroquia de Sicalpa | 65 |
| Figura 10. Valores de Coliformes Totales y Fecales..... | 76 |
| Figura 11. Valores de DQO y DBO ₅ | 76 |
| Figura 12. Valores de Fosfatos, Nitratos y Nitritos..... | 77 |
| Figura 13. Valores de Potencial de Hidrógeno y Conductividad | 77 |
| Figura 14. Sólidos Totales, Aceites y Grasas | 78 |
| Figura 15. Vista en Planta de Reactor UASB - Campanas Recolectoras de Gas | 96 |
| Figura 16. Vista Longitudinal de Reactor UASB - Canaleta de Recolección y Aletas Deflectoras..... | 97 |
| Figura 17. Esquema del Tanque Séptico | 99 |
| Figura 18. Esquema Técnico de Tanque Séptico | 105 |
| Figura 19. Vista Lateral del Tanque Séptico | 106 |

Resumen

El presente proyecto de tesis propone un sistema de tratamiento de aguas residuales para la parroquia de Sicalpa, ubicada en el cantón Colta, provincia de Chimborazo, con el apoyo del GAD de Colta y la colaboración de la fundación World Vision. La metodología utilizada incluyó una investigación aplicada con diseño de campo, recopilación de información primaria y secundaria, visitas técnicas y entrevistas con las partes involucradas. Además, se realizaron análisis fisicoquímicos y biológicos de las aguas residuales para evaluar los niveles de contaminación y determinar la necesidad de tratamiento. Los resultados de la caracterización mostraron que parámetros como la DBO₅ (140,5 mg/L), DQO (281,5 mg/L), aceites y grasas (66,67 mg/L), coliformes fecales (3500 UFC/mL) y coliformes totales (5125 UFC/mL) superan los límites máximos permitidos por la normativa nacional. En respuesta a esta problemática, se diseñó un sistema de tratamiento con capacidad para 25 años y una población futura de 23672 habitantes. Este sistema incluye un tanque de homogenización como pretratamiento, un sistema de flotación por aire disuelto (D.A.F.) como tratamiento primario y un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) como tratamiento secundario, adecuado para grandes volúmenes de aguas residuales. Adicionalmente, por disposición de World Vision, se realizó el dimensionamiento de un tanque séptico, aplicable únicamente si se considera la población de la unidad educativa de Sicalpa. Esta alternativa permitiría retener y sedimentar sólidos antes del tratamiento principal. La implementación de este sistema mejorará significativamente la calidad del agua y garantizará el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes.

Palabras claves: Agua residual, tanque séptico, reactor UASB, parroquia de Sicalpa, tratamiento anaerobio, DBO₅, DQO

Abstract

This project has developed as “**WASTEWATER TREATMENT SYSTEM PROPOSAL FOR SICALPA PARISH, LOCATED IN COLTA CANTON, CHIMBORAZO PROVINCE**” with the support of GAD and the collaboration of the World Vision Foundation. The methodology used included applied research with field design, collection of primary and secondary information, technical visits and interviews with the parties involved. In addition, physicochemical and biological analyses of the wastewater were carried out to evaluate the levels of contamination and the treatment needs. The results of the characterization showed that parameters such as BOD₅ (140.5 mg/L), COD (281.5 mg/L), oils and fats (66.67 mg/L), fecal coliforms (3500 CFU/mL) and total coliforms (5125 CFU/mL) exceed the maximum limits allowed by national regulations. In response to this issue , a treatment system with a capacity for 25 years and a future population of 23,672 inhabitants was designed. This system includes a homogenization tank as pretreatment, a dissolved air flotation system (DAF) as primary treatment and an anaerobic upflow sludge blanket reactor (UASB) as secondary treatment, suitable for large scale of wastewater. Additionally, by World Vision's order, a septic tank was sized, applicable only if the population make the decision at Sicalpa educational unit. This alternative would allow retaining and sedimenting solids before the main treatment. The implementation of this system will significantly improve water quality in order to ensure compliance with current environmental regulations.

Keywords: Wastewater, septic tank, UASB reactor, Sicalpa parish, anaerobic treatment, BOD₅, COD



Reviewed by:
Mgs. Doris Valle V.
ENGLISH PROFESSOR
c.c 0602019697

Introducción

La presente investigación tiene como objetivo el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas para la parroquia de Sicalpa, ubicada en el cantón Colta, provincia de Chimborazo. La necesidad de implementar un sistema de tratamiento surge debido a la creciente contaminación del recurso hídrico, generada por las descargas sin tratamiento adecuado, lo que impacta negativamente en la calidad del agua y en la salud de la población.

La parroquia de Sicalpa no es ajena a esta realidad. En el proyecto de investigación titulado "Estudio de la conservación y uso sostenible de servicios ecosistémicos de los páramos de Llin Llin, Sicalpa y Columbe y su área de influencia", desarrollado por la Universidad Nacional de Chimborazo y la Fundación World Vision, se ha identificado que la falta de un tratamiento adecuado de las descargas está afectando negativamente a los recursos hídricos de la zona, provocando una contaminación constante. Por lo tanto, surge la necesidad de estudiar la generación de aguas residuales comunales y plantear su depuración.

El proyecto se desarrolla en el contexto de un manejo sostenible del recurso hídrico, alineado con las normativas nacionales e internacionales de protección ambiental. En este sentido, se busca implementar tecnologías eficientes y adaptadas a las condiciones locales, garantizando un sistema de tratamiento viable técnica y económicamente.

La metodología empleada incluye un análisis detallado de la calidad del agua residual mediante caracterización fisicoquímica y microbiológica, así como la evaluación de distintas alternativas tecnológicas para seleccionar la más adecuada. Entre las opciones consideradas, se destacan el reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) y el tanque séptico, los cuales han demostrado eficacia en la remoción de contaminantes y son adecuados para zonas con características similares a la de Sicalpa.

El diseño de la planta contempla un horizonte de proyección de 25 años, considerando el crecimiento poblacional y el aumento en la generación de aguas residuales. Además, se propone un sistema modular que permita futuras expansiones según las necesidades de la comunidad.

Los resultados esperados incluyen la mejora en la calidad del agua tratada, la reducción de la contaminación en cuerpos de agua receptores y el cumplimiento de los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental. Asimismo, se busca generar conciencia sobre la

importancia del tratamiento de aguas residuales y su impacto en la salud y el medio ambiente.

En los siguientes capítulos se abordarán el planteamiento del problema, el marco teórico, la metodología empleada, el diseño del sistema de tratamiento y el análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, se presentarán las conclusiones y recomendaciones que servirán de base para la implementación del sistema de tratamiento en la parroquia de Sicalpa.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del Problema

La escasez de agua potable y la gestión inadecuada de aguas residuales representan desafíos críticos a nivel global, especialmente en comunidades rurales de países de ingresos bajos y medianos. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), anualmente fallecen aproximadamente 1,4 millones de personas debido a la falta de acceso a servicios de agua, saneamiento e higiene adecuados, siendo 564000 de estas muertes causadas por enfermedades relacionadas con el saneamiento deficiente, como diarrea y diversas enfermedades tropicales desatendidas.

El acceso a fuentes de agua potable es cada vez más complejo, debido a la contaminación de las aguas superficiales por el descontrolado crecimiento de la población mundial y las actividades antropogénicas, que generan descargas (aguas residuales) que impactan los acuíferos alterando la calidad de los mismos (González-Ramírez et al., 2022; ONU-WWAP, 2020).

En Ecuador, la gestión de aguas residuales es un problema persistente en muchas comunidades rurales. En la parroquia de Sicalpa, Cantón Colta, estudios recientes, como el realizado en el marco del proyecto "Estudio de la conservación y uso sostenible de servicios ecosistémicos de los páramos de Llin Llin, Sicalpa y Columbe", han señalado que las fuentes de agua presentan niveles alarmantes de contaminación, incluyendo iones tóxicos como plomo, cadmio y nitratos, además de altos valores de DBO₅ (Cumbal & Ordoñez, 2023). Estas condiciones afectan la calidad del agua y representan riesgos para la salud pública y el ecosistema.

El vertimiento incontrolado de aguas residuales urbanas es una de las principales causas de esta contaminación. La ausencia de sistemas de tratamiento adecuados genera la acumulación de contaminantes como materia orgánica, nutrientes, metales pesados y microorganismos patógenos en los cuerpos de agua receptores, afectando no solo a los ecosistemas acuáticos, sino también a la disponibilidad de agua limpia para consumo humano, riego agrícola y otras actividades esenciales (Novikau & Lujaniene, 2022; WHO & UNICEF, 2021).

Es por ello, que resulta imperativo abordar esta problemática mediante el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas para la parroquia de Sicalpa. Esta solución no solo permitirá reducir la carga contaminante que ingresa a los recursos hídricos locales, sino también proteger la salud pública, mejorar la calidad de vida de la población y promover el desarrollo sostenible en la región.

La adopción de prácticas de gestión integrada del agua, que incluyan la conservación, el uso eficiente y la recuperación de recursos hídricos, contribuye a promover la sostenibilidad en el manejo de los recursos hídricos.

1.2 Justificación de la Investigación

El vertimiento no controlado de aguas residuales introduce una variedad de contaminantes en los cuerpos de agua, como materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados y microorganismos patógenos, lo que provoca procesos como la eutrofización, la disminución del oxígeno disuelto y la Alteraciones de las cadenas tróficas. Esto no solo afecta la biodiversidad acuática, sino que también compromete el acceso de las comunidades a agua limpia para el consumo humano y actividades agrícolas, intensificando los problemas de salud pública y la inseguridad alimentaria.

La gestión inadecuada de las aguas residuales urbanas representa un problema crítico en muchas comunidades rurales de Ecuador, incluidas aquellas en la parroquia de Sicalpa, Cantón Colta. Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2021).

El diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la parroquia de Sicalpa es una respuesta integral a una problemática ambiental, sanitaria y social urgente. Actualmente, la descarga incontrolada de aguas residuales es una de las principales amenazas para los ecosistemas acuáticos y la salud pública en esta comunidad. Los efectos de esta contaminación incluyen la eutrofización, la reducción del oxígeno disuelto en cuerpos de agua, la alteración de las cadenas tróficas y la proliferación de enfermedades transmitidas por el agua (OMS, 2022).

En términos ambientales, el proyecto busca prevenir la degradación de la laguna de Colta, un recurso hídrico vital para la región que está siendo impactado por las descargas contaminantes. Desde el punto de vista sanitario, la propuesta contribuirá a disminuir la incidencia de enfermedades relacionadas con el agua contaminada, mejorando así la calidad de vida de los habitantes de Sicalpa.

Además, este proyecto se alinea con la normativa ambiental nacional vigente (Ministerio del Ambiente y Agua, 2020), así como con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 6, que promueve el acceso universal a agua limpia y saneamiento (Naciones Unidas, 2015).

Desde una perspectiva técnica, el diseño de un sistema de tratamiento adaptado a las condiciones específicas de Sicalpa incorporará tecnologías sostenibles, permitiendo una gestión eficiente y económica de los recursos hídricos.

En conclusión, la presente investigación es fundamental para proponer una solución técnica y sostenible que aborde los problemas de contaminación y saneamiento en Sicalpa, contribuyendo al desarrollo integral de la parroquia y al bienestar de sus habitantes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Proponer un sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas en la parroquia de Sicalpa, cantón Colta, que garantice la eliminación efectiva de contaminantes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los principales puntos de descarga de aguas residuales en la parroquia de Sicalpa.
- Caracterizar las aguas residuales de la parroquia Sicalpa mediante parámetros físico, químicos y microbiológicos.
- Realizar el pre-diseño de una planta de tratamiento adecuada para depuración de las aguas residuales de la parroquia de Sicalpa.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1 Fundamentación Legal

La propuesta de diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas para la parroquia de Sicalpa, cantón Colta, se fundamenta en el marco legal ecuatoriano, que establece directrices y normativas para garantizar la gestión adecuada del recurso hídrico, la preservación ambiental y el acceso a servicios de saneamiento básico. A continuación, se describen los artículos más relevantes:

2.1.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)

- Artículo 12:
"El agua constituye un derecho humano fundamental e irrenunciable. El agua es patrimonio nacional estratégico de uso público, dominio inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida".
- Artículo 264:
"Los gobiernos municipales tendrán, entre otras, las siguientes competencias exclusivas: (...) 2. Prestar los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, tratamiento de aguas residuales y gestión de desechos sólidos."
- Artículo 317:
"El agua es patrimonio estratégico del Estado para uso público, y la preservación, conservación y restauración de los ecosistemas asociados al ciclo del agua serán prioritarios para garantizar su disponibilidad".

2.1.2 Código Orgánico del Ambiente (2017)

- Artículo 292:
"Las personas naturales o jurídicas que generan descargas de aguas residuales están obligadas a implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales que cumplan con los parámetros establecidos en la normativa técnica y que minimicen los impactos negativos sobre los cuerpos de agua receptores".

2.1.3 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua

- Artículo 56 (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014):

"Se prohíbe el vertido de aguas contaminadas a cuerpos hídricos, sin que estos hayan recibido un tratamiento previo que garantice el cumplimiento de las normas de calidad ambiental establecidas".

2.1.4 Normativas Técnicas

- Norma INEN 1108:

Establece los parámetros de calidad para las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua receptores, definiendo límites máximos de contaminantes permitidos (INEN, 2006).

- Norma INEN 2176:

Regula las especificaciones técnicas para el diseño y funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de garantizar su eficiencia y sostenibilidad (INEN, 2007).

2.1.5 Plan Nacional para el Buen Vivir

En concordancia con las políticas nacionales, el Plan Nacional para el Buen Vivir prioriza el acceso a servicios básicos, incluidos el saneamiento y el manejo adecuado de aguas residuales, como un componente esencial para mejorar la calidad de vida de la población y garantizar la sostenibilidad ambiental (SENPLADES, 2013).

El diseño de la planta de tratamiento para la parroquia de Sicalpa se alinea con este marco legal, asegurando el cumplimiento de los derechos fundamentales, la normativa ambiental y los estándares técnicos establecidos. Además, contribuye al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS), que promueve el acceso universal a agua potable y saneamiento básico, garantizando un entorno saludable para la población y la preservación de los recursos naturales.

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales son aquellas generadas por diversas actividades humanas, provenientes de fuentes domésticas, industriales, comerciales o pluviales. Estas aguas contienen un 99% de agua y un 1% de sólidos, que pueden ser inorgánicos u orgánicos. Además, contienen

microorganismos patógenos en concentraciones significativas. Si no se trata adecuadamente, las aguas residuales representan un riesgo importante tanto para la salud pública como para el medio ambiente, debido a sus impurezas físicas (Ronquillo, 2016).

2.2.1.1 Aguas Residuales Rurales

Las aguas residuales rurales se refieren a las aguas que provienen de actividades humanas en áreas rurales, tales como el uso doméstico, agrícola, y en algunos casos, pequeñas industrias. A diferencia de las aguas residuales urbanas, las rurales a menudo tienen características y desafíos diferentes debido a la menor densidad poblacional, la falta de infraestructura de tratamiento adecuada y la dependencia de prácticas de manejo no siempre eficientes (López, 2021).

2.2.2 Características de las Aguas Residuales

Las aguas residuales presentan características principales de tipo físico, químico y biológico, las cuales varían dependiendo de su origen, que puede ser doméstico, industrial o pluvial (Metcalf & Eddy, 2014). En áreas rurales, según López (2021), las aguas residuales provienen principalmente de fuentes domésticas, agrícolas y de pequeñas industrias, lo que añade una particular complejidad a su composición. Estas fuentes generan una combinación de características específicas que dependen de las actividades humanas predominantes en estas zonas, como el uso de fertilizantes, productos químicos en actividades agrícolas y los desechos domésticos e industriales.

Estas características particulares se pueden observar con mayor detalle en la Tabla 1, la cual sintetiza los principales componentes y contaminantes asociados con estos orígenes. La interacción entre las actividades rurales y las distintas características de las aguas residuales resalta la necesidad de enfoques específicos para su tratamiento y manejo.

Tabla 1. Características de las Aguas Residuales Rurales

| Doméstico | Agrícola | Pequeñas industrias y ganadería |
|--|--|--|
| Incluye aguas residuales de hogares que contienen materia orgánica biodegradable, grasas, detergentes, excrementos humanos y nutrientes. como nitrógeno y fósforo. Las aguas residuales domésticas suelen ser similares a las de las áreas urbanas, aunque en menor volumen. | En zonas rurales donde la agricultura es una actividad predominante, las aguas residuales pueden incluir contaminantes de los procesos agrícolas, tales como fertilizantes, pesticidas, sedimentos y residuos orgánicos. | Las actividades ganaderas y algunas industrias locales generan aguas residuales que pueden contener sustancias como grasas, aceites, productos químicos y materia orgánica. Las aguas residuales de mataderos, procesadoras de lácteos o fábricas pequeñas pueden ser un desafío si no se manejan adecuadamente. |

Fuente. (López, 2021)

2.2.2.1 Características Físicas

Incluyen el color, olor, temperatura y presencia de sólidos suspendidos o disueltos. Por lo general, las aguas residuales tienen un color grisáceo o marrón oscuro y un olor característico debido a la descomposición de materia orgánica. Su temperatura suele estar ligeramente por encima de la del agua potable (Metcalf & Eddy, 2014).

a) Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) en las aguas residuales es una medida de su capacidad para conducir corriente eléctrica, determinada por la concentración de iones disueltos en el agua. Este parámetro es esencial para evaluar la calidad del agua y su aptitud para ciertos tratamientos o usos posteriores. Los principales iones que contribuyen a la conductividad son los cloruros, sulfatos, carbonatos, nitratos, sodio, potasio, calcio y magnesio. En las aguas residuales, la conductividad tiende a ser más alta que en el agua potable debido a la mayor carga de contaminantes (Tchobanoglous et al., 2003).

b) Sólidos

La existencia de sólidos en el agua, como materia orgánica, arena, coloides y otros componentes, es un factor clave para analizar la eficiencia de las distintas etapas de tratamiento (Romero, 1999). Los sólidos en las aguas residuales representan una de las principales preocupaciones en su tratamiento y pueden clasificarse en varias categorías: sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables.

- **Sólidos Suspendidos:**

Son partículas que no se disuelven en el agua y permanecen en suspensión. Su cantidad se mide como sólidos suspendidos totales (SST) e incluye materiales orgánicos e inorgánicos. Los SST son un indicador clave de la contaminación y afectan directamente la eficiencia de los tratamientos primarios de sedimentación (Metcalf & Eddy, 2014).

- **Sólidos Totales Disueltos**

Estos sólidos incluyen sales, minerales y compuestos orgánicos solubles en agua, como cloruros, sulfatos y nutrientes como nitrógeno y fósforo. Los sólidos disueltos totales (SDT) son críticos en el control de salinidad en aguas tratadas para riego agrícola o reutilización industrial (Tchobanoglous et al., 2003).

- **Sólidos Sedimentables**

Este tipo de sólido se compone de partículas más pesadas que tienden a asentarse en el fondo bajo condiciones de calma, y su medición es fundamental en procesos como la sedimentación primaria. La eliminación eficiente de estos sólidos ayuda a reducir la carga contaminante en etapas posteriores del tratamiento (Spellman, 2017).

2.2.2.2 Características Químicas

Las aguas residuales contienen compuestos inorgánicos como carbonatos, sulfatos, cloruros, nitrógeno y fósforo, además de elementos potencialmente tóxicos como zinc, mercurio, cromo, cadmio y plomo. También incluyen compuestos orgánicos, como carbohidratos, grasas y proteínas. Estas sustancias afectan la calidad del agua y su tratamiento (Tchobanoglous et al., 2003).

a) pH

El pH es una escala numérica que mide la acidez o alcalinidad de una solución acuosa, calculada como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno. Las soluciones con pH inferior a 7 son ácidas, las superiores a 7 son alcalinas, y un pH de 7, como el del agua pura, es neutro. Aunque el pH generalmente oscila entre 0 y 14, puede exceder estos valores en ácidos y bases extremadamente fuertes, aunque medirlos con precisión es difícil. Su medición es crucial en diversas áreas científicas, como la biología, química, medicina, agricultura, ciencias ambientales y el tratamiento de aguas (Vázquez & Rojas, 2016).

b) Fosfatos

Los fosfatos en aguas residuales son compuestos químicos que contienen fósforo, un nutriente esencial que, en exceso, puede causar problemas ambientales graves. Estas sustancias, provenientes de detergentes, fertilizantes, desechos humanos, animales y actividades industriales, favorecen el crecimiento de algas y plantas acuáticas incluso en concentraciones mínimas de 0,01 mg/L, especialmente cuando otros nutrientes también están disponibles en exceso. Esto puede desencadenar eutrofización, un proceso que reduce la luz solar en capas inferiores del agua, disminuye la fotosíntesis y el oxígeno disuelto, afecta negativamente la vida acuática, genera malos olores, afecta la calidad estética del agua, obstruye sistemas de filtración y aumenta los requerimientos químicos en su tratamiento. Por ello, es crucial su control en sistemas de tratamiento de aguas (Glynn & Heinke, 2000).

c) Nitratos y Nitritos

Los nitratos y los nitritos son iones presentes en la naturaleza intercambiables entre ambos a través de un gran número de reacciones químicas y biológicas. Los nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3) se expresan, por lo general, en términos de nitrógeno oxidado total (NO_x). En las aguas superficiales y subterráneas, las concentraciones ascienden por lo general a unos cuantos mg/L. Los nitratos son reducidos a nitritos por la ausencia de oxígeno. Esta reacción puede llevarse a cabo de una manera parcial o completa (Glynn & Heinke, 2000).

d) Aceites y Grasas

Los aceites y las grasas son sustancias orgánicas lipofílicas (solubles en grasas), que incluyen tanto aceites vegetales como animales, y grasas saturadas o insaturadas. Se encuentran principalmente en las aguas residuales domésticas e industriales de sectores como la comida rápida, la fritura y la manufactura de productos lácteos y aceites. Estos contaminantes suelen formar capas superficiales en el agua, dificultando el tratamiento y reduciendo la eficiencia de los procesos de depuración (Metcalf & Eddy, 2014).

e) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es un indicador que mide la cantidad de oxígeno disuelto consumido por las bacterias aeróbicas que descomponen el material orgánico en una muestra de agua durante un período específico, generalmente 5 días a 20°C. Se expresa en miligramos de oxígeno consumidos por litro de muestra. Este parámetro se

utiliza comúnmente para evaluar el grado de contaminación orgánica del agua (Cabrera & Pulla, 2014).

Un valor elevado de DBO indica una alta cantidad de materia orgánica biodegradable en el agua, lo que puede disminuir los niveles de oxígeno disuelto en cuerpos acuáticos, afectando negativamente a los organismos que dependen de este oxígeno (Metcalf & Eddy, 2014).

f) Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se utiliza para medir la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica susceptible de ser descompuesta por un agente químico, generalmente el dicromato de potasio, debido a su capacidad para oxidar casi todos los compuestos orgánicos (excepto los ácidos grasos de bajo peso molecular) en un medio ácido y a altas temperaturas. Este parámetro es comúnmente empleado para evaluar la cantidad de materia orgánica en las aguas residuales tanto urbanas como industriales (Raffo & Ruiz, 2014).

2.2.2.3 Características Biológicas

Las aguas residuales contienen microorganismos, incluyendo bacterias, virus y protozoarios, algunos de los cuales pueden ser patógenos. La cantidad y tipo de microorganismos dependen del origen del agua y de su nivel de contaminación (Spellman, 2017).

a) Coliformes Fecales

Los coliformes fecales, también llamados coliformes termotolerantes debido a su capacidad para resistir temperaturas de hasta 45°C, forman un grupo pequeño de microorganismos que son usados como indicadores de contaminación fecal. La mayor parte de estos coliformes está representada por *Escherichia coli*, aunque también se pueden hallar en menor medida especies como *Citrobacter freundii* y *Klebsiella pneumoniae*, las cuales generalmente se asocian con la vegetación y rara vez se encuentran en el intestino. Estos microorganismos son transmitidos a través del tracto intestinal de humanos y animales (Mora & Calvo, 2010).

b) Coliformes Totales

El grupo coliforme se compone de bacterias gramnegativas en forma bacilar que son capaces de fermentar la lactosa a temperaturas de 35 a 37 °C, produciendo ácido y gas (CO₂) en un periodo de 24 a 48 horas. Estas bacterias son aerobias o anaerobias facultativas, no son productoras de esporas y tienen una actividad enzimática positiva para la β-galactosidasa. Aunque estos microorganismos suelen encontrarse en el intestino humano, también pueden

estar presentes en ambientes no intestinales como el suelo y el agua. Dentro de este grupo se incluyen especies como *Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Serratia*. La prueba más común para identificar este grupo es la hidrólisis de la lactosa (Carita, 2012).

2.2.3 Tratamiento de Aguas Residuales

El tratamiento de aguas residuales implica eliminar o reducir los contaminantes del agua antes de que se devuelva al ambiente o se utilice nuevamente. Su principal propósito es proteger la salud humana y el entorno, mejorando la calidad del agua al eliminar materiales orgánicos, nutrientes, sólidos suspendidos y patógenos. Este proceso se lleva a cabo en diversas fases, como el pretratamiento, tratamiento primario, secundario y, en algunos casos, terciario. Los métodos de tratamiento varían dependiendo de la naturaleza de los contaminantes y de los estándares exigidos para el vertido final (Ronquillo, 2016).

2.2.3.1 Pretratamiento

El pretratamiento es la fase inicial del proceso de tratamiento de aguas residuales, cuyo propósito es eliminar los sólidos grandes y materiales flotantes que pueden afectar el funcionamiento de los tratamientos posteriores. Utiliza técnicas como la criba, el desarenado y el desengrasado para remover objetos voluminosos, arena y grasa, protegiendo los equipos y optimizando los procesos posteriores. Esta etapa prepara las aguas residuales para los tratamientos primarios y secundarios, eliminando características que podrían dificultar el funcionamiento adecuado de las unidades de tratamiento (Comisión Nacional Del Agua, 2015).

En el pretratamiento se emplean diversas unidades de acuerdo con Metcalf y Eddy (2014) , que son:

a) Rejas y Desbaste:

- **Rejas Gruesas:** Eliminan sólidos grandes como ramas, trapos o plásticos. Las aberturas suelen ser de 20 a 50 mm.
- **Rejas Finas o Tamices:** Capturan sólidos más pequeños (2 a 10 mm), como papeles y plásticos finos.
- **Limpieza Manual o Automática:** Las rejas pueden limpiarse manualmente en plantas pequeñas o mediante sistemas automáticos en instalaciones más grandes.

b) Desarrolladores:

Separan arenas, gravas y partículas pesadas que podrían erosionar bombas y tuberías.

Tipos:

- **Desarenadores de flujo horizontal:** El agua fluye a velocidad controlada permitiendo que las partículas pesadas sedimenten.
- **Desarenadores de aireación:** Se insufla aire para ayudar a la separación de arenas y evitar la sedimentación de materia orgánica.
- **Desarenadores circulares o de flujo vertical:** Usan flujo rotacional o vertical para separar sólidos.

c) **Desengrasadores (Separadores de grasas y aceites):**

Elimine aceites, grasas y flotantes ligeros que pueden interferir con el tratamiento biológico. Se puede usar aireación para facilitar la flotación o sistemas mecánicos para remover los flotantes.

2.2.3.2 Tratamiento Primario

El tratamiento primario de aguas residuales es la etapa inicial en la que se eliminan los sólidos grandes y materiales flotantes mediante técnicas físicas como sedimentación y flotación. Los sólidos pesados se asientan en el fondo de los tanques, mientras que los más ligeros, como aceites y grasas, se separan en la superficie. Este tratamiento tiene como metas principales reducir la carga de los contaminantes, eliminar la mayoría de los sólidos sedimentables, disminuir la DBO, y asegurar que las aguas residuales sean aptas para los procesos de tratamiento que siguen (Sánchez & Román, 2020).

Los objetivos principales del tratamiento primario de aguas residuales incluyen:

- Disminuir la carga contaminante de las aguas residuales en un rango de 30% a 50%.
- Eliminar los sólidos sedimentables en un porcentaje que varía entre el 80% y el 90%.
- Reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en un 30% a 35%.
- Preparar las aguas residuales para que puedan ser tratadas de manera eficiente en las siguientes etapas del proceso de tratamiento.

2.2.3.3 Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario de aguas residuales es una fase esencial en el proceso de purificación, cuyo propósito principal es eliminar la materia orgánica biodegradable que queda tras el tratamiento primario. Este proceso se lleva a cabo mediante métodos

biológicos, donde microorganismos como bacterias y protozoos descomponen los contaminantes orgánicos en el agua residual. El tratamiento secundario puede ser aeróbico, que requiere oxígeno, o anaeróbico, que no lo necesita, según el tipo de microorganismos empleados y las condiciones del proceso (Metcalf & Eddy, 2014).

a) **Tratamiento Aeróbico**

Este proceso se basa en la necesidad de oxígeno para que los microorganismos aerobios, como bacterias y protozoos, puedan descomponer la materia orgánica en un entorno con alta oxigenación. El oxígeno disuelto es crucial para la respiración de estos microorganismos, que transforman la materia orgánica en dióxido de carbono, agua y biomasa. Un método comúnmente utilizado en el tratamiento aeróbico es el sistema de lodos activados, donde las aguas residuales se combinan con lodos que contienen estos microorganismos. Además de los lodos activados, se emplean filtros biológicos y reactores de lecho fijo (Tchobanoglous et al., 2003). Este tipo de tratamiento es muy eficaz para reducir significativamente la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y eliminar la materia orgánica biodegradable.

- **Lodos Activos:** Este proceso de tratamiento biológico aeróbico utiliza microorganismos suspendidos en el agua residual para degradar la materia orgánica. Estos microorganismos forman flóculos que permanecen en suspensión gracias a la aireación constante. El sistema es altamente efectivo en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la eliminación de contaminantes orgánicos. Posteriormente, los flóculos se separan en un clarificador, y parte del lodo es recirculado para mantener la actividad microbiana requerida (Metcalf & Eddy, 2014).
- **Filtros Biológicos:** Este sistema de tratamiento se basa en una superficie fija cubierta por microorganismos, donde la materia orgánica del agua residual es degradada a medida que fluye sobre ella. Los materiales más comunes utilizados como soporte son rocas, plásticos o cerámicas. Este método es eficiente y tiene un menor consumo energético en comparación con los sistemas de lodos activados (Tchobanoglous et al., 2003).
- **Reactores de Lecho Fijo:** Utilizan un soporte sólido estacionario donde los microorganismos forman biopelículas para descomponer la materia orgánica. Estos reactores pueden operar bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas, según las necesidades del tratamiento. Una de sus principales ventajas es su mayor estabilidad

operativa, ya que los microorganismos adheridos al soporte tienen menor riesgo de ser arrastrados fuera del sistema, a diferencia de los lodos activados (Metcalf & Eddy, 2014).

b) Tratamiento Anaeróbico

En estos procesos, la materia orgánica experimenta reacciones de fermentación, durante las cuales se transforma en energía liberada, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y carbono (C) (Rodríguez de Jorge, 2020).

En este proceso, los microorganismos descomponen la materia orgánica sin la presencia de oxígeno, utilizando compuestos alternativos como nitratos, sulfatos y dióxido de carbono como aceptores finales de electrones. El tratamiento anaeróbico resulta especialmente adecuado para aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica y es eficiente en la degradación de compuestos orgánicos complejos. Entre los sistemas utilizados destacan los tanques sépticos, los tanques IMHOFF y los reactores UASB (reactores de flujo ascendente de lecho fluidizado), donde bacterias metanogénicas llevan a cabo la descomposición de la materia orgánica. Este proceso genera biogás como subproducto, compuesto principalmente de metano, que puede ser aprovechado para la producción de energía (Metcalf & Eddy, 2014). Aunque consume menos energía que el tratamiento aeróbico, no es tan efectivo en la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

- **Tanque Séptico:** El Tanque Séptico es un sistema de tratamiento de aguas residuales que opera en condiciones anaeróbicas. Su función principal es separar y descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno, gracias a la actividad de microorganismos anaeróbicos. Durante este proceso, los sólidos sedimentados son transformados en gases como metano y dióxido de carbono. Este método es ampliamente utilizado en áreas rurales y zonas con baja densidad de población (Tchobanoglous et al., 2003).
- **Tanque Imhoff:** El tanque Imhoff funciona también como un sistema anaeróbico, combinando la sedimentación primaria con la digestión de los lodos en un diseño de dos cámaras. Los sólidos suspendidos en el agua se separan y se acumulan en el compartimiento inferior, donde bacterias anaeróbicas los descomponen, generando biogás como subproducto (Metcalf & Eddy, 2014).

- **Reactor UASB:** El reactor UASB (por sus siglas en inglés, Upflow Anaerobic Reactor) es un método anaeróbico avanzado, utilizado para tratar aguas residuales con alta carga orgánica. Este sistema emplea un manto de lodo que contiene microorganismos anaeróbicos, los cuales descomponen la materia orgánica y producen biogás, principalmente compuesto de metano. Es una tecnología eficiente para reducir la DBO y aprovechar el biogás generado como fuente de energía (Rodríguez de Jorge, 2020).

2.2.3.4 Tratamiento Terciario

En la etapa final del tratamiento de aguas residuales, conocida como tratamiento terciario, se implementan procesos avanzados para garantizar la eliminación de agentes patógenos, incluidos microorganismos como bacterias de origen fecal. Este paso es crucial para cumplir con los estándares de calidad más estrictos, permitiendo que el agua tratada pueda ser devuelta de manera segura a los cuerpos de agua naturales, como ríos, lagos, embalses, o incluso recargada en acuíferos subterráneos. Además, este tratamiento puede incluir la eliminación de contaminantes específicos como nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados y compuestos orgánicos persistentes, mejorando aún más la calidad del agua para su reutilización en actividades industriales, agrícolas o incluso potables en algunos casos (Rodríguez de Jorge, 2020).

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la Investigación

Esta investigación tuvo un enfoque de tipo mixto, integrando tanto métodos cuantitativos como cualitativos. La parte cuantitativa se enfocó en la recopilación, análisis e interpretación de datos sobre los niveles de contaminación del agua, mientras que la parte cualitativa incluyó la identificación de los diferentes puntos de descarga y la selección de alternativas de tratamiento.

3.2 Diseño de la Investigación

La investigación se llevó a cabo mediante un diseño experimental y de campo, con énfasis en la recolección de muestras y su análisis en laboratorio. Este enfoque permitió identificar las causas de la contaminación del agua y desarrollar soluciones a través de diseños experimentales. Además, se realizó una evaluación basada en criterios específicos para comparar los diferentes métodos de tratamiento seleccionados, con el objetivo de optimizar las descargas de agua y garantizar que cumplieran con los estándares y normativas nacionales e internacionales establecidos para su disposición final.

3.3 Técnicas de Recolección de Datos

3.3.1 Consulta de Documentos Institucionales

Se accedió a documentos proporcionados por diversas instituciones locales y no locales, entre las cuales se destacan el GAD Municipal de Colta, la Prefectura de Chimborazo y la Fundación World Vision. Estos documentos incluyeron información relevante sobre el ordenamiento territorial del cantón y estudios realizados por la Universidad Nacional de Chimborazo, que analizan las afectaciones en la microcuenca de Sicalpa. La mayoría de estos estudios fueron desarrollados en colaboración con la Fundación World Vision, lo que refuerza su enfoque interdisciplinario y la participación activa de organizaciones especializadas en los ámbitos locales.

3.3.2 Entrevista Semi-estructurada

Se realizaron entrevistas a líderes comunitarios con el apoyo de la Fundación World Visión, así como a concejales del GAD Municipal de Colta, con el objetivo de recopilar información sobre posibles puntos de descarga de aguas residuales. Estas entrevistas permitieron obtener

datos cualitativos valiosos, proporcionando una visión sobre la percepción y el conocimiento local respecto a los problemas relacionados con las aguas residuales. Este enfoque ayudó a contextualizar los desafíos específicos de la comunidad y a identificar áreas prioritarias para la intervención.

3.3.3 Observación Directa

Se realizaron diversas salidas de campo a la zona de estudio con el apoyo del GAD Municipal de Colta y la Fundación World Vision. Estas actividades permitieron llevar a cabo una observación directa para obtener datos en tiempo real y contextualizar las condiciones ambientales del área. Durante estas visitas, se identificaron posibles puntos de descarga de aguas residuales, particularmente en áreas con mayor densidad poblacional durante las horas de mayor actividad. Este enfoque permitió no solo ubicar puntos críticos, sino también comprender las dinámicas ambientales y sociales asociadas a los vertidos.

3.3.4 Uso de Tecnología Geoespacial

Utilizando tecnologías geoespaciales avanzadas, como Google Earth y el sistema GPS proporcionado por la Fundación World Vision, se facilitó una cobertura más amplia y detallada de la zona de estudio. Estas herramientas permitieron llevar a cabo una observación directa más precisa y eficaz, identificando posibles puntos de descarga de aguas residuales. Gracias a la visualización satelital y a la ubicación exacta proporcionada por el GPS, se pudo mapear con mayor claridad las áreas críticas, lo que optimiza la toma de decisiones para futuras intervenciones.

3.4 Caracterización de las Aguas Residuales de la Zona de Estudio

3.4.1 Toma de Muestras de Aguas Residuales de la Zona de Estudio

En el muestreo de aguas residuales es fundamental garantizar la integridad de la muestra desde su obtención hasta obtener el resultado de su análisis en laboratorio. Esto requiere documentar todo el proceso de manejo y custodia de la muestra, desde el momento en que se recolecta hasta su análisis y posterior disposición (APHA et al., 2019).

Para llevar a cabo el análisis fisicoquímico y microbiológico de la zona, se realizaron muestreos simples dos veces por semana durante un mes. Las muestras se recolectaron en el horario de mayor afluencia de personas en la unidad educativa, específicamente a las 10:30, coincidiendo con el receso, momento en el que los estudiantes aprovechaban para atender sus necesidades básicas.

Las muestras se transportaron en envases plásticos y de vidrio, colocados dentro de una hielera para garantizar la estabilidad de los datos durante el traslado. Una vez en la universidad, se llevaron a los laboratorios de Ingeniería Ambiental, donde se realizaron los análisis correspondientes.

El muestreo de las aguas residuales se efectuó siguiendo los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA et al., 2019). Los criterios aplicables para el manejo adecuado de las muestras según el parámetro requerido se pueden observar en la Tabla 2, los materiales y toma de muestras se pueden observar en el Anexo 2.

Tabla 2. Condiciones necesarias para la recolección de muestras.

| Parámetros | Cantidad mínima de muestra (mL) | Tiempo máximo de almacenamiento | Formas de conservación |
|-------------------|--|--|--|
| Turbidez | ---- | 24 horas | Análisis inmediato, guardar en oscuridad hasta 24 horas y refrigeración |
| pH | ---- | 2 horas/inmediato | Análisis inmediato |
| Conductividad | 500 | 28 días | Refrigeración |
| Aceites y Grasas | 1000 | 28 días | Agregar ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) hasta pH < 2 y refrigeración |
| Alcalinidad | 200 | 24 horas/14 días | Refrigeración |
| Sólidos | ---- | 7 días | Refrigeración |
| Dureza | 100 | 6 meses | Agregar ácido nítrico hasta pH < 2 |
| Fosfatos | 100 | 48 horas | Para fosfato disuelto filtración inmediata y refrigeración |
| Nitratos | 100 | 48 horas | Análisis inmediato o refrigeración |
| Nitritos | 100 | ----- | Análisis inmediato o refrigeración |
| Sulfatos | ---- | 28 días | Refrigeración |
| DBO | 1000 | 6 horas/48 horas | Refrigeración |
| DQO | 100 | 7 días/28 días | Análisis inmediato o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH < 2 y refrigeración |

Fuente. (APHA et al., 2019)

3.4.2 Caracterización de las Aguas Residuales

La caracterización de las aguas residuales se llevó a cabo mediante la medición de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, realizada en los laboratorios de Servicios Ambientales y Ciencias Químicas de la carrera de Ingeniería Ambiental. Para los ensayos, se emplearon: el manual de análisis de agua (Hach, 2000) y los métodos estándar para el análisis de aguas potables y residuales (APHA et al., 2019).

En el Anexo 3 se especifican los materiales y equipos utilizados para el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, mientras que en la Tabla 3 se reportan los parámetros evaluados y el método aplicado.

Tabla 3. Indicadores analizados en las aguas residuales.

| Análisis | Parámetros | Unidades | Norma | Método |
|----------------|--|----------------------|---|-----------------|
| Fisicoquímico | Aceites y grasas | mg/L | EPA 1664 (Extracción gravimétrica con n-hexano) | Gravimétrico |
| | Conductividad | μS/cm | EPA 120.1 (Medición con conductímetro calibrado) | Potenciométrico |
| | Demanda Bioquímica de oxígeno (5 días) | mg O ₂ /L | APHA 5210 (Ensayo de incubación de 5 días a 20 °C) | Respirometrico |
| | Demanda Química de oxígeno | mg/L | Estándar 5220-D-mood | Fotométrico |
| | Fosfatos | mg/L | Estándar 4500-N-E mod | Fotométrico |
| | Nitratos y Nitritos | mg/L | EPA 353.2 (Nitratos y nitritos mediante espectrofotometría) | Fotométrico |
| | Potencial de hidrógeno (pH) | ---- | EPA 150.1 (Medición directa con medidor de pH) | Potenciométrico |
| | Sólidos totales | mg/L | EPA 160.1 (Gravimetría para sólidos totales) | Gravimétrico |
| Microbiológico | Coliformes fecales y totales | (NMP/100mL) | Método del Número Más Probable (NMP) | Volumétrico |

Fuente. (Hach, 2000)

3.5 Elección y Pre-diseño del Sistema de Tratamiento

3.5.1 Selección del Sistema de Tratamiento

La selección de las unidades que conformaron el sistema de tratamiento de aguas residuales para la parroquia de Sicalpa se realizó con base en un análisis integral que incluyó múltiples factores. En primer lugar, se consideraron los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual. Este análisis permitió identificar los principales contaminantes presentes, como altos niveles de materia orgánica, aceites y

grasas, así como concentraciones significativas de coliformes fecales y totales, además, de una alta concentración de DQO y DBO. Estos parámetros evidencian que la contaminación proviene mayoritariamente de descargas domésticas, lo que determinó la necesidad de implementar un sistema capaz de abordar tanto la carga orgánica como la contaminación microbiológica.

Además, se tomaron en cuenta las recomendaciones proporcionadas por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de Colta, entidad que ha trabajado en conjunto con la comunidad para identificar los requerimientos específicos y las condiciones locales necesarias para la implementación del sistema. Estas consideraciones incluyeron aspectos como:

- a) **La Ubicación Estratégica:** La selección de un sitio accesible y adecuado para la instalación de las unidades de tratamiento, que permita no solo la recolección eficiente de las aguas residuales, sino también un impacto mínimo en el entorno natural y la población.
- b) **Viabilidad Técnica y Económica:** La capacidad del sistema de operar de manera eficiente bajo las condiciones económicas y técnicas disponibles en la parroquia, asegurando bajos costos de operación y mantenimiento.
- c) **Sostenibilidad a Largo Plazo:** La implementación de un sistema adaptable al crecimiento poblacional y al posible incremento en la generación de aguas residuales, garantizando su funcionalidad futura.
- d) **Protección Ambiental:** Asegurar que el sistema seleccionado cumpla con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental nacional (MAE, 2015), contribuyendo a la preservación de la microcuenca de Sicalpa y el río Chambo, los cuales son recursos hídricos fundamentales para la comunidad y su entorno ecológico.

Para el tratamiento de las aguas residuales de la parroquia de Sicalpa, se seleccionó un tanque de homogeneización como pretratamiento, con el objetivo de regular el caudal y la concentración de contaminantes. Como tratamiento primario, se implementó el Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.), debido a su alta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos, grasas y aceites, mejorando así las condiciones del agua para las etapas de tratamiento posteriores.

En cuanto al tratamiento secundario, se preseleccionaron cinco técnicas, a incluir tanto procesos anaerobios como aerobios, que fueron evaluadas para determinar la opción más adecuada según las características del efluente y los requisitos operativos, estas técnicas son:

- Reactor UASB
- Tanque Imhoff
- Pozo Séptico
- Lodos Activados
- Filtros Aerobios.

Para determinar la técnica más adecuada para el sistema de tratamiento de aguas residuales en la parroquia de Sicalpa, se utilizó el método de factores ponderados propuesto por Samaniego y Núñez (2022). Este enfoque de análisis semicuantitativo permite evaluar diferentes alternativas considerando diversos criterios operativos y económicos, los cuales son seleccionados de manera objetiva por el evaluador. La valoración se realiza aplicando una escala de ponderación subjetiva, que asigna un peso específico a cada factor. En la Tabla 4 se presenta la escala de puntuación empleada en el análisis.

Tabla 4. Escala de evaluación cuantitativa de criterios.

| Criterios | Escala de puntuación |
|------------------|-----------------------------|
| Muy bueno | 6 |
| Bueno | 3 |
| Regular | 0 |
| Inadecuado | -3 |
| Muy inadecuado | -6 |

Fuente. Autor

A continuación, se diseñó una matriz de ponderación que incorporó diversas variables clave para el análisis y la selección del sistema de tratamiento más adecuado, como las indicadas a continuación:

- a) Precio
- b) Eficiencia
- c) Mantenimiento
- d) Costo de instalación
- e) Espacio

- f) Tiempo de tratamiento
- g) Condiciones de operación
- h) Adaptabilidad al crecimiento poblacional

A cada una de estas variables se le asigna una ponderación subjetiva, con valores que oscilan entre 20 y 100, con el objetivo de reflejar su nivel de importancia relativa dentro del análisis. Posteriormente, se calculó el producto entre la puntuación asignada a cada tecnología, basada en la escala presentada en la Tabla 4, y la ponderación previamente establecida para cada variable. La sumatoria de estos productos fue realizada para cada alternativa tecnológica evaluada, lo que permitió establecer un orden de prioridad. Este orden se calcula en función de la puntuación total obtenida por cada técnica, donde un puntaje más alto representaba una mayor viabilidad y una condición más favorable.

3.5.2 Pre-diseño y dimensionamiento del sistema de tratamiento

Para el dimensionamiento de las unidades del sistema de tratamiento de aguas residuales de la parroquia de Sicalpa, se consultaron fuentes bibliográficas especializadas en el diseño de este tipo de sistemas. Para desarrollar esta etapa, es fundamental contar con información clave, como la población proyectada, la dotación de agua y el caudal de diseño, ya que estos datos son esenciales para planificar adecuadamente las unidades.

3.5.2.1 Población y Sobre Dimensionamiento Futuro

Esta etapa requiere conocer la población proyectada, la dotación de agua y el caudal de diseño, lo cual es fundamental para el adecuado dimensionamiento de los sistemas.

a) Población futura

Para conocer la población futura a la cual se proyectará los diseños, se empleó el modelo de crecimiento geométrico cuya expresión es la siguiente:

$$P_f = P_o(1 + r)^n \quad (1)$$

Donde:

P_f: Población proyectada

P_o: Población actual

r: Tasa de crecimiento poblacional

n : Número de años de proyección

La determinación de la población actual (P_0) se realizó utilizando los datos proporcionados por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de Colta, así como los resultados de los censos poblacionales llevados a cabo por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). Estos datos permitieron obtener una estimación precisa de la población en la parroquia de Sicalpa, tomando en cuenta tanto las proyecciones oficiales como las variaciones recientes en el crecimiento demográfico.

Para la determinar la tasa de crecimiento poblacional (r), se emplearon los datos comparativos sobre el crecimiento poblacional en la parroquia de Sicalpa según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (2010), reportados en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos de población y tasa de crecimiento anua

| Parroquia | Número de personas (años) | | | Tasa de Crecimiento anual | |
|-----------|---------------------------|-------|-------|---------------------------|-----------|
| | 2020 | 2022 | 2024 | 2020-2022 | 2022-2024 |
| Sicalpa | 16191 | 14392 | 14933 | -5,71% | 1,86% |

Fuente. (GAD Colta, 2019; INEC, 2021)

Entre 2020 y 2022, se observará una tasa de crecimiento negativo, lo que indica un decrecimiento en la población. Este descenso puede atribuirse a diversos factores, como la pobreza, la falta de oportunidades laborales, entre otros. Sin embargo, la principal causa de este fenómeno fue la pandemia provocada por el COVID-19, que generó un impacto social y económico significativo. A pesar de esta caída, en 2024 se registró un leve aumento en la población, lo que podría deberse al fin de la pandemia, al recuento de las oportunidades laborales, o incluso al retorno de migrantes que habían dejado la parroquia, quienes regresaron junto con sus familias.

b) Estrategias de Sobredimensionamiento

Según Metcalf y Eddy (2014), las estrategias más efectivas para garantizar un sobredimensionamiento adecuado en una planta de tratamiento son las siguientes:

- **Incremento del caudal de diseño:**

Se recomienda aumentar el caudal de diseño en un rango del 20% al 30% respecto al caudal promedio real estimado. Este margen no solo cubrirá el crecimiento de la población estudiantil, sino también las posibles variaciones en la calidad y cantidad de las aguas residuales generadas por factores externos.

- **Horizonte de diseño:**

Se sugiere considerar un horizonte de diseño de 20 a 25 años. Este período permite una planificación a mediano y largo plazo, considerando tanto los posibles cambios en la dinámica de la parroquia de Sicalpa como en las políticas y regulación.

- **Diseño modular:**

Diseñar la planta de tratamiento con un enfoque modular que permita ampliaciones futuras de manera sencilla y eficiente. Este enfoque es ideal para optimizar los costos iniciales y adaptarse gradualmente a la creciente demanda de tratamiento.

- **Factores de seguridad y cargas máximas:**

Incorporar factores de seguridad en el diseño para manejar caudales máximos diarios y horarios, así como variaciones en la carga orgánica, expresadas en términos de DBO y DQO. Esto asegura que la planta pueda operar adecuadamente.

- **Reserva de espacio:**

Garantizar que el terreno destinado a la planta permitirá futuras ampliaciones sin necesidad de adquirir áreas adicionales, lo que reduce costos a largo plazo y facilita la gestión operativa.

- **Consideración de descargas complementarias:**

Evaluar si existen otras fuentes de aguas residuales en las cercanías que puedan ser tratadas conjuntamente. Esto maximizaría la eficiencia del sistema y reduciría el impacto ambiental en el entorno al centralizar el tratamiento en una única planta. Además, tratar las descargas de manera conjunta podría optimizar los recursos disponibles, disminuir los costos operativos y garantizar un mejor control de los contaminantes que se vierten al medio ambiente. Esta estrategia es especialmente útil en comunidades rurales o áreas con múltiples puntos de generación de aguas residuales que no justifican la construcción de plantas individuales para cada fuente (Metcalf y Eddy 2014).

De acuerdo con las estrategias mencionadas previamente, se realizó un sobredimensionamiento basado en un incremento de la población para 25 años. Este ajuste se implementó con el objetivo de atender las necesidades futuras de la planta, garantizando su capacidad para manejar posibles aumentos en la generación de aguas.

3.5.2.2 Dotación de Agua

Es fundamental conocer el caudal promedio de agua potable consumido diariamente por cada habitante, ya que este dato es clave para dimensionar de manera adecuada las unidades del sistema de tratamiento de aguas residuales. Este parámetro permite estimar el caudal promedio de generación de aguas residuales garantizando que las instalaciones puedan gestionar eficientemente la carga máxima prevista, evitando desbordamientos o insuficiencias.

Para determinar la dotación de agua, se toma en cuenta factores como el número de habitantes de la población proyectada y las condiciones climáticas específicas de la región. Estos datos, detallados en la Tabla 6, permitieron establecer una dotación de diseño de 150 litros por habitante al día (L/hab/día).

Tabla 6. Dotaciones de agua para estudio y diseño de sistemas de aguas residuales

| Habitantes | Clima | Dotación media futura (L/hab/día) |
|--------------|----------|-----------------------------------|
| Hasta 5000 | Frío | 120-150 |
| | Templado | 130-160 |
| | Cálido | 170-200 |
| 5000 a 50000 | Frío | 180-200 |
| | Templado | 190-220 |
| | Cálido | 200-230 |
| Más de 50000 | Frío | >200 |
| | Templado | >220 |
| | Cálido | >230 |

Fuente. Instituto Ecuatoriano de Normalización (2003).

Además, la dotación considera no solo el consumo doméstico, sino también otros factores que influyen en el uso del agua, como actividades agrícolas menores, pequeñas industrias o incluso pérdidas en la red de distribución. Este enfoque integral permite que el sistema esté preparado para adaptarse a variaciones en la demanda, ya sea por cambios climáticos estacionales o por el crecimiento futuro de la población.

3.5.2.3 Caudal de Diseño

El caudal teórico diario de aguas residuales urbanas de origen doméstico se calcula utilizando la siguiente ecuación. Este valor será empleado para determinar los parámetros operativos del tanque Séptico y del reactor UASB.

$$Qp = \frac{P \times Dotación \times \% contribución}{1000} \quad (2)$$

Donde:

P: Población

Dotación: se verifica en la Tabla 6 de acuerdo con el número de habitantes

% contribución: 6%

3.5.2.4 Dimensionamiento del Tanque de Homogenización

El Tanque de Homogeneización es una unidad fundamental en el tratamiento de aguas residuales que tiene la función de mezclar y equilibrar el caudal y la concentración de contaminantes en el agua antes de su tratamiento posterior. Este proceso permite reducir fluctuaciones en la carga orgánica y otros parámetros, mejorando la eficiencia de las etapas siguientes (Metcalf & Eddy, 2014).

El tanque de homogeneización evita picos de contaminación, asegurando una distribución uniforme del agua residual. Su diseño depende del caudal de entrada, la variabilidad de los contaminantes y el tipo de sistema de tratamiento en el que se integra (Metcalf & Eddy, 2014).

Gracias a su capacidad para estabilizar el agua residual, este sistema es clave en plantas de tratamiento industriales y municipales, optimizando la eficiencia de procesos como la clarificación, la digestión biológica y la filtración.

El cálculo del tanque de homogenización se desarrolló siguiendo la metodología propuesta por Romero (1999). Los parámetros de diseño se presentan en la Tabla 7, mientras que las ecuaciones utilizadas para el cálculo de esta unidad de tratamiento se encuentran detalladas en el Anexo 5.

Tabla 7. Parámetros de diseño para el dimensionamiento del Tanque de Homogenización.

| Parámetro | Nomenclatura | Unidad |
|--------------------------|--------------|-----------------|
| Caudal | Q | $\frac{m^3}{h}$ |
| Área del tanque | A | m ² |
| Diámetro del tanque | Φ | m |
| Radio del tanque | r | m |
| Volumen del tanque | V | m ³ |
| Diámetro del impulsor | di | m |
| Ancho de las paletas | q | m |
| Longitud de las paletas | L | m |
| Número de deflectores | W | |
| Ancho de los deflectores | Wb | m |

Fuente. (Romero, 1999)

3.5.2.5 Dimensionamiento del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)

El Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.) es una tecnología de tratamiento de aguas residuales que utiliza el principio de flotación para eliminar sólidos suspendidos, aceites, grasas y otros contaminantes del agua. Este proceso es eficiente, rápido y muy efectivo para separar partículas finas que no pueden ser eliminadas fácilmente con otros métodos de tratamiento, como sedimentación o filtración (Metcalf & Eddy, 2014).

El cálculo del Sistema de flotación por aire disuelto (D.A.F.) se desarrolló siguiendo la metodología propuesta por Romero (1999). Los parámetros de diseño se presentan en la Tabla 8, mientras que las ecuaciones utilizadas para el cálculo de esta unidad de tratamiento se encuentran detalladas en el Anexo 5.

Para calcular la remoción de contaminantes en el Sistema de Flotación por Aire Disuelto, se considerarán los rendimientos sugeridos por Romero (1999). En la Tabla 9 se presentan los parámetros, los rendimientos recomendados y el porcentaje específico seleccionado para llevar a cabo la evaluación del proceso.

Tabla 8. Parámetros de diseño para el dimensionamiento del Sistema de flotación por aire disuelto (D.A.F.)

| Parámetro | Nomenclatura | Unidad |
|--|---------------------|----------------------------|
| Caudal recirculado presurizado | Q_R | $\frac{L}{S}$ |
| Solubilidad del aire | C_T | $\frac{mL\ aire}{L\ agua}$ |
| Cantidad de aire liberado | $C_T - C_L$ | $\frac{mL\ aire}{L\ agua}$ |
| Relación aire/sólidos | $\frac{A}{S}$ | |
| Cantidad de lodo producido | m_{lodos} | $\frac{kg}{h}$ |
| Área superficial del tanque de flotación | A_S | m^2 |
| Volumen del tanque de flotación | V_{prisma} | m^3 |
| Ancho del tanque de flotación | A_{prisma} | m |
| Largo del tanque de flotación | L_{prisma} | m |
| Altura tanque de flotación | H_{prisma} | m |
| Volumen del tanque de flotación | $V_{pirámide}$ | m^3 |
| Altura tanque de flotación | $H_{pirámide}$ | m |
| Volumen total del tanque de flotación | V_{flot} | m^3 |
| Volumen tanque de presurización | V_{pres} | m^3 |
| Altura tanque de presurización | h | m |
| Diámetro tanque de presurización | \emptyset_{pres} | m |

Fuente. (Romero, 1999)

Tabla 9. Rendimientos y porcentaje de remoción en el Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.).

| Parámetro | % Remoción | % Seleccionado |
|------------------|-------------------|-----------------------|
| Aceites y grasas | 60-95 | 70 |
| DQO | 10-25 | 15 |
| DBO ₅ | 10-50 | 20 |

Fuente. Autor

3.5.2.6 Dimensionamiento del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)

El Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) es una tecnología utilizada en el tratamiento biológico de aguas residuales. En este proceso, el agua entra al reactor desde la parte superior y fluye hacia el fondo a través de un sistema de tuberías. A medida que el afluente asciende, pasa a través de un manto de lodos, donde se lleva a cabo la degradación de materia orgánica por parte de microorganismos anaerobios. Durante este proceso, se genera biogás, compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, lo que provoca una circulación.

El biogás, el lodo y el líquido tratado ascienden juntos hacia la parte superior del reactor. En este punto, los deflectores facilitan la separación del biogás, permitiendo que se capture en una campana de recolección de gases, ubicada en la parte superior del reactor. El lodo se deposita en la parte inferior, mientras que el efluente (líquido tratado) es expulsado por la parte superior (Comisión Nacional Del Agua, 2015).

Para el diseño del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB), se siguió la metodología establecida por la Comisión Nacional del Agua (2015). En la Tabla 10 se pueden visualizar los principales parámetros de diseño de esta unidad, por otro lado, en el Anexo 5 se pueden observar las ecuaciones que se utilizaron para el cálculo de esta unidad de tratamiento.

Para estimar la eliminación de contaminantes en el sistema UASB, se consideraron los rendimientos sugeridos por la Comisión Nacional del Agua (2015). En la Tabla 11 se presentan los tres (3) parámetros clave seleccionados para la evaluación del proceso de remoción de contaminantes en este sistema, con los rendimientos teóricos recomendados y el porcentaje específico seleccionado para evaluar el rendimiento del tratamiento dimensionado.

Tabla 10. Parámetros de diseño para el dimensionamiento del Reactor UASB

| Parámetro | Nomenclatura | Unidad |
|---|--------------|---------------------------|
| Gasto afluente promedio | Q_{ip} | $\frac{m^3}{d}$ |
| Carga de DQO en el afluente | L_0 | $\frac{kg}{d}$ |
| Tiempo de retención hidráulica | TRH | h |
| Volumen del reactor | V_U | m^3 |
| Altura del reactor | H | m |
| Área del reactor | A | m^2 |
| Largo del reactor | L | m |
| Carga hidráulica volumétrica | CHV | $\frac{m^3}{m^3 \cdot d}$ |
| Carga orgánica volumétrica | COV | $\frac{kg}{m^3 \cdot d}$ |
| Velocidad de flujo ascendente para Q_{ip} | v | $\frac{m^3}{h}$ |
| Velocidad de flujo ascendente para Q_{max-h} | v | $\frac{m^3}{h}$ |
| Número de tubos de distribución del agua residual | Nd | |
| Eficiencia de remoción de la DQO, estimada | E_{DQO} | % |
| Eficiencia de remoción de la DBO, estimada | E_{DBO} | % |
| Producción estimada de metano | Q_{CH_4} | $\frac{m^3}{d}$ |
| Producción estimada de biogás (considerando un contenido de metano de 75% en el biogás) | Q_g | $\frac{m^3}{d}$ |
| Número de colectores de gas | | |
| Aberturas del sedimentador | | |
| Compartimentos del sedimentador | | |
| Producción del lodo | P_L | $\frac{kg}{d}$ |
| Volumen de lodo | V_L | $\frac{m^3}{d}$ |
| Altura de la campana | h_C | m |
| Distancia horizontal de un lado de la campana | x | m |
| Ancho real de la campana | z | m |
| Número de campanas | N_C | |
| Separación entre campanas | | m |
| Diseño del canal de salida (dos canales), Ancho | B_e | m |
| Diseño del canal de salida, (dos canales), Profundidad | h | m |

Fuente. (Comisión Nacional Del Agua, 2015)

Tabla 11. Parámetros de diseño para el dimensionamiento del Reactor UASB

| Parámetro | % Remoción | % Seleccionado |
|---------------------|-------------------|-----------------------|
| DQO | 65-80 | 67 |
| DBO | 60-80 | 76 |
| Nitratos + Nitritos | 10-25 | 20 |

Fuente. Autor

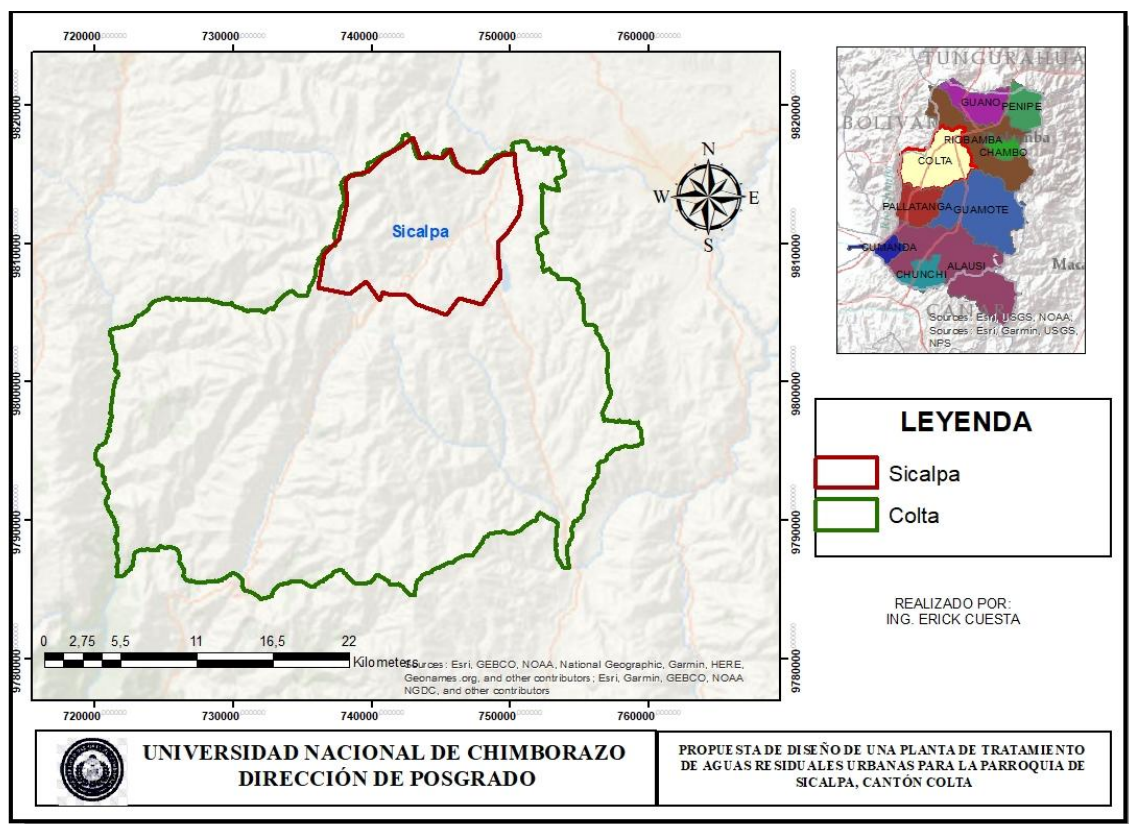
Capítulo 4

Análisis y Discusión de los Resultados

4.1 Ubicación

Como se observa en la Figura 1, Sicalpa es una parroquia situada en el cantón Colta, al noroeste de la provincia de Chimborazo, Ecuador. Está ubicada a los pies del cerro Cushca, en una región caracterizada por su riqueza histórica y cultural, siendo parte del valle del antiguo Liribamba. Se encuentra a una altitud de 3180 metros sobre el nivel del mar, lo que le confiere un clima frío de montaña (GAD Colta, 2019).

Figura 1. Ubicación de la parroquia de Sicalpa



Fuente. Autor

Este sector rural tiene una gran relevancia arqueológica y cultural debido a su cercanía con ruinas prehispánicas y su influencia en la historia de la región. Sicalpa Viejo es conocida por su tradición agrícola y ganadera, actividades que sustentan la economía local, además de su contribución al turismo rural gracias a su patrimonio natural y paisajístico (GAD Colta, 2019).

4.2 Punto de Descarga

Durante la entrevista realizada a los ingenieros del GAD de Colta en colaboración con World Vision, como se detalla en el Anexo 1, se analizaron diversos aspectos clave, entre ellos la identificación de la ubicación óptima para la toma de muestras de agua y la determinación del principal punto de descarga de aguas residuales en la parroquia de Sicalpa.

Inicialmente, se consideró la Unidad Educativa de Sicalpa como el sitio más adecuado debido a su población aproximada de 300 estudiantes, quienes permanecen allí durante gran parte del día, generando una concentración significativa de efluentes. Sin embargo, tras un análisis más detallado, se concluyó que la descarga de aguas residuales no proviene únicamente de la institución educativa, sino de toda la parroquia de Sicalpa.

Este hallazgo se debe a que la mayoría de los habitantes de la zona desarrollan actividades agrícolas y ganaderas, pasando gran parte del día fuera de sus hogares, lo que distribuye la generación de efluentes a nivel parroquial. Por ello, el estudio se amplió para abarcar la totalidad de la parroquia, permitiendo así un enfoque más integral en la identificación y tratamiento de las aguas residuales.

Por otro lado, al tratarse de una zona predominantemente agrícola, no existe un registro formal ni una planificación clara sobre la ubicación de las tuberías de descarga, lo que complica la identificación de puntos específicos de vertido y el monitoreo de los efluentes.

4.3 Punto de Muestreo

El punto de muestreo fue seleccionado dentro de la Unidad Educativa de Sicalpa debido a que este lugar cuenta con un punto de control adecuado para la toma de muestras de aguas residuales. Este sitio fue priorizado en coordinación con el GAD de Colta, ya que es considerado estratégico para el desarrollo de una propuesta conjunta con World Vision y la Universidad Nacional de Chimborazo, enfocada en la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales. En contraste, en los alrededores de la zona no existe infraestructura de alcantarillado que facilite una recolección eficiente de muestras. Durante un recorrido preliminar por la zona, se intentó identificar posibles puntos de descarga, pero debido a la geografía montañosa y la densa vegetación, no se observaron sistemas de tuberías visibles.

Figura 2. Área de descargas a estudiar

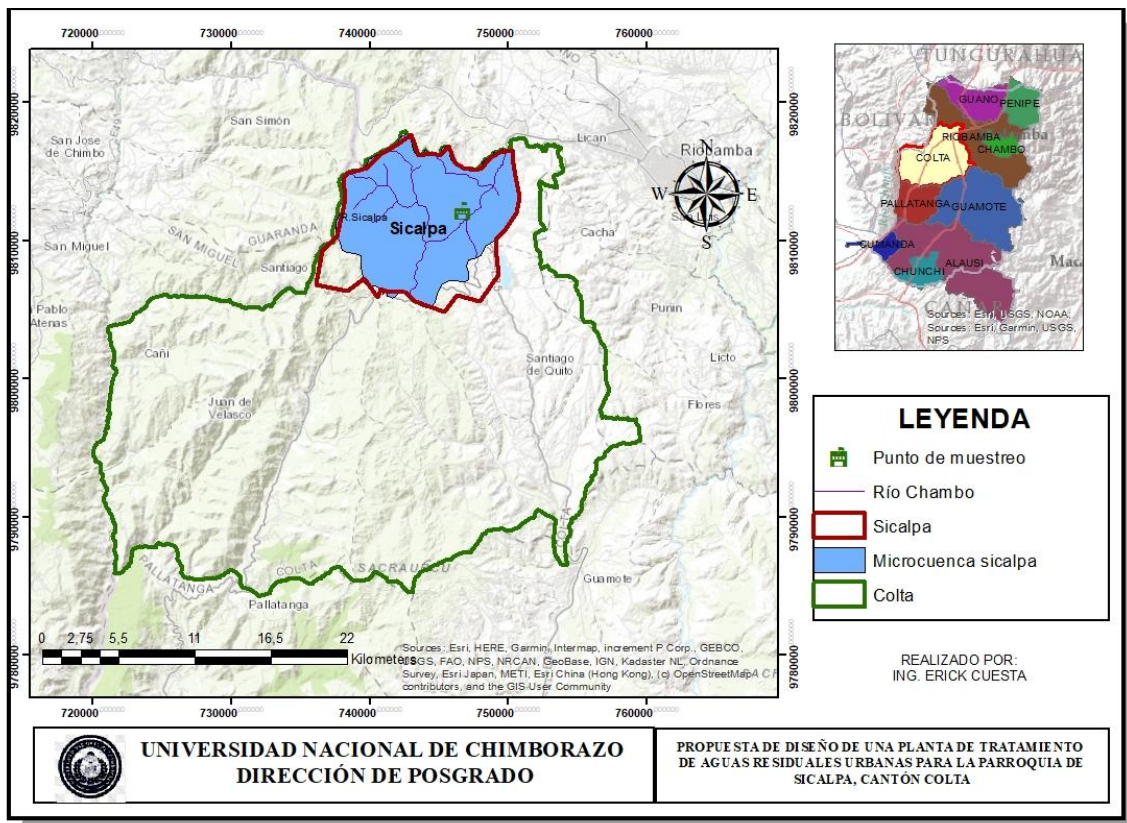


Fuente. Autor

Para determinar la ubicación más adecuada, se establecieron criterios específicos como: disponibilidad de tuberías para la toma de muestras, una zona apta para la construcción de la planta de tratamiento y la generación suficiente de aguas residuales que sirviera como base para ampliar el sistema a otros puntos dentro de la comunidad. Tras una reunión con el GAD de Colta, se determinó que el punto de mayor interés para Sicalpa era la Unidad Educativa, ya que cumplía con estos criterios y representaba un lugar estratégico para el proyecto.

Adicionalmente, con el uso del software de sistemas de información geográfica (SIG) ArcGIS, se elaboró un mapa detallado del área circundante al punto de muestreo. Este análisis reveló que la ubicación seleccionada se encuentra en una zona ambientalmente sensible, situada sobre la microcuenca de Sicalpa y muy próxima al río Chambo, como se ilustra en la Figura 3. Esta proximidad resalta la importancia de implementar medidas de control y tratamiento de las aguas residuales, ya que cualquier vertimiento inadecuado podría generar impactos negativos en el ecosistema local. La selección de este punto no solo garantiza un enfoque técnico adecuado, sino que también responde a la necesidad de proteger los recursos hídricos de la comunidad y avanzar en el desarrollo sostenible de la zona.

Figura 3. Punto de muestreo



Fuente. Autor

4.4 Caracterización de las Aguas Residuales

La Tabla 12 muestra los resultados obtenidos del análisis de las aguas residuales de la parroquia de Sicalpa. Los datos reportados corresponden a los promedios de las mediciones realizadas durante el período de muestreo, el cual se llevó a cabo dos veces por semana durante un mes estos valores se pueden observar en el Anexo 4. Además, los resultados de los parámetros fueron comparados con los límites máximos permisibles establecidos para descargas en cuerpos de agua dulce, así como con los Límites de descarga al sistema de alcantarillado público especificados en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (MAE, 2015).

Además, el análisis permitió identificar el nivel de cumplimiento de las aguas residuales con respecto a las normativas ambientales vigentes, evaluando parámetros como la calidad del agua y su impacto potencial en el entorno. Esto resulta crucial para implementar medidas correctivas, garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y minimizar los riesgos asociados a la contaminación por descargas.

Tabla 12. Caracterización de las aguas residuales de la parroquia de Sicalpa

| Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos | Valor medido | Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce. Acuerdo 097-A | Límites de descarga al sistema de alcantarillado Público. Acuerdo 097-A |
|---|---------------------|---|--|
| Potencial de hidrógeno | 8,36 | 6-9 | 6-9 |
| Conductividad ($\mu\text{S/cm}$) | 1,02 | - | - |
| Sólidos Totales (mg/L) | 1018,75 | 1600 | 1600 |
| Fosfatos (mg/L) | 4,50 | - | - |
| Nitratos (mg/L) | 8,13 | 10 | - |
| Nitritos (mg/L) | 0,13 | 10 | - |
| Aceites y grasas (mg/L) | 66,79 | 30 | 70 |
| Coliformes fecales (UFC/mL) | 3500 | 20 | - |
| Coliformes totales (UFC/mL) | 5125 | - | - |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) (mg/L) | 140,5 | 100 | 250 |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L) | 281,5 | 250 | 500 |

Fuente. Autor

Como se observa en la Tabla 12, varios parámetros de calidad del agua, incluidos aceites y grasas, coliformes fecales, coliformes totales, así como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), exceden los límites máximos permisibles establecidos en el acuerdo ministerial 097-A sobre las descargas en cuerpos de agua dulce según el Ministerio del Ambiente en Ecuador (MAE, 2015). Estos resultados reflejan un grave nivel de contaminación en las aguas residuales analizadas, lo que evidencia un manejo inadecuado de los desechos líquidos en la zona.

La presencia elevada de aceites y grasas sugiere un impacto significativo de actividades domésticas, principalmente relacionadas con el vertido de grasas de cocina y productos oleosos que no son tratados adecuadamente antes de su disposición final. Por otro lado, los altos niveles de coliformes fecales y totales indican contaminación microbiológica, asociada principalmente a residuos fecales humanos y animales, que representan un riesgo importante para la salud pública y los ecosistemas locales.

Asimismo, los valores elevados de DBO y DQO reflejan una alta carga de materia orgánica en el agua, resultado del vertimiento de detergentes, restos de alimentos, materia fecal y otros residuos biodegradables. Estos parámetros no solo indican el nivel de contaminación

orgánica, sino que también revelan un ambiente favorable para la proliferación de microorganismos, incluidos patógenos que pueden afectar la calidad del agua natural y la biodiversidad en la zona.

En términos ambientales, este nivel de contaminación tiene serias implicaciones, ya que el agua que excede los límites establecidos por la normativa puede afectar negativamente la calidad de los cuerpos de agua receptores, como ríos y microcuencas, comprometiendo su capacidad para sostener la vida acuática y su uso en actividades humanas. Por lo tanto, estos resultados subrayan la urgente necesidad de implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales eficientes, campañas de concienciación ambiental para las comunidades locales y mecanismos de monitoreo continuo que garanticen el cumplimiento de los estándares ambientales establecidos.

4.5 Elección del Sistema de Tratamiento

El diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales debe considerar la variabilidad en el caudal y la composición de los efluentes para garantizar un proceso eficiente. En este caso, se incluyó un Tanque Homogeneizador como pretratamiento y un Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.) como una etapa clave en la remoción de contaminantes y un sistema de tratamiento biológico anaeróbico. A continuación, se explican sus funciones y beneficios dentro del sistema de tratamiento:

a) Tanque Homogeneizador como Pretratamiento

El tanque homogeneizador se implementó en el sistema con los siguientes propósitos:

Regular el caudal y composición del efluente:

- Las aguas residuales pueden presentar variaciones en su carga contaminante y caudal a lo largo del día.
- El tanque permite mezclar el agua residual de diferentes fuentes, evitando picos de carga contaminante que podrían afectar las unidades posteriores del tratamiento.

Mejorar la eficiencia de los procesos posteriores:

- Mantener una concentración uniforme de contaminantes facilita la operación eficiente del D.A.F. y otras etapas de tratamiento.

Evitar sedimentación prematura o flotación incontrolada:

- Al mantener el efluente en constante movimiento, se evita la acumulación de sólidos en el fondo o la flotación no deseada de grasas y aceites antes de su tratamiento adecuado.

b) Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)

Después del tanque homogeneizador, el D.A.F. se incorporó como un tratamiento primario o secundario para la separación eficiente de sólidos, grasas y aceites. Su elección se debe a los siguientes factores:

Alta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos y grasas:

- El D.A.F. utiliza microburbujas de aire para adherirse a partículas en el agua, facilitando su flotación y posterior remoción.
- Es especialmente eficaz en aguas con altas concentraciones de aceites, grasas y materia orgánica suspendida, lo que lo hace ideal para este sistema.

Mejor desempeño en comparación con la sedimentación convencional:

- Mientras que un sedimentador convencional depende de la gravedad, el D.A.F. acelera la separación mediante flotación asistida por aire.
- Esto permite remover partículas de menor densidad que no sedimentarían fácilmente.

Reducción de carga para las siguientes etapas del tratamiento:

- Al eliminar una gran cantidad de sólidos y materia orgánica, se reduce la carga sobre los tratamientos biológicos o fisicoquímicos posteriores.
- Esto mejora la eficiencia del tratamiento y reduce costos operacionales.

En la Tabla 13 se presenta el análisis correspondiente a la aplicación del método de factores ponderados para seleccionar el sistema de tratamiento, considerando los siguientes sistemas secundarios de tratamiento:

- Reactor UASB
- Tanque Imhoff.
- Pozo Séptico.
- Lodos Activados.
- Filtros Aerobios

Tabla 13. Valoración cuantitativa de criterios por método de factores ponderados

| Factor | Peso | Reactor UASB | | Pozo Séptico | | Tanque Imhoff | | Lodos Activos | | Filtros Aerobios | |
|--|------|--------------|------|--------------|------|---------------|-----|---------------|------|------------------|------|
| | | E | P | E | P | E | P | E | P | E | P |
| Precio | 100 | 6 | 600 | 3 | 300 | 3 | 300 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Eficiencia | 100 | 3 | 300 | 3 | 300 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 300 |
| Mantenimiento | 90 | 3 | 270 | 0 | 0 | 3 | 270 | 0 | 0 | -3 | -270 |
| Costo de instalación | 85 | 6 | 510 | 3 | 255 | 3 | 255 | -3 | -255 | 0 | 0 |
| Espacio | 85 | 3 | 255 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tiempo de tratamiento | 70 | 0 | 0 | 3 | 210 | 0 | 0 | 3 | 210 | 0 | 0 |
| Condiciones de operación | 50 | 3 | 150 | 3 | 150 | 3 | 150 | 3 | 150 | 0 | 0 |
| Adaptabilidad al crecimiento poblacional | 50 | 0 | 0 | 3 | 150 | 0 | 0 | 3 | 150 | 3 | 150 |
| Total (Σ) | | | 2085 | | 1365 | | 975 | | 255 | | 180 |
| Orden de prioridad | | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 |

Fuente. Autor

La Tabla 13 muestra los resultados del análisis exhaustivo realizado mediante el método de factores ponderados para la selección del sistema de tratamiento secundario más adecuado. Tras evaluar cuidadosamente las variables asociadas a cada tecnología, se determina que el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) se destacó por precio y costo de instalación y por la demanda de aguas residuales. El análisis también identificó al Tanque Séptico como una opción más viable en el caso de un presupuesto reducido por las entidades asociadas al proyecto.

Ambas tecnologías presentan características complementarias y podrían ser implementadas en función de las necesidades específicas de la comunidad y las condiciones locales, como la disponibilidad de espacio, los recursos económicos y la infraestructura existente. Por ejemplo, el Tanque Séptico podría ser más adecuado para un sistema más sencillo con menores costos iniciales, mientras que el Reactor UASB sería ideal en situaciones donde se busque un mayor grado de tratamiento y beneficios adicionales.

La Tabla 14 muestra un desglose detallado de las distintas unidades que conformarán el sistema de tratamiento de aguas residuales para la comunidad.

El uso del tanque de homogenización como pretratamiento, seguido del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.) como tratamiento primario, permite optimizar recursos, espacio y eficiencia, convirtiéndolo en una solución ideal para comunidades e industrias que buscan un sistema compacto, eficaz y de fácil operación. El tanque de homogenización asegura que las aguas residuales se distribuyan de manera uniforme antes de pasar al D.A.F., mejorando su rendimiento. Por su parte, el D.A.F. actúa como tratamiento primario, ofreciendo una alta eficiencia en la remoción de una amplia gama de contaminantes en una sola etapa. Este sistema es capaz de eliminar sólidos suspendidos gruesos y finos, grasas, aceites y materia orgánica flotante, tareas que normalmente requerirían múltiples unidades de tratamiento, como rejillas, desarenadores, trampas de grasas y sedimentadores primarios.

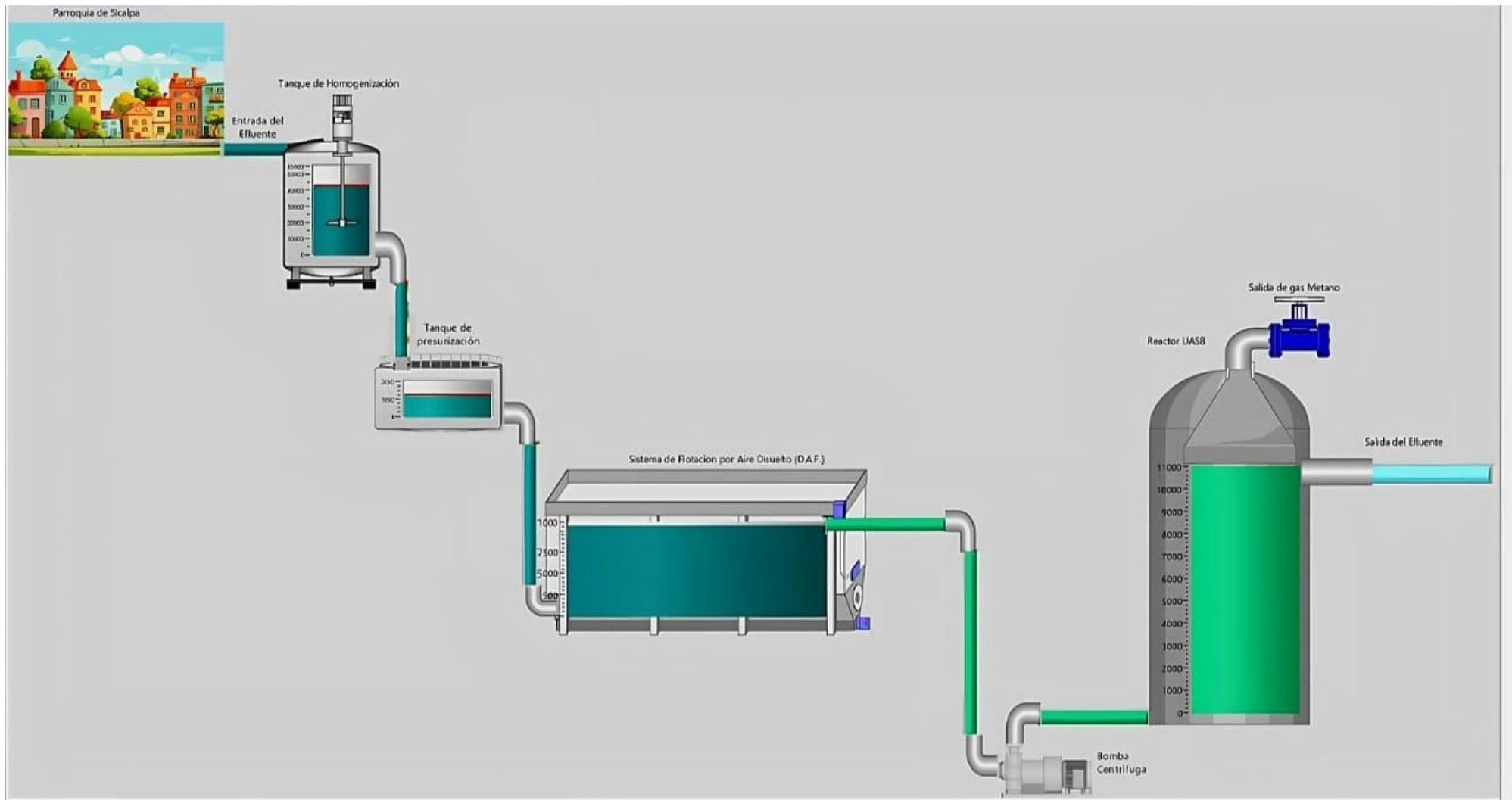
Tabla 14. Selección del sistema de tratamiento

| Tratamiento | Propósito del Proceso | Unidad |
|----------------------|--|--|
| Pretratamiento | Mezclar y equilibrar el caudal y la concentración de contaminantes en el agua residual. Esto evita variaciones bruscas en la carga orgánica y mejora la eficiencia de los procesos posteriores. | Tanque de Homogenización |
| Tratamiento Primario | Remoción eficiente de aceites, grasas y materia orgánica del agua, utilizando burbujas de aire finamente disueltas. | Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.) |
| Secundario | Elimina contaminantes inorgánicos y orgánicos (principalmente) presentes en el agua por medio de microorganismos que descomponen materia orgánica sin la necesidad de oxígeno, generando biogás y produciendo efluentes tratados que cumplen con estándares ambientales. | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) |

Fuente: Autora.

La Figura 4 muestra el esquema del sistema de tratamiento propuesto, especificando cada una de las unidades que integran el proceso de depuración de las aguas residuales en la parroquia de Sicalpa.

Figura 4. Esquema del Sistema de Tratamiento



Fuente. Autor

4.6 Dimensionamiento del Sistema de Tratamiento

El sistema de tratamiento fue diseñado para operar eficientemente durante un mínimo de 25 años. Para ello, el caudal de diseño se calculó considerando la proyección de crecimiento poblacional de la comunidad hasta el año 2049. Los resultados obtenidos, detallados en la Tabla 15, se basan en la Ecuación 1, utilizada para estimar la población futura.

Tabla 15. Caudal de diseño y población futura

| Parámetro | Valor |
|---|--------|
| Población futura año 2049 (hab) | 23672 |
| Caudal de diseño $\left(\frac{m^3}{d}\right)$ | 213,05 |

Fuente. Autor

4.6.1 Diseño del Sistema de Tanque de Homogenización

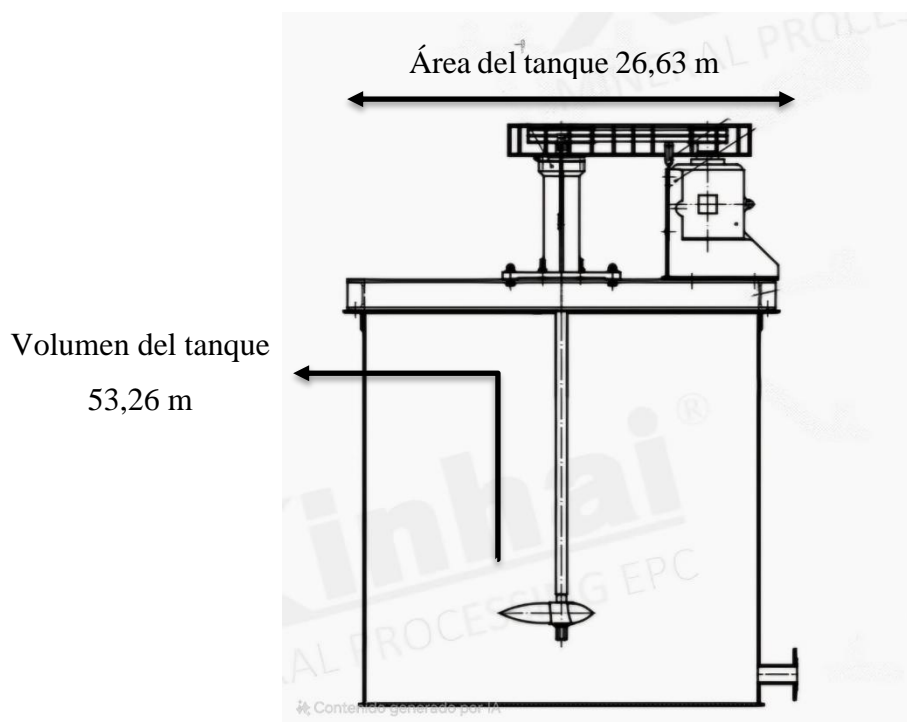
Los parámetros y los valores obtenidos del tanque de homogenización se encuentran detallados en la Tabla 16, la forma del tanque de homogenización se muestra en la Figura 5.

Tabla 16. Dimensionamiento del Tanque de Homogenización

| Parámetro | Nomenclatura | Valor | Ecuación |
|--------------------------------------|--------------|-------|----------|
| Caudal $\left(\frac{m^3}{h}\right)$ | Q | 8,87 | 3 |
| Área del tanque (m ²) | A | 26,63 | 3 |
| Diámetro del tanque (m) | Φ | 5,82 | 4 |
| Radio del tanque (m) | r | 2,91 | 5 |
| Volumen del tanque (m ³) | V | 53,26 | 6 |
| Diámetro del impulsor (m) | di | 1,94 | 7 |
| Ancho de las paletas (m) | q | 0,39 | 8 |
| Longitud de las paletas (m) | L | 0,49 | 9 |
| Número de deflectores | W | 4 | |
| Ancho de los deflectores (m) | Wb | 0,58 | 10 |

Fuente. Autor

Figura 5. Esquema del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)



Fuente. Autor

4.6.2 Diseño del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)

Los parámetros y los valores obtenidos del dimensionamiento del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.) se encuentran detallados en la Tabla 17, la forma del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.) se muestra en la Figura 6.

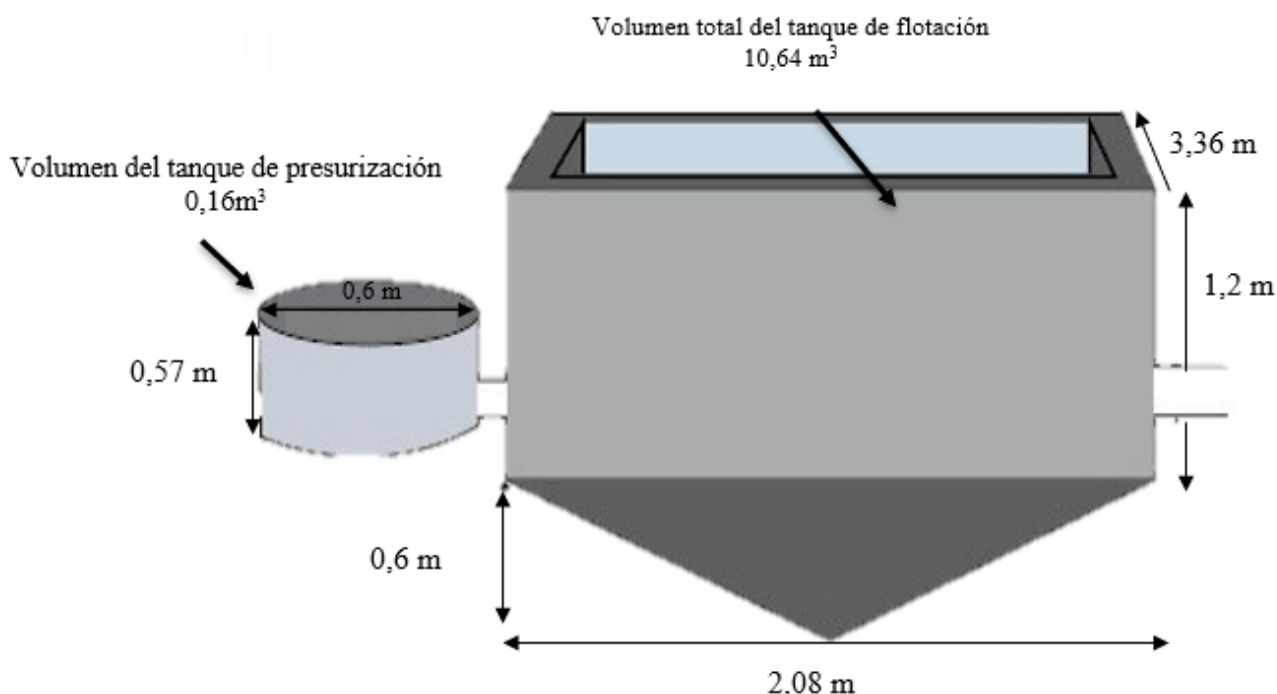
Tabla 17. Dimensionamiento del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)

| Parámetro | Nomenclatura | Valor | Ecuación |
|---|---------------------|-------|----------|
| Caudal recirculado presurizado $\left(\frac{L}{S}\right)$ | Q_R | 0,99 | 11 |
| Solubilidad del aire $\left(\frac{mL \text{ aire}}{L \text{ agua}}\right)$ | C_T | 94,58 | 12 |
| Cantidad de aire liberado $\left(\frac{mL \text{ aire}}{L \text{ agua}}\right)$ | $C_T - C_L$ | 23,68 | 14 |
| Relación aire/sólidos | $\frac{A}{S}$ | 0,15 | 15 |
| Cantidad de lodo producido $\left(\frac{kg}{h}\right)$ | m_{lodos} | 6,64 | 16 |
| Área superficial del tanque de flotación (m^2) | A_S | 2,49 | 18 |
| Volumen del tanque de flotación (m^3) | V_{prisma} | 8,38 | 19 |
| Ancho del tanque de flotación (m) | A_{prisma} | 3,36 | 20 |

| | | | |
|--|-----------------------------|-------|----|
| Largo del tanque de flotación (m) | L_{prisma} | 2,08 | 21 |
| Altura tanque de flotación (m) | H_{prisma} | 1,2 | 21 |
| Volumen del tanque de flotación (m^3) | $V_{\text{pirámide}}$ | 2,26 | 22 |
| Altura tanque de flotación (m) | $H_{\text{pirámide}}$ | 0,6 | 22 |
| Volumen total del tanque de flotación (m^3) | V_{flot} | 10,64 | 23 |
| Volumen tanque de presurización (m^3) | V_{pres} | 0,16 | 24 |
| Altura tanque de presurización (m) | h | 0,57 | 25 |
| Diámetro tanque de presurización (m) | $\varnothing_{\text{pres}}$ | 0,6 | 25 |

Fuente. Autor

Figura 6. Esquema del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)



Fuente. Autor

Una vez calculados los porcentajes de remoción de contaminantes, según las eficiencias sugeridas por la Comisión Nacional del Agua (2015), la Tabla 18 presenta las concentraciones finales de los contaminantes tras el tratamiento en el Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.). Se observa una reducción significativa en los parámetros que inicialmente mostraban valores elevados.

En el caso de los aceites y grasas, las concentraciones cumplen plenamente con los límites establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A para descargas en cuerpos de agua dulce, conforme a la normativa del Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE, 2015). Respecto a

la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se logró una reducción del 15%, lo que, aunque moderado, representa un avance significativo para la siguiente etapa del tratamiento. Por otro lado, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) disminuyó en un 20%, acercándose al límite permisible de 100 mg/L.

Estos resultados evidencian la efectividad del Sistema D.A.F. en la mejora de la calidad del agua, optimizándola para su posterior tratamiento secundario.

Tabla 18. Balance de remoción del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.).

| Parámetro | % Remoción | % Seleccionado | Entrada (mg/L) | Salida (mg/L) |
|------------------|------------|----------------|----------------|---------------|
| Aceites y grasas | 60-95 | 70 | 66,79 | 20,04 |
| DQO | 10-25 | 15 | 281,5 | 238,97 |
| DBO ₅ | 10-50 | 20 | 140,5 | 112,4 |

Fuente. Autor

4.6.3 Reactor Anaerobio UASB

Los parámetros y valores obtenidos del dimensionamiento del reactor anaerobio UASB se presentan en las siguientes secciones: las dimensiones generales del reactor en la Tabla 19, la sección de sedimentador y acumulación de lodos en la Tabla 20, y la sección de la campana en la Tabla 21. Además, la Figura 7 muestra la forma del reactor donde su capacidad es de 88,77 m³, mientras que en el Anexo 6 se detallan sus dimensiones.

Tabla 19. Dimensiones generales del Reactor UASB

| Parámetro | Nomenclatura | Valor | Ecuación |
|--|-----------------|--------|----------|
| Gasto afluente promedio ($\frac{m^3}{d}$) | Q _{ip} | 213,05 | 1 |
| Carga de DQO en el afluente ($\frac{kg}{d}$) | Lo | 59,97 | 26 |
| Tiempo de retención hidráulica (h) | TRH | 10 | 27 |
| Volumen del reactor (m ³) | V _U | 88,77 | 27 |
| Altura del reactor (m) | H | 4 | 28 |
| Área del reactor (m ²) | A | 22,19 | 28 |
| Largo del reactor (m) | L | 5,55 | 29 |

Fuente. Autor

Tabla 20. Dimensionamiento de la sección del sedimentador y acumulación de lodos del Reactor UASB

| Parámetro | Nomenclatura | Valor | Ecuación |
|---|------------------|-------|----------|
| Carga hidráulica volumétrica $\left(\frac{m^3}{m^3.d}\right)$ | CHV | 2,4 | 30 |
| Carga orgánica volumétrica $\left(\frac{kg}{m^3.d}\right)$ | COV | 0,68 | 31 |
| Velocidad de flujo ascendente para Qip $\left(\frac{m}{h}\right)$ | v | 9,6 | 32 |
| Número de tubos de distribución del agua residual | Nd | 11 | 33 |
| Eficiencia de remoción de la DQO, estimada (%) | E _{DQO} | 67 | 34 |
| Eficiencia de remoción de la DBO, estimada (%) | E _{DBO} | 76 | 35 |
| Producción estimada de metano $\left(\frac{m^3}{d}\right)$ | Q _{CH4} | 10.48 | 39 |
| Producción estimada de biogás $\left(\frac{m^3}{d}\right)$ | Q _g | 14.97 | 40 |
| Número de colectores de gas | | 3 | |
| Aberturas del sedimentador | | 2 | |
| Compartimentos del sedimentador | | 1 | |
| Producción del lodo $\left(\frac{kg}{d}\right)$ | P _L | 10,79 | 44 |
| Volumen de lodo $\left(\frac{m^3}{d}\right)$ | V _L | 0,26 | 45 |

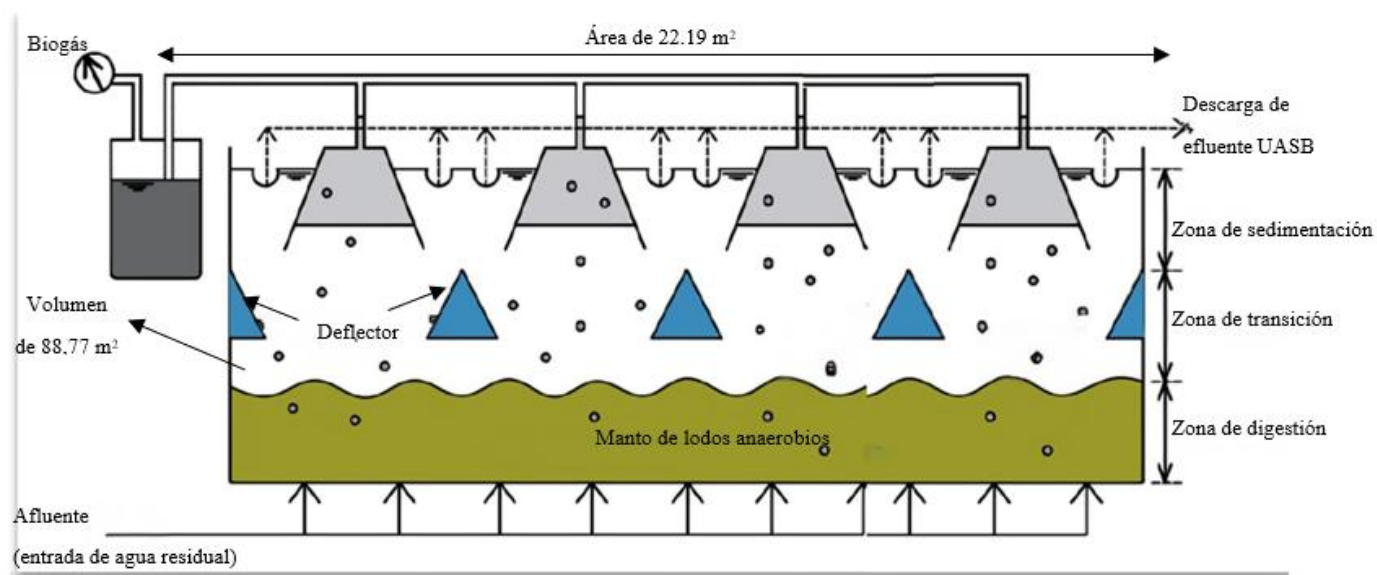
Fuente. Autor

Tabla 21. Dimensionamiento de la sección de la campana del Reactor UASB

| Parámetro | Nomenclatura | Valor | Ecuación |
|--|----------------|-------|----------|
| Altura de la campana (m) | h _C | 1 | 41 |
| Distancia horizontal de un lado de la campana (m) | x | 1,17 | 43 |
| Ancho real de la campana (m) | Z | 1,15 | 41 |
| Número de campanas | N _C | 4 | 42 |
| Separación entre campanas (m) | | 0,8 | |
| Diseño del canal de salida (dos canales), Ancho (m) | B _e | 0,4 | |
| Diseño del canal de salida, (dos canales), Profundidad (m) | h | 0,35 | |

Fuente. Autor

Figura 7. Esquema del Reactor UASB



Fuente. Autor

Para garantizar un flujo adecuado del efluente hacia el reactor, se utilizará una bomba centrífuga con impulsor vortex o sumergible, capaz de manejar un caudal de 8,88 m³/h y una altura de 10 metros, evitando obstrucciones y asegurando una distribución uniforme del flujo dentro del sistema, optimizando así su desempeño.

En la Tabla 22 se observa que los niveles de DQO y DBO₅, que no fueron completamente eliminados en el tratamiento anterior con el sistema D.A.F., ahora cumplen con los límites establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A para descargas en cuerpos de agua dulce, según la normativa del Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE, 2015). Además, la Figura 8 muestra el esquema del reactor UASB en vista de corte, mientras que sus vistas adicionales se encuentran detalladas en el Anexo 6.

Tabla 22 Balance de remoción del sistema UASB

| Parámetro | % Remoción | % Seleccionado | Entrada (mg/L) | Salida (mg/L) |
|------------------|------------|----------------|----------------|---------------|
| DQO | 65-80 | 67 | 238,97 | 78,86 |
| DBO ₅ | 60-80 | 76 | 112,4 | 26,98 |
| Nitratos | 10-25 | 20 | 8,13 | 6,50 |
| Nitritos | 10-25 | 15 | 0,13 | 0,11 |

Fuente. Autor

4.7 Materiales de Construcción

A continuación, se presenta en la Tabla 23 los materiales de construcción recomendados para cada uno de los componentes principales del tanque de homogenización, el sistema de flotación por aire disuelto (D.A.F.) y el reactor UASB. La selección de estos materiales se basa en su resistencia a la corrosión, durabilidad y compatibilidad con los procesos involucrados en el tratamiento de aguas residuales, asegurando así un funcionamiento eficiente y una larga vida útil de los sistemas.

Tabla 23 Materiales de Construcción para el Sistema de Tratamiento

| Componente | Tanque de Homogenización | Sistema D.A.F. | Reactor UASB |
|--|---|---|--|
| Estructura principal | Concreto reforzado, Acero inoxidable, Polietileno de alta densidad (HDPE) | Acero inoxidable, PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio), Acero al carbono con recubrimiento epóxico | Concreto armado, Acero inoxidable, PRFV, Acero recubierto con resina epóxica |
| Base o cimentación | Concreto armado con refuerzo en acero | Concreto armado o estructura metálica | Concreto reforzado con tratamiento anticorrosión |
| Recubrimientos internos | Resina epóxica, Poliuretano, Pintura anticorrosiva | Resina epóxica, Recubrimiento de poliuretano | Resina epóxica, Recubrimiento anticorrosivo |
| Sistema de agitación | Hélices de acero inoxidable, Motores eléctricos | No aplica | No aplica |
| Tuberías de entrada y salida | PVC, Acero inoxidable, HDPE | PVC, Acero inoxidable, HDPE | PVC, Acero inoxidable, HDPE |
| Sistema de aireación (D.A.F.) | No aplica | Compresores de aire, Difusores de microburbujas de acero inoxidable o cerámica | No aplica |
| Deflectores o separadores | Placas de acero inoxidable o PRFV | Placas de acero inoxidable o PRFV | Placas deflectoras de concreto o acero inoxidable |
| Sistema de eliminación de lodos | Bomba sumergible, Tuberías de extracción de lodos | Rascadores mecánicos, Bomba de lodos | Tuberías de extracción de lodos, Bomba sumergible |
| Cubierta superior (opcional) | Lona plástica, Lámina de acero, PRFV | PRFV, Acero inoxidable | Lámina de acero inoxidable o membrana de biogás |

Fuente. Autor

4.8 Propuesta de la Ubicación más Adecuada para el Sistema de Tratamiento

Después de analizar tres aspectos claves para determinar la mejor ubicación del sistema de tratamiento de la comunidad, como fueron: mitigación de impactos ambientales, orografía y topografía, así como costos y viabilidad constructiva, se propone que la planta de tratamiento de aguas residuales para la parroquia de Sicalpa se sitúe en las coordenadas geográficas -1,7021368 Latitud, -78,7811234 Longitud y un área de 2223,67 m². Esto se visualiza en la Figura 9, donde se identifica en el polígono de color amarillo.

Figura 9. Ubicación para el sistema de tratamiento de la parroquia de Sicalpa



Fuente. Autor

Capítulo 5

Conclusiones

- El sistema de tratamiento de aguas residuales fue diseñado con una capacidad de 213,05 m³/día, considerando el crecimiento poblacional hasta el año 2049. La combinación del Tanque de homogeneización, Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.) y el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) ha demostrado ser altamente eficiente en la remoción de contaminantes, optimizando la calidad del efluente tratado y asegurando su cumplimiento con las normativas ambientales vigentes.
- La caracterización del agua residual de la parroquia Sicalpa evidencia valores que superan los límites establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A para descargas en cuerpos de agua dulce. Los parámetros medidos reflejan una alta carga contaminante, con concentraciones de aceites y grasas (66,67 mg/L), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) (140,5 mg/L), demanda química de oxígeno (DQO) (281,5 mg/L), coliformes fecales (3500 UFC/mL) y coliformes totales (3500 UFC/mL). Esto indica la necesidad de un tratamiento adecuado para mitigar el impacto ambiental y cumplir con la normativa vigente.
- El tanque de homogeneización, con un volumen de 53,26 m³ y un área de 26,63 m², permite una distribución uniforme de los contaminantes, evitando fluctuaciones en la carga orgánica. Por su parte, el Sistema D.A.F., con un volumen de 10,64 m³, ha logrado una remoción del 70% de aceites y grasas, 15% de DQO y 20% de DBO₅, contribuyendo a la eficiencia global del proceso. El reactor UASB, con un volumen de 88,77 m³, ha alcanzado una reducción del 67% en DQO y 76% en DBO₅, garantizando que el efluente cumple con los límites establecidos. Además, la generación estimada de 14,97 m³/día de biogás representa una oportunidad para su aprovechamiento energético, mejorando la sostenibilidad del sistema.

Recomendaciones

- **Evaluación de Descargas Complementarias:** tanque de almacenamiento del agua antes de que entre al reactor. Evaluar la posibilidad de tratar otras fuentes de aguas residuales cercanas de manera conjunta, lo que podría maximizar la eficiencia del sistema y reducir el impacto ambiental.
- **Monitoreo y Mantenimiento:** Es recomendable establecer un plan de monitoreo y mantenimiento regular para garantizar el óptimo funcionamiento del sistema de tratamiento a lo largo del tiempo. Durante el periodo de estabilización del equipo, se sugiere realizar un monitoreo semanal para evaluar su desempeño. Dado que los equipos requieren aproximadamente dos meses para estabilizarse, este seguimiento permitirá asegurar su correcto funcionamiento de manera eficiente y adecuada.
- **Capacitación de Personal:** Se recomienda capacitar al personal responsable de la operación y mantenimiento de la planta para asegurar un manejo adecuado de las tecnologías implementadas y el cumplimiento de las normativas ambientales. Es importante considerar que la supervisión de la planta estará exclusivamente a cargo de los miembros del GAD de Colta.
- **Creación de un Manual de Operación:** Desarrollar un manual de operación y mantenimiento que contenga procedimientos detallados para la gestión del sistema, instrucciones para la resolución de problemas comunes y protocolos de seguridad. Este documento servirá como una guía técnica para el personal, asegurando la correcta operación del sistema y la prolongación de su vida útil.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar, D. (2014). *Diseño de un sistema de Flotacion por Aire Disuelto (F.A.D) para mejorar la calidad del agua residual de la industria láctea El Ordeño y La Corpabe (tesis de ingeniería)*. Escuela Politécnica Nacional.
- APHA, AWWA, & WPCF. (2019). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. In *Sustainability (Switzerland)* (17th ed., Vol. 11, Issue 1). http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEM_BETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Registro Oficial No. 449. <https://www.asambleanacional.gob.ec>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*. <https://www.agua.gob.ec>
- Cabrera, M., & Pulla, M. (2014). *Línea Base Para El Aprovechamiento De Microalgas De Sistemas De Tratamiento De Agua Residual*. 1–105.
- Carita, M. (2012). *Estudio de calidad microbiológica de aguas residuales, procedentes de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (tesis de maestría)*. Universidad Mayor de San Andrés. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/22869/TE-1839.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Comisión Nacional Del Agua. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento* (1st ed.).
- Cumbal, F., & Ordoñez, B. (2023). *Determinación de la calidad de agua mediante parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la microcuenca Sicalpa, Cantón Colta (tesis de ingeniería)*. Universidad Nacional de Chimborazo.
- GAD Colta. (2019). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Colta*.
- Glynn, J., & Heinke, G. (2000). *Ingeniería Ambiental* (1st ed.).
- González-Ramírez, L. C., Robalino-Flores, X., De la Torre, E., Parra-Mayorga, P., Prato, J. G., Trelis, M., & Fuentes, M. V. (2022). Influence of Environmental Pollution and

- Living Conditions on Parasite Transmission among Indigenous Ecuadorians. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph19116901>
- Hach, C. (2000). *Manual de Análisis de Agua: Procedimientos fotométricos, Procedimientos de titulación, Procedimientos microbiológicos* ((2a edición, Issue 970).
- INEC. (2021). *Estadísticas de servicios básicos en el Ecuador*.
- INEN. (2006). *Norma INEN 1108: Calidad del agua. Descargas al cuerpo receptor*.
- INEN. (2007). *No Norma INEN 2176: Sistemas de tratamiento de aguas residuales. Diseño y operación*.
- López, M. (2021). Aguas Residuales Rurales: Desafíos, Tratamiento y Gestión. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 32.
- MAE. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 097-A: Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua. Registro Oficial No. 387, 4 de noviembre de 2015*. <https://www.ambiente.gob.ec>
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Treatment and Resource Recovery* (Wastewater Engineering (ed.)).
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*.
- Ministerio del Ambiente y Agua. (2020). *Normativa para la gestión del recurso hídrico en Ecuador*.
- Mora, J., & Calvo, G. (2010). Estado actual de contaminación con coliformes fecales de los cuerpos de agua de la Península de Osa. *Tecnología En Marcha*, 23(Nº. Extra 5), 34–40. <http://aplicacionesbiblioteca.udea.edu.co:2056/servlet/articulo?codigo=4835746>
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
- Novikau, R., & Lujanienė, G. (2022). Adsorption behaviour of pollutants: Heavy metals, radionuclides, organic pollutants, on clays and their minerals (raw, modified and treated): A review. *Journal of Environmental Management*, 1(114685), 309.
- OMS. (2022). *Informe sobre agua, saneamiento e higiene*.
- ONU-WWAP. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos: Agua y cambio climático. In *ONU-Agua*.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>

- Raffo, E., & Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17(1), 11.
- Rodríguez de Jorge, L. (2020). *El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes*. IAgua. <https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>
- Romero, J. (1999). *Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Romero_R.pdf*. file:///D:/VII CICLO JULIANA/TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES/SEMANA 6/INVESTIGACIONES/Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Romero_R.pdf
- Ronquillo, R. (2016). *Diseño de una Planta de Tratamiento de Agua Residuales para ser utilizada en el riego del Parque Samane*. Universidad de Guayaquil.
- Samaniego Marin, W. J., & Núñez Orozco, M. Y. (2022). *Prediseño De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales De La Empresa De Lácteos El Pajona (titulo de ingeniería)* (Vol. 3, Issue 6). Universidad Nacional de Chimborazo. <https://doi.org/10.56519/vysw5904>
- Sánchez, J., & Román, S. (2020). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales Industriales para una empresa Empacadora y Exportadora de Camarón en la ciudad de Guayaquil (titulo de ingeniería)*. Universidad Politécnica Salesiana.
- SENPLADES. (2013). *Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017*.
- Spellman, F. (2017). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*.
- Vázquez, E., & Rojas, T. (2016). pH: Teoría y 232 Problemas. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). Universidad Autónoma Metropolitana. http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEM_BETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- WHO, & UNICEF. (2021). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: five years into the SDGs. In *Joint Water Supply, & Sanitation Monitoring*

Programme. World Health Organization (WHO) and the United Nations Children's Fund (UNICEF). In *Launch version July 12 Main report Progress on Drinking Water , Sanitation and Hygiene*. <http://apps.who.int/bookorders>.

Anexos

Anexo 1. Fotografías de entrevistas semiestructuradas



Fotografía 1. GAD de Colta



Fotografía 2. Unidad educativa Sicalpa



Fotografía 3. Parroquia de Sicalpa

Anexo 2. Materiales utilizados durante la recolección de las aguas residuales

Materiales de muestreo

- Barillas de hierro
- Cinta masquin de 3/4
- Envase de vidrio color ámbar de 1 L
- Hielera y hielo
- Cámara fotográfica
- Guantes estériles
- Mascarilla Kn95



Fotografía 4. Apertura del punto de control



Fotografía 5. Preparación para la toma de muestras



Fotografía 6. Toma de muestras de aguas residuales con frasco ámbar



Fotografía 7. Transporte de la muestra de aguas residuales en hielera

Anexo 3. Instrumentos y materiales utilizados en el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Materiales

- Libreta de apuntes.
- Pipeta de 15 y 10 mL
- Vasos de precipitación de 50, 25 mL
- Probetas de 10 y 500 mL
- Matraz Erlenmeyer de 250 mL
- Matraz aforado de 1L
- Soporte universal
- Cono Imhoff

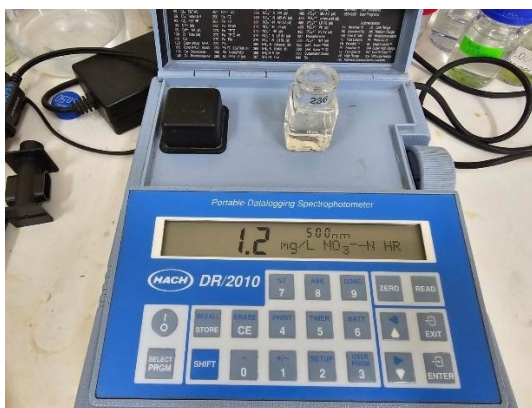
- Celdas de vidrio de 10 mL
- Pera de succión de tres vías

Equipos

- Espectrofotómetro visible DR 5000
- pH-metro
- Multiparámetro HACH HQ40d
- Estufa
- Balanza analítica
- Sistema DBO



Fotografía 8. Análisis de grasas



Fotografía 9. Análisis de metales



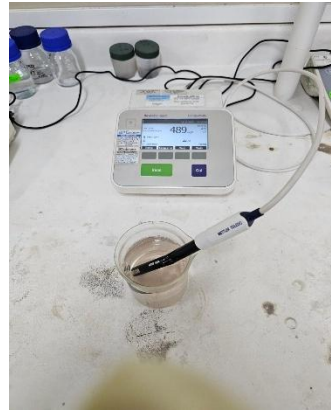
Fotografía 10. Análisis de nitratos, nitritos y fosforo



Fotografía 11. Análisis de oxígeno disuelto DBO₅



Fotografía 12. Análisis de coliformes totales y fecales



Fotografía 13. Análisis de pH, conductividad eléctrica y sólidos totales



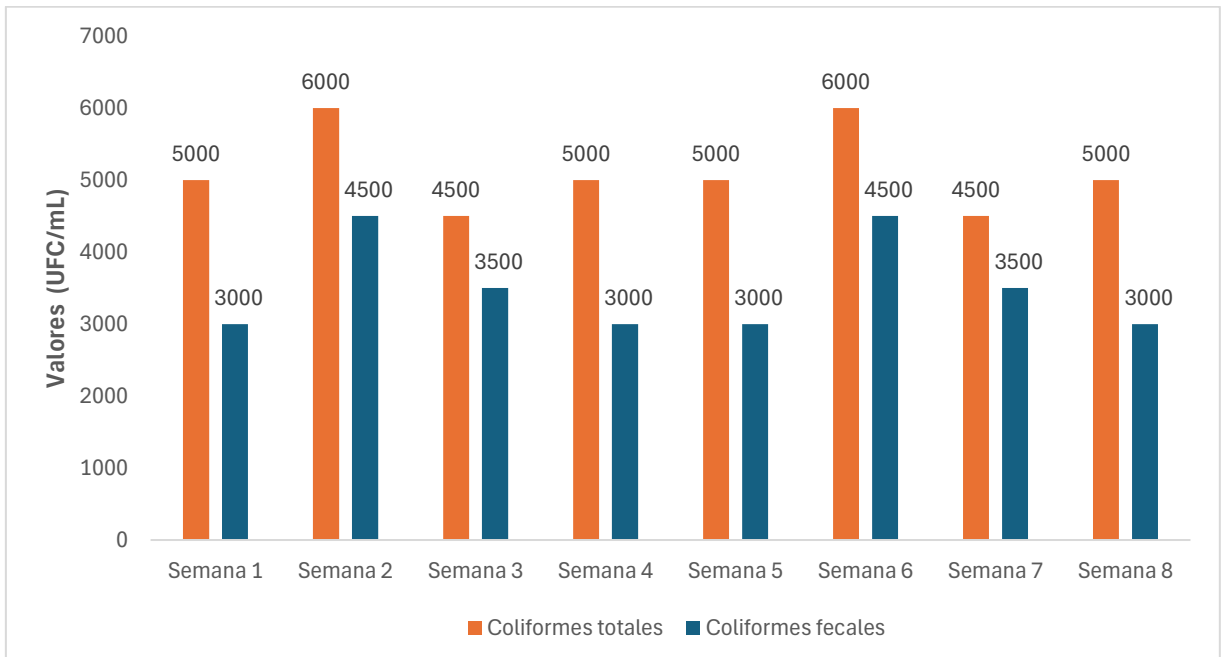
Fotografía 14. Preparación de muestra para análisis



Fotografía 15. Preparación de la muestra para el cálculo del DBO

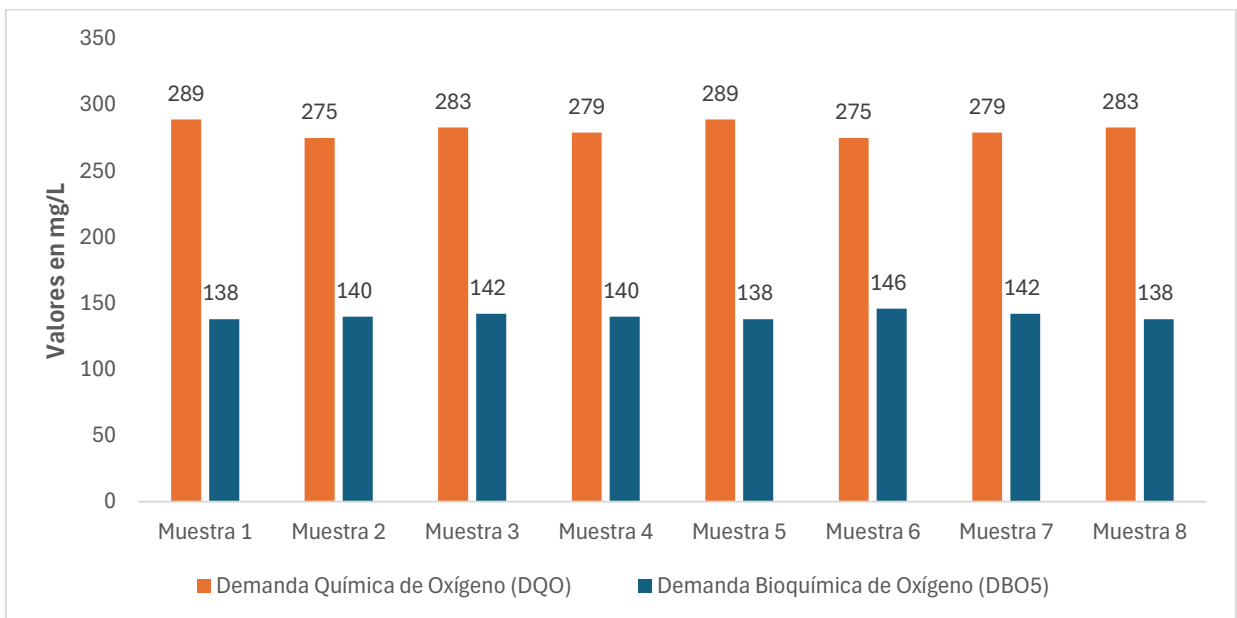
Anexo 4. Valores de caracterización de aguas residuales

Figura 10. Valores de Coliformes Totales y Fecales



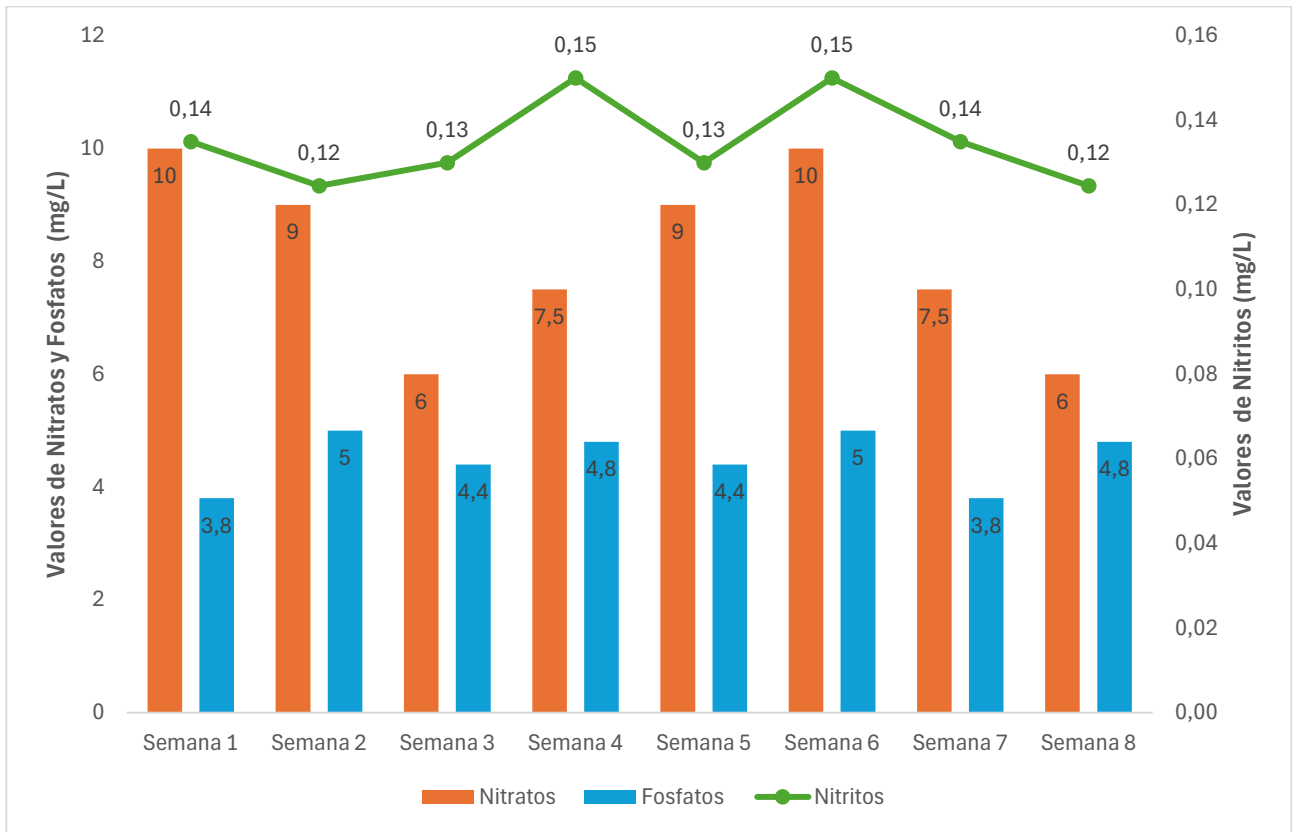
Fuente. Autor

Figura 11. Valores de DQO y DBO₅



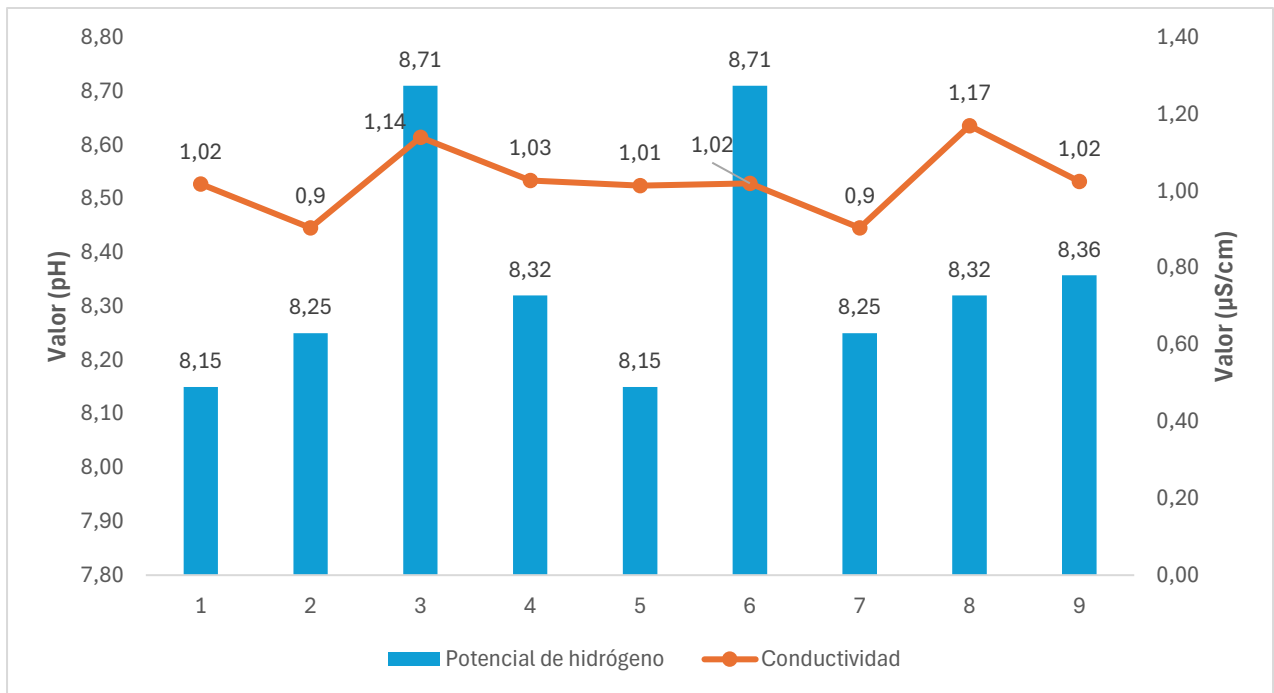
Fuente. Autor

Figura 12. Valores de Fosfatos, Nitratos y Nitritos



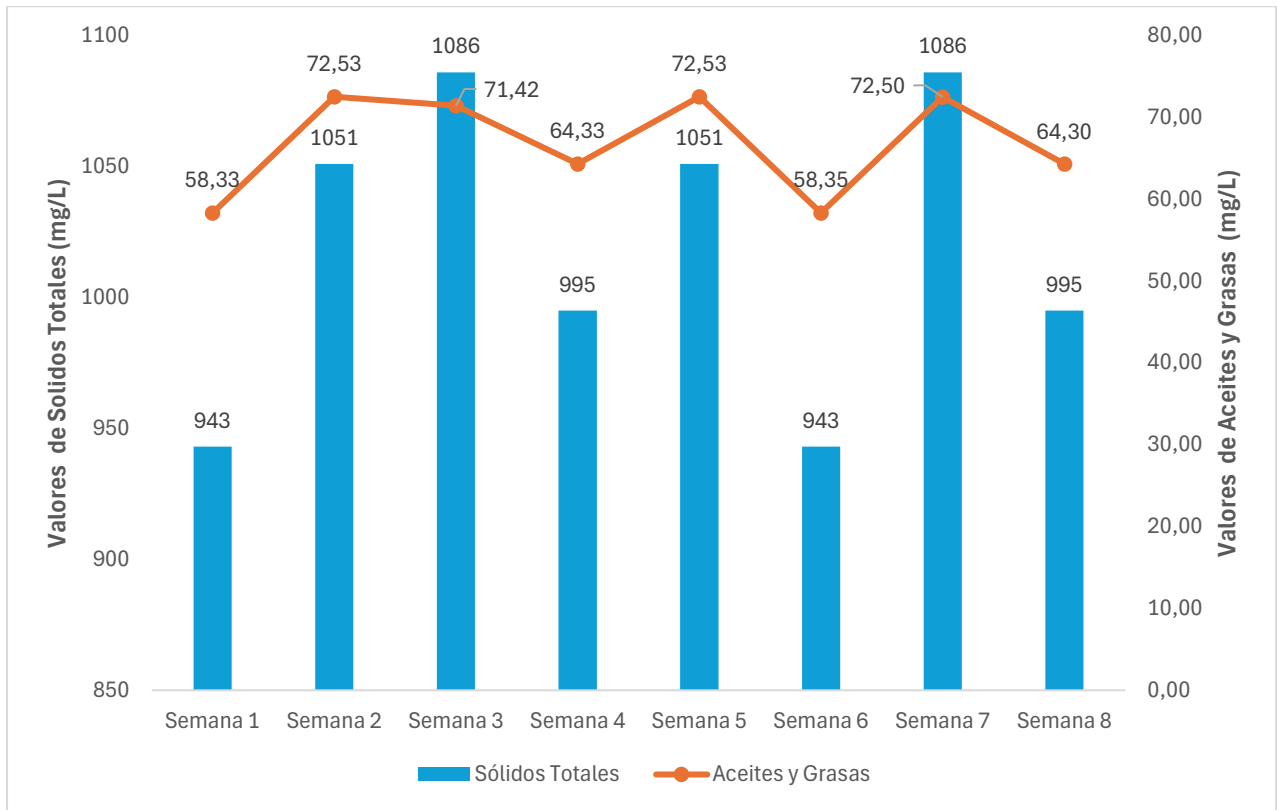
Fuente. Autor

Figura 13. Valores de Potencial de Hidrógeno y Conductividad



Fuente. Autor

Figura 14. Sólidos Totales, Aceites y Grasas



Fuente. Autor

Anexo 5. Cálculos para el pre-diseño del sistema de tratamiento

a) Tanque de Homogenización

- **Área del Tanque Homogeneizador**

Para calcular el área, se tomó en cuenta un tiempo de descarga de 6 h y para la altura un valor de 2 m utilizando la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q \times t}{h} \quad (3)$$

Donde:

Q: Caudal de ingreso al sistema (m³/h)

t: Tiempo de descarga (h)

h: Altura (m)

- **Diámetro del Tanque**

Para calcular el diámetro, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\emptyset = \sqrt{4 \times \frac{A}{\pi}} \quad (4)$$

Donde:

∅: Diámetro (m)

A: Área del tanque homogeneizador (m²)

π: Número irracional (3.1416)

- **Radio del Tanque**

Para calcular el radio, se utilizó la siguiente ecuación:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (5)$$

Donde:

r: Radio (m)

A: Área (m²)

π : Número irracional (3.1416)

- **Volumen del Tanque**

Para calcular el volumen, se utilizó la siguiente ecuación:

$$V = A \times h \quad (6)$$

Donde:

V: Volumen del tanque (m³)

A: Área del tanque (m²)

h: Altura (m)

- **Diámetro del impulsor**

Para calcular el diámetro del impulsor, se utilizó la siguiente ecuación:

$$di = \frac{1}{3} \times \Phi \text{ del tanque} \quad (7)$$

Donde:

Φ : Diámetro del tanque (m)

- **Ancho de paletas del impulsor**

Para calcular el ancho de las paletas, se utilizó la siguiente ecuación:

$$q = \frac{1}{5} \times di \quad (8)$$

Donde:

di: Diámetro del impulsor (m)

- **Longitud de las paletas**

Para calcular de la longitud de las paletas, se utilizó la siguiente ecuación:

$$l = \frac{1}{4} \times di \quad (9)$$

Donde:

di: Diámetro del impulsor (m)

- **Número de deflectores**

El número de deflectores para un tanque cilíndrico con agitación mecánica es de 4 según (Comisión Nacional Del Agua, 2015).

- **Ancho de los deflectores**

Para calcular el ancho de los deflectores, se utilizó la siguiente ecuación:

$$wb = \frac{1}{10} \times \Phi \text{ del tanque} \quad (10)$$

Donde:

Φ : Diámetro del tanque (m)

b) Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.)

- **Caudal recirculado presurizado**

Para calcular el caudal recirculado, se tomó en cuenta un porcentaje de recirculación del 40 % utilizando la siguiente ecuación:

:

$$Q_R = Q \times \%R \quad (11)$$

Donde:

Q: Caudal de ingreso al sistema de flotación (L/s)

R: Porcentaje de reciclo (%)

- **Solubilidad del aire**

Para calcular la solubilidad de saturación del aire, se tomó en cuenta una presión de operación del tanque igual a 50 psi (3123.59 mmHg) y una presión de vapor del agua a 10 °C, utilizando la siguiente ecuación:

:

$$C_T = C \times \left(\frac{P_T - P_V}{760 - P_V} \right) \quad (12)$$

Donde:

C: Solubilidad del aire en agua, a presión de una atmósfera (mL aire/L de agua)

P_T: Presión absoluta del aire (mmHg)

P_V: Presión de vapor de agua (mmHg)

- **Solubilidad de saturación**

Para calcular la Solubilidad de saturación del aire a la presión local atmosférica de Sicalpa igual a 14,66 psi, se toma en cuenta la presión de vapor del agua a 27 °C utilizando la siguiente ecuación:

$$C_T = C \times \left(\frac{P_T - P_V}{760 - P_V} \right) \quad (13)$$

- **Cantidad de aire liberado**

La cantidad de aire liberado en el tanque de flotación se lo logra a partir de la diferencia de solubilidades utilizando la siguiente ecuación:

$$C_T - C_L = C \times \left(\frac{f \times P_T - P_V - P_L - P_V}{760 - P_V} \right) \quad (14)$$

Donde:

C_T : Solubilidad de saturación del aire a la presión de operación del tanque (mL aire/L de agua)

C_L : Solubilidad del aire en agua, a la presión absoluta (mL aire/L de agua)

C : Solubilidad del aire en agua, a presión de una atmósfera (mL aire/L de agua)

f : Fracción de saturación, alcanzada en el tanque de presurización, generalmente 0,5-0,8

P_T : Presión de operación del tanque (mmHg)

P_V : Presión de vapor de agua a 27°C (mmHg)

P_L : Presión local atmosférica (mmHg).

- **Relación aire sólidos (A/S)**

Para calcular la relación (A/S) para un sistema con recirculación, requerida para lograr un determinado grado de clarificación, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{A}{S} = \left(\frac{C \times d \times Q_R \times f \times P_T - P_V - P_L - P_V}{S_O \times Q \times 760 - P_V} \right) \quad (15)$$

Donde:

C : Solubilidad del aire en agua, a presión de una atmósfera (mL aire/L de agua)

d : Densidad de aire a las condiciones del problema (mg/mL)

Q_R : Caudal recirculado presurizado (L/s)

f : Fracción de saturación, alcanzada en el tanque de presurización, generalmente 0,5-0,8

P_T : Presión de operación del tanque (mmHg)

P_V : Presión de vapor de agua a la temperatura de operación 27°C (mmHg)

P_L : Presión local atmosférica (mmHg)

S_0 : Concentración de sólidos suspendidos del afluente (mg/mL)

Q : Caudal de ingreso al sistema de flotación (L/s)

- **Cantidad de lodo producido**

La cantidad de lodo producido por sólidos en suspensión se calcula con la siguiente ecuación:

$$m_{Lodos} = (S_0 - S_f) \times Q \quad (16)$$

Donde:

S_0 : Concentración de sólidos suspendidos a la entrada (mg/L)

S_f : Concentración de sólidos suspendidos a la salida (mg/L)

Q : Caudal de ingreso al sistema de flotación (L/h)

- **Cantidad de coagulante químico**

Para determinar la cantidad de coagulante químico que se debe aplicar al efluente al ingreso del tanque de flotación, se utiliza la siguiente ecuación:

$$m_{químico} = C_Q \times Q \quad (17)$$

Donde:

Q : Caudal de ingreso al sistema de flotación (m^3 /h)

C_Q : Concentración de coagulante químico vamos a utilizar sulfato de aluminio por su costo en promedio lo que se utiliza para estos sistemas es 100 (g/m^3)

- **Área superficial del tanque de flotación**

Para calcular el área superficial del tanque de flotación, se utiliza la siguiente ecuación asumiendo una carga superficial de 120 (m³/m²*día):

$$A_s = \frac{Q + Q_E}{C_s} \quad (18)$$

Donde:

Q: Caudal de ingreso al sistema de flotación (m³/día)

Q_R: Caudal recirculado presurizado (m³/día)

C_s: Carga superficial (m³/m²*día)

- **Volumen del tanque de flotación (prisma rectangular)**

Para determinar el volumen del prisma rectangular se considera un tiempo de retención de 30 minutos y un factor de seguridad de 1,35. El cálculo se detalla en la siguiente ecuación:

$$V_{prisma} = (Q + Q_R) \times t_{flor} \times f \quad (19)$$

Donde:

Q: Caudal de ingreso al sistema de flotación (m³/día)

Q_R: Caudal recirculado presurizado (m³/día)

t_{flot}: Tiempo de retención en el tanque de flotación (día)

- **Ancho del tanque de flotación (prisma rectangular)**

Una vez calculado el área superficial y el volumen, se procede a determinar el ancho del prisma rectangular con la siguiente ecuación:

$$A_{prisma} = \frac{V_{prisma}}{A_s} \quad (20)$$

Donde:

V_{prisma}: Volumen del prisma rectangular (m³)

A_s: Área superficial del tanque de flotación (m²)

- **Largo del tanque de flotación (prisma rectangular)**

Para determinar el largo del prisma rectangular se consideró una altura máxima del tanque de flotación de 1,2 metros utilizando la siguiente ecuación:

$$V_{prisma} = A_{prisma} \times H_{prisma} \times L_{prisma} \quad (21)$$

Donde:

V_{prisma} : Volumen del prisma rectangular (m^3)

A_{prisma} : Ancho del prisma rectangular (m)

H_{prisma} : Altura del prisma rectangular (m)

- **Volumen del tanque de flotación (pirámide rectangular)**

El volumen de la pirámide rectangular forma parte del volumen total del tanque de flotación, para eso se ha considerado una altura de 0,60 m para su diseño y se detalla en la siguiente ecuación:

$$V_{piramide} = \frac{A_{base} \times H_{piramide}}{3} \quad (22)$$

Donde:

A_{base} : Área de la base (m^2)

$H_{piramide}$: Altura (m).

- **Volumen del tanque de flotación**

Una vez calculado el volumen del prisma y pirámide rectangular, el volumen total del tanque de flotación se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{flot} = V_{prisma} + V_{piramide} \quad (23)$$

Donde:

V_{prisma} : Volumen del prisma rectangular (m^3)

$V_{piramide}$: Volumen de la pirámide rectangular (m^3)

- **Volumen del tanque de presurización**

El volumen del tanque de presurización dependerá del caudal de recirculación y el tiempo de retención en el tanque de presurización considerado de 2 minutos, el mismo que corresponde al tiempo que debe permanecer el volumen de agua dentro del tanque para que alcance la concentración de aire disuelto requerido., para ello se utilizará la siguiente ecuación:

$$V_{pres} = Q_R \times t_{pres} \times f \quad (24)$$

Donde:

Q_R : Caudal recirculado presurizado (L/s)

t_{pres} : Tiempo de retención en el tanque de presurización (s)

f: Factor de seguridad de 1,35

- **Altura del tanque de presurización**

Para la determinación de la altura del tanque de presurización se toma en cuenta un diámetro de presurización igual a 0,6 metros que se detalla en la siguiente ecuación:

$$V_{pres} = \pi \times r^2 \times h \quad (25)$$

Donde:

r: Radio del tanque de presurización (m)

V_{pres} : Volumen del tanque de presurización (m³)

Tabla 24 Solubilidad de saturación del aire en agua a una atmósfera

| Temperatura (°C) | Solubilidad, C |
|------------------|------------------------------------|
| | <i>ml aire</i> <i>L de agua</i> |
| 0 | 29,2 |
| 5 | 25,7 |
| 10 | 22,8 |
| 15 | 20,6 |
| 20 | 18,7 |
| 25 | 17,1 |

30

15,7

Fuente. (Romero, 1999)

Tabla 25 Densidad del aire a 1 atmósfera

| Temperatura (°C) | Densidad (mg/L) |
|-------------------------|------------------------|
| 0 | 1,293 |
| 2 | 1,284 |
| 4 | 1,274 |
| 5 | 1,270 |
| 6 | 1,265 |
| 8 | 1,256 |
| 10 | 1,247 |
| 12 | 1,238 |
| 14 | 1,230 |
| 15 | 1,226 |
| 16 | 1,221 |
| 18 | 1,213 |
| 20 | 1,205 |
| 22 | 1,196 |
| 24 | 1,188 |
| 25 | 1,184 |
| 26 | 1,180 |

Fuente. (Aguilar, 2014)

Tabla 26 Presión de vapor de agua

| Temperatura (°C) | Presión de vapor (mmHg) |
|-------------------------|--------------------------------|
|-------------------------|--------------------------------|

| | |
|----|------|
| 0 | 4,6 |
| 2 | 5,3 |
| 4 | 6,2 |
| 6 | 7,1 |
| 8 | 8,2 |
| 10 | 9,2 |
| 12 | 10,7 |
| 14 | 12,1 |
| 15 | 12,8 |
| 16 | 13,6 |
| 18 | 15,2 |
| 20 | 17,6 |
| 22 | 20,0 |
| 24 | 22,7 |
| 25 | 23,8 |
| 26 | 25,4 |
| 28 | 27,8 |
| 30 | 31,8 |
| 40 | 55,4 |

Fuente. (Aguilar, 2014)

c) Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)

- **Carga de DQO en el afluente promedio**

Para determinar la carga de DQO en el afluente promedio, se emplea la siguiente fórmula:

$$L_o = S_o \times Q_{ip} \quad (26)$$

Donde:

S_o : DQO afluente (kg/m^3)

Q_{ip} : Gasto afluente promedio ($\text{m}^3/\text{día}$)

- **Volumen del reactor**

Para calcular el volumen del reactor, se tomaron en cuenta los lineamientos de la Comisión Nacional del Agua (2015), que establece que, en climas fríos, con temperaturas entre 16 y 19 °C, el tiempo de retención hidráulica puede variar entre 10 y 14 horas. En este diseño, se adoptó un tiempo de retención hidráulica de 10 horas, el cual se aplica en la siguiente fórmula:

$$V = Q_{ip} \times t \quad (27)$$

Donde:

Q_{ip} : Gasto efluente promedio ($\text{m}^3/\text{día}$)

t : Tiempo de residencia hidráulica (días)

- **Área del reactor**

Para calcular el área del reactor, se asignó un valor fijo de altura de 10 metros, aplicando la siguiente fórmula:

$$A = \frac{V_U}{H} \quad (28)$$

Donde:

V_U : Volumen del reactor (m^3)

H: Altura del reactor (m)

- **Largo del reactor**

El largo del reactor se determina con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{A}{H} \quad (29)$$

Donde:

A: Área del reactor (m²)

H: Altura del reactor (m)

- **Carga hidráulica volumétrica**

La carga hidráulica volumétrica se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$CHV = \frac{Q_{ip}}{V} \quad (30)$$

Donde:

Q_{ip}: Gasto afluente promedio (m³/día)

V: Volumen del reactor (m³)

- **Carga orgánica volumétrica**

La carga orgánica volumétrica se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$COV = \frac{Q_{ip} \times S_o}{V} \quad (31)$$

Donde:

Q_{ip}: Gasto afluente promedio (m³/día)

S_o: DQO afluente (kg/m³)

V: Volumen del reactor (m³)

- **Velocidad de flujo ascendente para Q_{ip}**

La velocidad de flujo ascendente para Q_{ip} se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$v = \frac{Q_{ip}}{A_t} \quad (32)$$

Donde:

Q_{ip} : Gasto afluente promedio ($m^3/día$)

A_t : Área del reactor (m^2)

- **Sistemas de distribución del agua residual**

El número de tubos de distribución de agua residual se calcula considerando un área de influencia de 2 metros cuadrados por cada tubo de distribución, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$Nd = \frac{A_t}{A_d} \quad (33)$$

Donde:

A_t : Área del reactor (m^2)

A_d : Área de influencia por tubo de distribución (m^2)

- **Eficiencia de remoción de la DQO**

La eficiencia de remoción de la DQO del sistema se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$E_{DQP} = 100 \times (1 - 0,70 \times t^{-0,35}) \quad (34)$$

- **Eficiencia de remoción de la DBO**

La eficiencia en la remoción de la DQO del sistema se determina utilizando la siguiente fórmula:

$$E_{DBO} = 100 \times (1 - 0,70 \times t^{-0,50}) \quad (35)$$

- **Estimación de las concentraciones de DQO y DBO en el efluente final**

Las concentraciones de DQO y DBO en el efluente final se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$C_{efl} = S_o - \frac{(E \times S_o)}{100} \quad (36)$$

Donde:

S_o : DQO o DBO afluente (kg/m^3)

E : Eficiencia de remoción de la DQO o DBO

- **Estimación de la producción del metano**

La estimación teórica de la producción de metano se realiza utilizando las siguientes fórmulas:

$$DQO_{CH_4} = Q_{ip} \times [(S_o - C_{efl}) - Y_{obs} \times S_o] \quad (37)$$

$$K(t) = \frac{P \times K_{DQO}}{[R \times (273 + T)]} \quad (38)$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (39)$$

Donde:

Q_{ip} : Gasto afluente promedio ($\text{m}^3/\text{día}$)

S_o : DQO afluente (kg/m^3)

C_{efl} : Concentración de DQO en el efluente final (kg/m^3)

Y_{obs} : coeficiente de producción de sólidos en el sistema, en términos de DQO (0,11 a 0,23 $\text{kg DQO}_{lodo}/\text{kg DQO}_{aplicada}$)

DQO_{CH_4} : Carga de DQO convertida a metano ($\text{kg}/\text{día}$)

P : Presión atmosférica (atm)

K_{DQO} : DQO correspondiente a un mol de CH_4 (g/mol)

R : Constante del gas ($\text{atm} \cdot \text{L}/\text{mol} \cdot \text{K}$)

T : Temperatura de operación del reactor ($^{\circ}\text{C}$)

K(t): Factor de corrección dependiendo de la temperatura de operación del reactor (kg/m³)

- **Estimación de la producción del biogás**

La estimación teórica de la producción de biogás se realiza tomando en cuenta un contenido de metano del 70% en el biogás, como se detalla en la siguiente fórmula:

$$Q_g = \frac{Q_{CH_4}}{0,70} \quad (40)$$

Donde:

Q_{CH₄}: Estimación teórica de metano (m³/día)

- **Longitud del colector de gas**

Para calcular la longitud del colector de gas, se considera una altura de 1 metro y una pendiente de 60°, aplicando la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{hc}{\sin \theta} \quad (41)$$

Donde:

hc: Altura del colector (m)

- **Número de colectores de gas**

El número de colectores de gas se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$Nc = \frac{L}{Z} \quad (42)$$

Donde:

L: Longitud del reactor (m)

Z: Longitud del colector de gas (m)

- **Distancia entre el colector de gas y la pared del reactor**

Para este cálculo, se considera una distancia de 0,7 metros entre los colectores de gas, y se sustituye en la siguiente fórmula:

$$x = \frac{[L - [(z \times Nc) + (0,7 \times 2)]]}{2} \quad (43)$$

Donde:

L: Largo del reactor (m)

Z: Longitud del colector de gas (m)

Nc: Número de colectores de gas

(2): Espacios entre colectores y espacio entre colector y la pared

- **Producción y volumen del lodo**

Para este cálculo, se considera una distancia de 0,7 metros entre los colectores de gas, y se sustituye en la siguiente fórmula:

$$P_L = Y \times DQO_{app} \quad (44)$$

$$V_L = \frac{P_s}{y \times C} \quad (45)$$

Donde:

Y: Coeficiente del rendimiento de sólidos (kg SST/kg DQO)

DQO_{app} o L_o: Carga de DQO en el afluente promedio (kg/día)

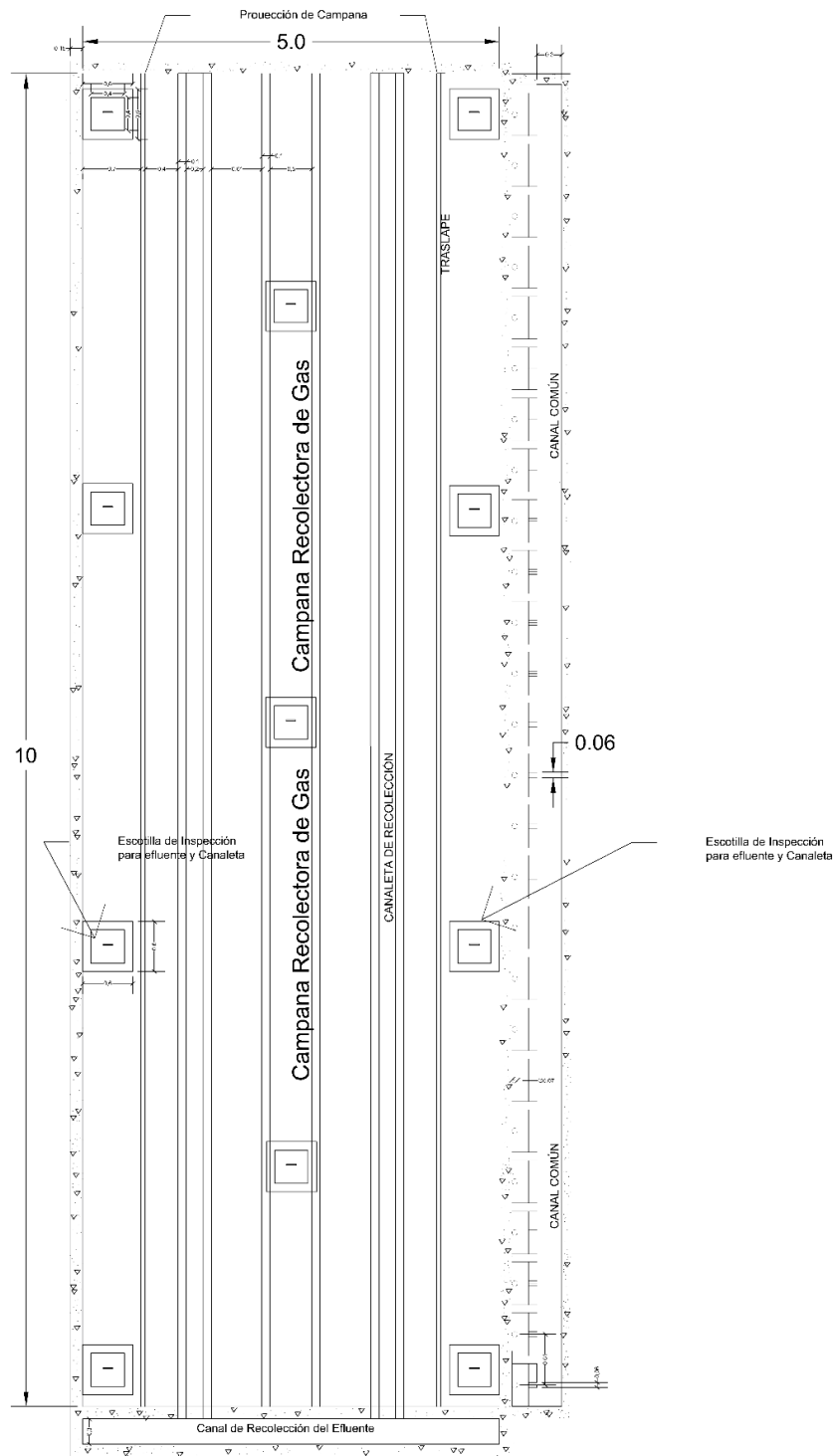
y: Densidad del lodo (kg/m³)

C: Concentración esperada de la descarga del lodo (%)

Anexo 6. Dimensionamiento del sistema de tratamiento

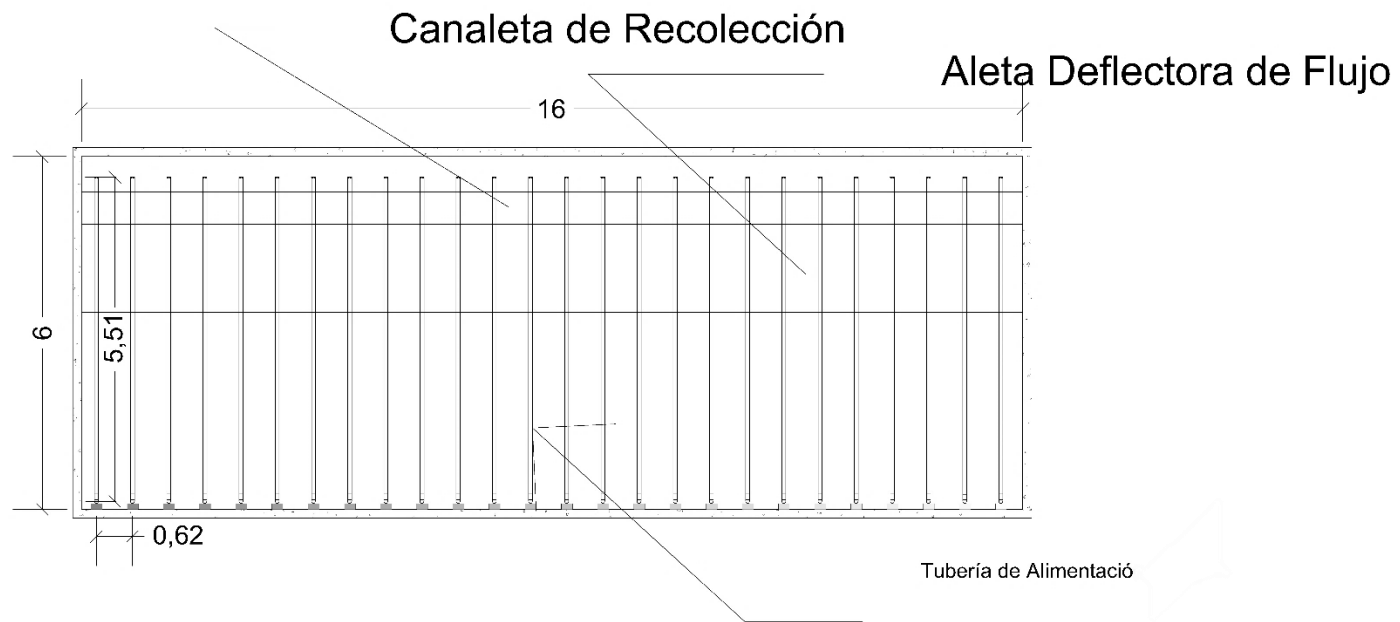
a) Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)

Figura 15. Vista en Planta de Reactor UASB - Campanas Recolectoras de Gas



Fuente. Autor

Figura 16. Vista Longitudinal de Reactor UASB - Canaleta de Recolección y Aletas Deflectoras



Fuente. Autor

Anexo 7. Diseño Tanque Séptico

Los parámetros y valores resultantes del dimensionamiento del tanque séptico se presentan en la Tabla 26, mientras que su estructura se ilustra en la Figura 17 y sus dimensiones se detallan en el Anexo 6.

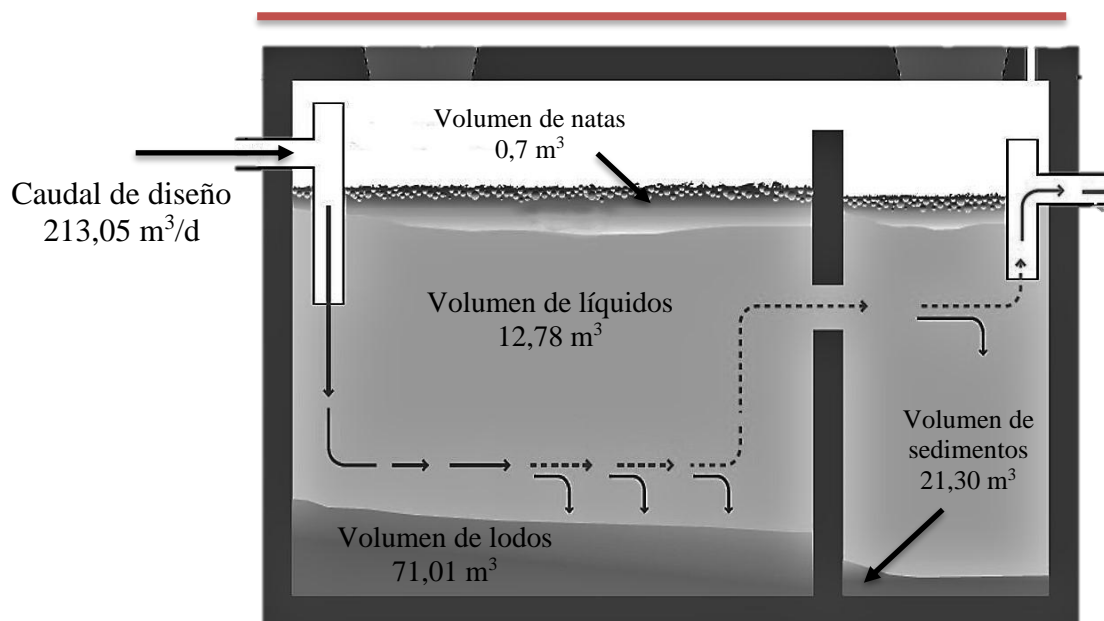
Tabla 27. Dimensionamiento del Tanque Séptico

| Parámetro | Nomenclatura | Valor | Ecuación |
|--|--------------|-----------------------|----------|
| Caudal promedio ($\frac{m^3}{d}$) | Q_p | 213,05 | 1 |
| Tiempo de retención hidráulica (días) | P_r | 0,1 | 46 |
| Volumen de sedimentador (m^3) | V_s | 21,30 | 46 |
| Volumen de almacenamiento de lodos (m^3) | V_d | 71,01 | 47 |
| Volumen de natas (m^3) | V_n | 0,7 | 48 |
| Profundidad máxima de espuma (m) | H_e | $9,03 \times 10^{-3}$ | 53 |
| Volumen útil (m^3) | V_u | 93,02 | 49 |
| Profundidad útil (m) | P_F | 1,2 | 50 |
| Área superficial del tanque (m^2) | A | 77,51 | 50 |
| Profundidad mínima de saturación (m) | H_s | 0,27 | 53 |
| Profundidad de lodo (m) | H_o | 43,41 | 54 |
| Profundidad de espacio libre (m) | H_L | 43,51 | 57 |
| Profundidad de digestión de lodos (m) | H_d | 0,92 | 56 |
| Profundidad total efectiva (m) | H_T | 44,44 | 57 |
| Volumen de tratamiento de líquidos (m^3) | V_l | 12,78 | 51 |
| Volumen total (m^3) | V_t | 105,80 | 52 |

Fuente. Autor

Figura 17. Esquema del Tanque Séptico

Área superficial del tanque 77,51 m²



Fuente. Autor

Una vez calculados los porcentajes de remoción de contaminantes, de acuerdo con las eficiencias sugeridas por la Comisión Nacional del Agua (2015), la Tabla 27 muestra las concentraciones finales de los contaminantes al concluir el proceso de tratamiento en el Tanque Séptico. Se evidencia que los parámetros que inicialmente presentaban valores elevados ahora cumplen plenamente con los límites establecidos en el acuerdo ministerial 097-A sobre las descargas en cuerpos de agua dulce según el Ministerio del Ambiente en Ecuador (MAE, 2015), destacando la efectividad del Tanque Séptico con la ayuda del pretratamiento del Sistema de Flotación por Aire Disuelto (D.A.F.) en la mejora de la calidad del agua tratada.

Tabla 28. Balance de remoción del Tanque Séptico.

| Parámetro | % Remoción | % Seleccionado | Entrada (mg/L) | Salida (mg/L) |
|------------------|------------|----------------|----------------|---------------|
| Aceites y grasas | 50-80 | 60 | 20,04 | 8,02 |
| DQO | 20-40 | 35 | 238,97 | 155,33 |
| DBO ₅ | 30-50 | 40 | 112,4 | 67,44 |

Fuente. Autor

d) Ecuaciones Tanque Séptico

Para los cálculos del tanque séptico, se aplicó un porcentaje de contribución del 6%, considerando que el sistema se instalará en una unidad educativa con una mayor afluencia de personas durante 6 horas al día.

- **Volumen de sedimentación**

Para calcular el volumen del sedimentador donde la dotación tiene un valor de 150, se utiliza en la siguiente fórmula:

$$V_s = \frac{(P_r \times P \times D)}{1000} \times \%contribución \quad (46)$$

Donde:

Vs: volumen de sedimentación (m³)

P: población (habitantes)

D: dotación L/hab.día

P_r: tiempo de retención hidráulica (0,1)

%contribución: 6%

1000 valor para que el resultado exprese metros cúbicos

- **Volumen de lodos**

Para calcular el volumen de lodos, se tomó en cuenta un intervalo de limpieza de 1 año y una producción de lodos en clima frío de 50, el cual se utiliza en la siguiente fórmula:

$$V_{lodo} = \left(\frac{G \times N \times P}{1000} \right) \times \%contribución \quad (47)$$

Donde:

G: producción de lodos (L/año.hab)

N: intervalo de limpieza (año)

P: población 23672

- **Volumen de natas**

Volumen de natas por teoría de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2015) se utiliza en la siguiente fórmula:

$$V_n = 0,7 \quad (48)$$

Donde:

V_n: volumen de natas (m³)

- **Volumen útil**

Para calcular el volumen útil, se utiliza en la siguiente fórmula:

$$V_T = V_s + V_d + V_n \quad (49)$$

Donde:

V_T: volumen útil (m³)

V_s: volumen de sedimentación (m³)

V_d: volumen de lodos (m³)

V_n: volumen de natas (m³)

- **Área superficial del tanque**

Para calcular el área superficial del tanque, se tomó en cuenta una profundidad útil de 1,2, el cual se utiliza en la siguiente fórmula:

$$A_{ts} = \frac{V_{el}}{H_a} \quad (50)$$

Donde:

A: área superficial del tanque (m²)

V_T: volumen total (m³)

P_F: profundidad útil (m)

- **Volumen de tratamiento de líquidos**

Para calcular el volumen del sedimentador, se tomó en cuenta un periodo de retención hidráulica de 1 día. El tiempo de retención hidráulica (TRH) en un pozo séptico generalmente se establece entre 1 y 3 días porque este rango permite un equilibrio adecuado entre la sedimentación de sólidos y la degradación anaerobia de la materia orgánica, sin generar problemas operativos, el cual se utiliza en la siguiente fórmula:

$$V_S = (Q_p \times R) \quad (51)$$

Donde:

Q_p : caudal a tratar (m^3/d)

R : período de retención hidráulica (d)

%contribución: 6%

- **Volumen total**

Para calcular el volumen útil, se utiliza en la siguiente fórmula:

$$V = V_T + V_l \quad (52)$$

Donde:

V : volumen total del tanque séptico

V_T : volumen útil

V_l : volumen de líquidos

- **Profundidad máxima de espuma**

Para calcular la profundidad máxima de espuma, se utiliza en la siguiente fórmula:

$$H_e = \frac{0,7}{A} \quad (53)$$

Donde:

H_e : profundidad máxima de espuma (m)

A : área superficial del tanque (m^2)

- **Profundidad de lodo**

Para calcular la profundidad de lodo, se utiliza en la siguiente fórmula:

$$H_o = 0,82 - 0,26 \times A \quad (54)$$

Donde:

H_o: profundidad de lodo (m)

A: área superficial del tanque (m²)

- **Profundidad de saturación**

Para calcular la profundidad de saturación, se utiliza en la siguiente fórmula:

$$H_s = \frac{V_s}{A} \quad (55)$$

Donde:

H_s: profundidad de saturación (m)

A: área superficial del tanque (m²)

V_s: volumen de sedimentación (m³)

- **Profundidad de digestión de lodos**

Para calcular la profundidad de digestión de lodos, se utiliza en la siguiente fórmula:

$$H_d = \frac{V_d}{A} \quad (56)$$

Donde:

H_d: profundidad de digestión de lodos (m)

A: área superficial del tanque (m²)

V_d: volumen de lodos (m³)

- **Profundidad de espacio libre**

Para calcular la profundidad de espacio libre, se utiliza en la siguiente fórmula:

$$H_L = 0,1 + H_o \quad (57)$$

Donde:

H_L : profundidad de espacio libre (m)

H_o : profundidad de lodo (m)

- **Profundidad total efectiva**

Para calcular la profundidad total efectiva, se utiliza en la siguiente fórmula:

$$H_T = H_e + H_d + H_L \quad (58)$$

Donde:

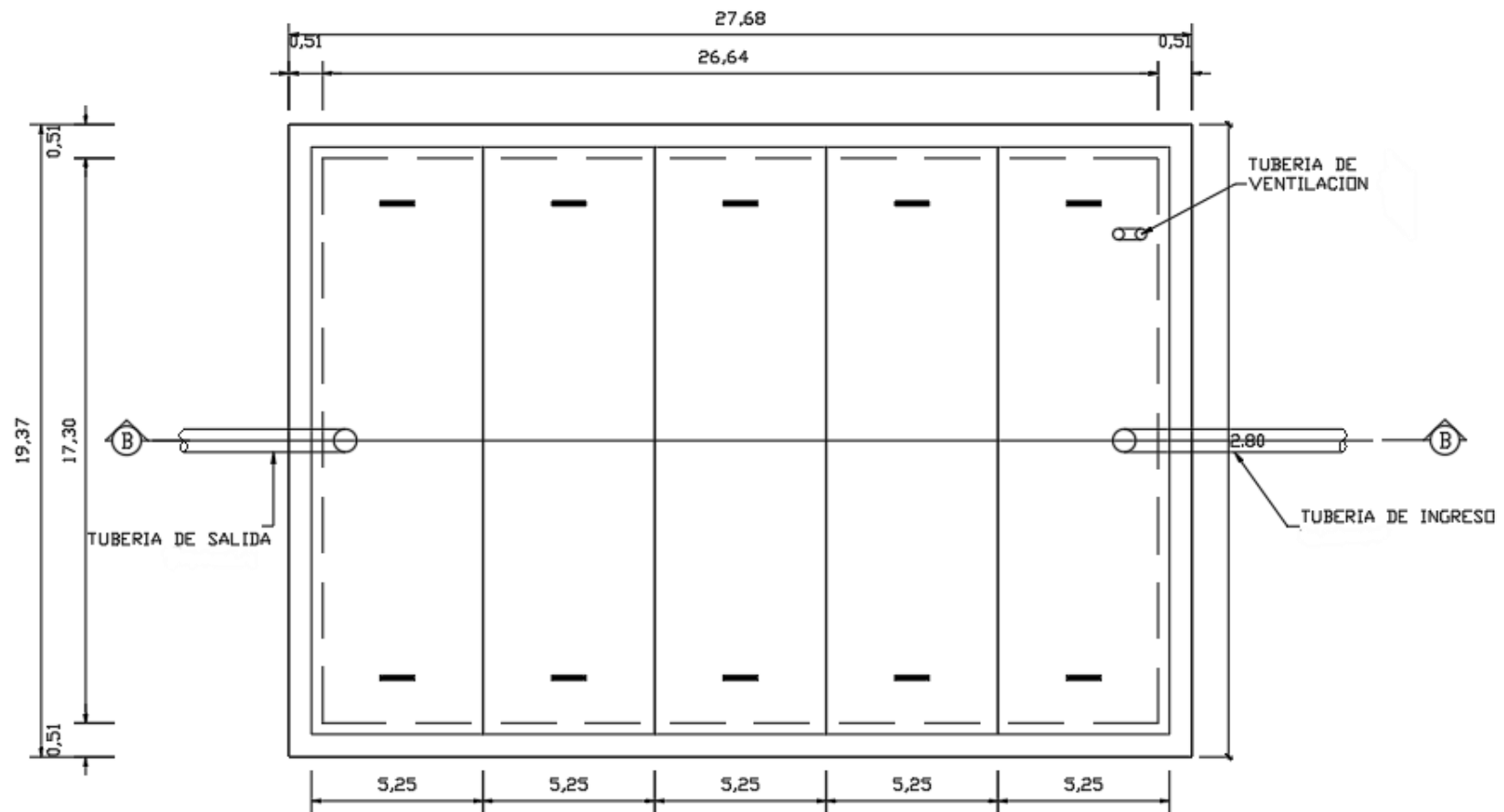
H_L : profundidad de espacio libre (m)

H_d : profundidad de digestión de lodos (m)

H_e : profundidad máxima de espuma (m)

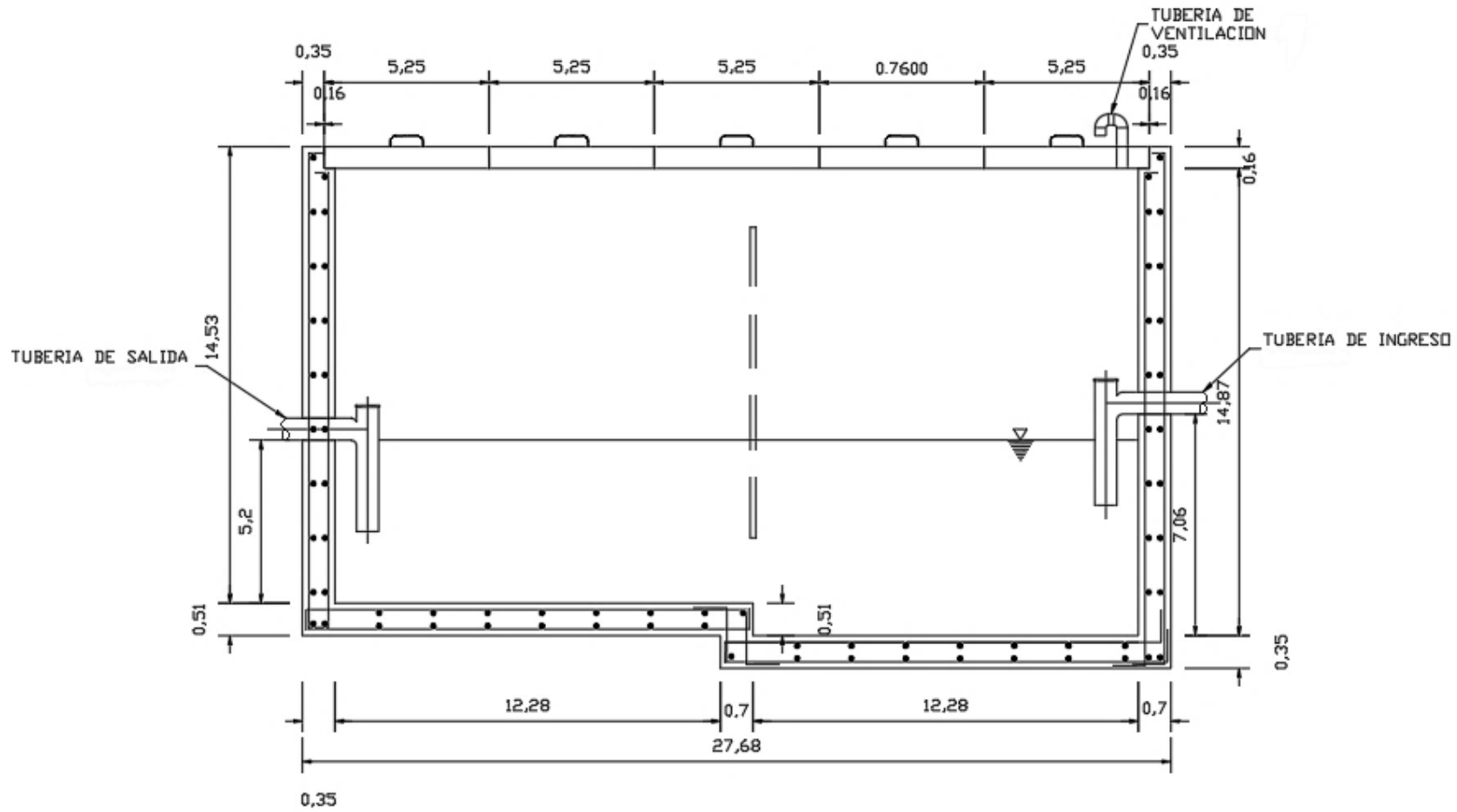
Dimensionamiento del Tanque Séptico

Figura 18. Esquema Técnico de Tanque Séptico



Fuente. Autor

Figura 19. Vista Lateral del Tanque Séptico



Fuente. Autor