Universidad Nacional de Ingeniería

Área del Conocimiento de Agricultura

DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES EN ZONAS RURALES Y PERIURBANAS DE NICARAGUA

Trabajo Monográfico para optar al título de

Ingeniero Químico

Elaborado por:

Br. Freda Isabella Manzanares Hernández

2019-0938U

Br. Wennifer Dasmelly Hernández González

2019-0891U

Tutor:

MSc. Sergio Enrique Álvarez García

24 de Julio del 2026

Managua, Nicaragua

Agradecimiento

Agradezco primeramente a Dios, por ser mi guía constante, por darme fortaleza en los momentos difíciles, por brindarme sabiduría y serenidad en cada etapa de este camino. Sin su presencia y bendiciones, este logro no habría sido posible.

A mi compañera de tesis, Wennifer Hernández, por su compromiso, apoyo constante y colaboración durante todo este proceso. Su dedicación y compañerismo fueron fundamentales para superar los retos y alcanzar este logro.

A los docentes con quienes tuve el privilegio de aprender, por su dedicación, guía y sabiduría. Su orientación ha sido fundamental para el desarrollo de esta investigación. La pasión que demostró por la enseñanza y el profundo conocimiento que compartieron ha dejado una huella imborrable en mi formación académica.

Br. Freda Isabella Manzanares Hernández

2019-0938U

Agradecimiento

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi inspiración en cada paso de este camino. Sin Su apoyo espiritual y su luz, este logro no habría sido posible. También agradezco de manera especial a mi compañera de tesis, Freda Manzanares, cuya dedicación, compromiso y apoyo incondicional han sido fundamentales para superar los retos de este proceso. Su colaboración y amistad hicieron que cada obstáculo fuera más llevadero y cada avance, motivo de celebración. A mi familia y amigos, quienes, con su constante aliento, palabras de ánimo y compañía me brindaron el respaldo emocional necesario para seguir adelante en los momentos de dificultad y cansancio; su presencia fue un verdadero sostén para mí.

Igualmente, quiero agradecer a mis maestros, quienes, con su entrega, paciencia y sabiduría, no solo compartieron sus conocimientos, sino que también fomentaron en mí el deseo de crecer y aprender continuamente. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi formación académica y personal. A todos los que me acompañaron en este recorrido, ya sea con apoyo moral, intelectual o simplemente con su presencia, les extiendo mi más sincero agradecimiento; este logro es también el reflejo de su confianza y apoyo constante.

Br. Wennifer Dasmelly Hernández González

2019-0891U

Dedicatoria

Con profunda gratitud y humildad, dedico este trabajo primero y ante todo a Dios, quien con su amor infinito y su guía constante ha sido la luz que ha iluminado cada paso de este camino. Sin Su presencia, fuerza y bendiciones, nada de esto habría sido posible. A él le entrego este logro como muestra de mi fe y agradecimiento por acompañarme en cada momento, en las alegrías y en las dificultades

A mi madre, Lianuzca Hernández, por ser mi ejemplo de fortaleza, amor incondicional y entrega. Gracias por cada sacrificio que has realizado por mí, cada palabra de aliento y oración que me sostuvo, te amo y extraño mucho.

A mi hermana María Marenco, por ser mi guía, mi amiga incondicional y mi apoyo en los momentos de dificultad y duda; tu sabiduría, tu entrega y tu presencia constante han sido ejemplo en mi camino.

A mi hermana menor, Zoé Manzanares, y a mi sobrino Marzel Flores, por llenar mis días de alegría y risas, motivándome a seguir adelante y a construir un futuro mejor.

Y a mis seres queridos que ya no están físicamente conmigo, en especial a mi padre, Alfredo César Manzanares. Su recuerdo, su amor y todo lo que dejaron en mi corazón han sido mi fuerza silenciosa a lo largo de este camino. Confío en que, dondequiera que estén, se sientan orgullosos. Este logro también les pertenece, así como a todas las personas que creyeron en mí y me brindaron su apoyo justo cuando más lo necesitaba.

Los amo profundamente. Cada uno de ustedes es parte de este camino y de este logro.

Br. Freda Isabella Manzanares Hernández

2019-0938U

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía, mi fuerza y mi esperanza constante. Porque sin él, nada de esto habría sido posible. Su amor me sostuvo en cada paso y me dio la luz necesaria para seguir adelante, incluso cuando el camino se tornó difícil.

A mi papá Víctor Hernández, cuya fuerza y dedicación han sido faro y ejemplo en mi vida.

A mi mamá Claudia González, y a mi mamá Leo, por su amor infinito, por cuidarme con el alma y enseñarme el valor de la entrega y la fe.

A mis hermanos, que con su compañía, cariño y complicidad llenan mi vida de sentido.

A toda mi familia y a las personas que me han acompañado en este viaje, que con sus palabras, gestos y apoyo motivaron a crecer y ser mejor persona.

Este logro también es suyo, porque en cada paso sentí su presencia, su aliento y su amor.

Gracias, con todo mi corazón.

Br. Wennifer Dasmelly Hernández González

2019-0891U

Resumen

La presente tesis tiene como objetivo principal diseñar sistemas unifamiliares de tratamiento de aguas residuales domésticas adecuados para viviendas en zonas rurales y periurbanas de Nicaragua. El estudio se realizó en Teustepe, Boaco, donde se identificaron deficiencias significativas en la gestión de aguas residuales, destacando una alta dependencia de letrinas y vertidos directos al ambiente. A partir de un diagnóstico técnico, social y económico, se evaluaron diferentes tecnologías apropiadas, priorizando criterios como eficiencia, bajo costo, facilidad de mantenimiento y adaptación al contexto local. Se diseñaron cuatro alternativas tecnológicas: Fosa séptica, filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), sistema combinado (Fosa + FAFA), y biodigestor de flujo continuo, todas complementadas con pozo de absorción. La evaluación ambiental se realizó mediante matrices de impacto y análisis cualitativo, evidenciando que las soluciones descentralizadas propuestas permiten una mejora significativa en la protección del recurso hídrico y la salud pública. Finalmente, se recomiendan acciones de sensibilización comunitaria y financiamiento accesible para garantizar la implementación sostenible de los sistemas diseñados.

Índice

I. Introducción 1
II. Objetivos 3
2.1. Objetivo General 3
2.2. Objetivos Específicos 3
III. Marco Teórico 4
3.1. Características socioeconómicas, ambientales y culturales de la población de zonas rurales y periurbanas en relación con la gestión de aguas residuales. 4
3.1.1. Infraestructura y Saneamiento en Nicaragua 4
3.1.2. Aspectos Culturales y Educativos 4
3.1.3. Aspectos Geográficos y Climáticos 5
3.1.4. Aspectos Socioeconómicos y Demográficos 5
3.1.5. Educación y Capacitación 5
3.1.6. Políticas y Regulaciones 6
3.1.7. Participación Comunitaria y Cultura 6
3.2. Alternativas Tecnológicas en Tratamiento de Aguas Residuales 7
3.2.1. Fundamentos del Tratamiento de Aguas Residuales 7
3.2.2. Fosa Séptica 7
3.2.3. Filtros Biológicos 9
3.2.4. Combinación de Fosa Séptica y Filtros Biológicos 10
3.2.5. Biodigestores Unifamiliares 14
3.3. Consideraciones de Diseño para cada Prototipo Propuesto 16
3.3.1. Fosa Séptica 16
3.3.2. Filtros Biológicos 17
3.3.3. Combinación de Fosa Séptica y Filtros Biológicos 17
3.3.4. Biodigestores Unifamiliares 17
3.4. Criterios de Evaluación de Alternativas Tecnológicas en Tratamiento de Aguas Residuales en el Contexto Nicaragüense. 18
3.4.1. Contexto Nicaragüense 19
3.5. Evaluación de Impacto Ambiental de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. 19

3.5.1. Elementos de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) 19
3.5.2. Impacto Ambiental de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales .. 20
3.5.3. Normativas y Estándares 20
3.5.4. Herramientas y Métodos para la EIA 20
IV. Diseño Metodológico 21
4.1. Tipo de Investigación 21
4.2. Diseño de Investigación 21
4.3. Determinación del Universo de Estudio 21
4.4. Metodología para la Ejecución de la Investigación 22
4.4.1. Análisis de las características y Necesidades Específicas de las Zonas Rurales y Periurbanas en Nicaragua en Relación con la Gestión de Aguas Residuales 23
4.4.2. Diseño de Prototipos para cada una de las Cuatro Alternativas Tecnológicas Propuestas 23
4.4.3. Simulación del Desempeño Técnico y Validación Funcional 50
4.4.4. Evaluación de la Eficiencia, Sostenibilidad, Adaptabilidad y Asequibilidad de cada Alternativa en el Contexto Nicaragüense 51
4.4.5. Análisis de Impacto Ambiental de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas 52
V. Análisis y Discusión de Resultados 53
5.1. Identificación de las Necesidades y Características de las Viviendas Unifamiliares en Zonas Rurales y Periurbanas de Nicaragua en Relación con la Gestión de Aguas Residuales. 53
5.1.1. Diagnostico Nacional de Saneamiento en Zonas Rurales y Periurbanas 54
5.1.2. Descripción del sitio de estudio 59
5.1.3. Condiciones Físicas y Ambientales para la Implementación de Tecnologías Descentralizadas. 70
5.1.4. Análisis Ambiental para Sistemas Descentralizados de Tratamiento de Aguas Residuales en Teustepe 71
5.2. Desarrollo de Modelos para cada Alternativa Tecnológica de Tratamiento de Aguas Residuales 73
5.2.1. Fosa Séptica 73
5.2.2. Filtro Biológico de Flujo Ascendente 84

5.2.3. Sistema Combinado 94
5.2.4. Biodigestor Unifamiliar 105
5.3. Simulación en Excel 113
5.4. Evaluación Funcional de Alternativas Tecnológicas para el Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales. 114
5.4.1. Capacidad de Remoción de Contaminantes 114
5.4.2. Estabilización Operativa y Adaptabilidad Frente a Variaciones de Carga 116
5.4.3. Vulnerabilidades Técnicas e Impactos por Fallas de Operación 118
5.4.4. Estudio Económico 120
5.4.5. Requerimientos de Espacios, Materiales y Disponibilidad Local 123
5.5. Priorización Tecnológica y Selección de Sistemas por Tipología de Vivienda 125
5.5.1. Tipología de Vivienda Identificadas 126
5.5.2. Criterios de Selección de Tecnología 126
5.5.3. Tabla de Priorización Tecnológica por Tipología 128
5.6. Validación Técnica Normativa y Contribución al Desarrollo Local 130
5.6.1. Cumplimiento de los Parámetros del Decreto 21-2017 para Vertidos ... 130
5.6.2. Contribución a los ODS y a la Política Nacional de Saneamiento 131
5.6.3. Aportaciones Técnicas del Estudio a Procesos de Escalamiento y Replica. 132
5.7. Evaluación de Impactos Ambientales Potenciales de las Alternativas Tecnológicas 133
5.7.1. Identificación de Impactos Ambientales Asociados al Ciclo de Vida del Sistema 133
5.7.2. Criterios para la Clasificación Ambiental según Decreto 20-2017 136
5.7.3. Medidas de Mitigación y Gestión Ambiental Propuesta 136
5.7.4. Compatibilidad Ambiental y Viabilidad Territorial de los Sistemas 137
VI. Conclusiones 138
6.1. Diagnóstico del Contexto Habitacional y Sanitario de Teustepe 138
6.2. Diseño Técnico Funcional de Cuatro Alternativas Tecnológicas Adaptadas al Contexto Rural 139

6.3. Evaluación Comparativa del Desempeño Técnico de los Sistemas Propuestos 139
6.4. Impacto Ambiental y Conformidad Normativa de las Alternativas Evaluadas. 140
6.5. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y Políticas Nacionales de Saneamiento. 140
VII. Recomendaciones 141
VIII. Bibliografía 142
IX. Anexos 146
Anexo I 146
Anexo II 149
Anexo III. 154
Anexo IV 155
Anexo V. 159
5.1. Línea base del área de estudio 159
5.2. Descripción del proyecto 159
5.3. Identificación de Impactos 162
5.4. Medidas de mitigación 164
5.5. Plan de Monitoreo 164
5.6. Plan de emergencia 164
5.7. Beneficios potenciales 165
5.8. Normativas y Estándares 165

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Teustepe, Municipio de Boaco 60
Ilustración 2. Uso del suelo del municipio 61
Ilustración 3. Mapa Hidrológico de Teustepe 63

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación de las características de viviendas unifamiliares en zonas rurales y periurbanas de Nicaragua..... 56

Tabla 2. Indicadores de viviendas y saneamiento en Teustepe vs promedios nacionales rurales. 65

Tabla 3. Análisis ambiental para sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en el Municipio de Teustepe: Clima, suelos, hidrología y contexto socio sanitario. 72

Tabla 4. Dimensionamiento hidráulico y geométrico para el sistema de Fosa Séptica con Pozo de Absorción. 77

Tabla 5. Dimensionamiento hidráulico y geométrico para el FAFA con Pozo de Absorción 88

Tabla 6. Dimensionamiento hidráulico y geométrico para el Sistema Combinado con Pozo de Absorción..... 97

Tabla 7. Dimensionamiento hidráulico y geométrico para el sistema de Biodigestor unifamiliar con Pozo de Absorción 107

Tabla 8. Comparación de eficiencia de remoción de contaminantes por sistema de tratamiento..... 115

Tabla 9. Resumen comparativo de costos y beneficios 122

Tabla 10. Comparación entre espacio requerido, materiales accesibles, profundidad estimada y capacitación adicional. 125

Tabla 11. Selección de tratamiento según el acápite 5.3 127

Tabla 12. Priorización Tecnológica por Tipología de Vivienda..... 129

Tabla 13. Resultados de vertidos de cada sistema de tratamiento en comparación con los valores permisibles del decreto 21-2017. 130

Tabla 14. Resumen de los principales impactos generales potenciales identificados junto a su evaluación correspondiente mediante en un matiz Leopold 135

Tabla 15. Valores típicos de la composición de aguas residuales domésticas y porcentajes de remoción..... 154

Tabla 16. Costos totales de la fosa séptica..... 155

Tabla 17. Costos totales del FAFA..... 156
Tabla 18. Costos totales del biodigestor 157
Tabla 19. Costos totales del sistema combinado 158
Tabla 20. Impactos positivos y negativos..... 162
Tabla 21. Plan de monitoreo 164
Tabla 22. Beneficios potenciales..... 165

Índice de Ecuaciones

Ec 1. Población futura 24
Ec 2. Caudal de aporte unitario de aguas residuales 24
Ec 3. Caudal de aguas residuales 25
Ec 4. Tiempo de retención hidráulica 25
Ec 5. Volumen total de la fosa séptica 25
Ec 6. Volumen de sedimentación 26
Ec 7. Volumen de digestión y almacenamiento de lodos 26
Ec 8. Volumen de natas 26
Ec 9. Área de la fosa séptica 27
Ec 10. Profundidad máxima de espuma sumergida 28
Ec 11. Profundidad libre de lodo 28
Ec 12. Profundidad mínima requerida para la sedimentación 28
Ec 13. Carga orgánica 31
Ec 14. Carga orgánica per cápita 31
Ec 15. Carga orgánica volumétrica 31
Ec 16. Carga superficial 32
Ec 17. Volumen efectivo del filtro 32
Ec 18. Volumen total del filtro 33
Ec 19. Eficiencia de remoción 33
Ec 20. Volumen de espacios requeridos 33
Ec 21. Volumen del medio filtrante 34
Ec 22. Altura total del filtro 34
Ec 23. Área superficial del filtro 34
Ec 24. Área total del filtro 35
Ec 25. Geometría redonda 35
Ec 26. Geometría cuadrada 35
Ec 27. Lodos generados por solidos suspendidos totales 36
Ec 28. Volumen de lodos por SST 36
Ec 29. Lodos por DQO 36
Ec 30. Volumen de lodos generados por DQO 37

Ec 31. Volumen generado de lodo en un día 37
Ec 32. Concentración de DBO esperada en el efluente 37
Ec 33. Tiempo de retención hidráulica para fosa séptica 40
Ec 34. Tiempo de retención hidráulica para FAFA 41
Ec 35. Volumen del biodigestor 42
Ec 36. Volumen líquido teórico 42
Ec 37. Volumen liquido 43
Ec 38. Volumen gaseoso 43
Ec 39. Altura del biodigestor 43
Ec 40. Área superficial del biodigestor 43
Ec 41. Volumen requerido para la digestión y almacenamiento de lodos 44
Ec 42. Profundidad requerida para la digestión y almacenamiento 44
Ec 43. Profundidad de alimentación en el biodigestor 44
Ec 44. Altura del biodigestor 45
Ec 45. Altura de deflectores 45
Ec 46. Cálculo de solidos totales 45
Ec 47. Cálculo de solidos volátiles 45
Ec 48. Producción de biogás 45
Ec 49. Tasa de producción de biogás 46
Ec 50. Cálculo del DBO removido 46
Ec 51. Volumen total de lodos producidos 46
Ec 52. Dimensionamiento de la caja de registro 47
Ec 53. Caudal de entrada en el pozo de absorción 48
Ec 54. Área de infiltración 48
Ec 55. Profundidad útil del pozo de absorción 48
Ec 56. Volumen de lodos en el pozo de absorción 49
Ec 57. Profundidad de lodos en el pozo de absorción 49
Ec 58. Area de fondo 49
Ec 59. Área del pozo 50

Índice de Planos

Plano 1. Plano Técnico de Fosa Séptica con Pozo de Absorción para Vivienda Unifamiliar 82
Plano 2. Plano técnico de FAFA con pozo de absorción para vivienda unifamiliar. 92
Plano 3. Plano técnico del sistema combinado con pozo de absorción para vivienda unifamiliar. 103
Plano 4. Plano técnico del biodigestor unifamiliar de flujo continuo con pozo de absorción para una vivienda unifamiliar. 112

I. Introducción

En Nicaragua, particularmente en las zonas rurales y periurbanas, persiste una problemática estructural relacionada con el inadecuado tratamiento de aguas residuales domésticas. Esta situación representa una amenaza constante para la salud pública y el equilibrio ecológico, al tiempo que evidencia una brecha significativa en la cobertura de servicios básicos de saneamiento. La inexistencia de sistemas centralizados y la dispersión geográfica de muchas comunidades imponen desafíos técnicos y logísticos que exigen soluciones adaptadas al entorno.

Durante las últimas décadas, diversas iniciativas han buscado mitigar esta problemática mediante la implementación de tecnologías descentralizadas. Sin embargo, muchas de estas experiencias carecen de criterios de diseño adecuados al contexto, presentan costos elevados o demandan capacidades de operación y mantenimiento que las comunidades no siempre poseen. En este sentido, la ingeniería sanitaria enfrenta el reto de desarrollar soluciones eficientes, sostenibles y replicables, capaces de integrarse armónicamente con las condiciones locales.

La investigación se desarrolla en el municipio de Teustepe, ubicado en el departamento de Boaco, Nicaragua, una zona representativa por sus condiciones rurales y periurbanas, donde el acceso a servicios de saneamiento es limitado. El estudio aborda el diseño de sistemas unifamiliares de tratamiento de aguas residuales domésticas, considerando tanto parámetros técnicos como económicos, ambientales y socioculturales. Se analizan cuatro tecnologías con potencial de implementación en viviendas fuera del alcance de redes de alcantarillado: fosas sépticas, filtros biológicos (tipo FAFA), biodigestor unifamiliar y un sistema combinado (Fosa séptica + FAFA). Estas alternativas se comparan con base en su rendimiento hidráulico y biológico, facilidad de instalación, mantenimiento requerido y adaptabilidad territorial.

A partir de un levantamiento de información contextual en Teustepe, se desarrollan modelos de diseño que responden a las condiciones topográficas,

climáticas y estructurales del área. Además, se realiza una estimación detallada de los costos de construcción de cada sistema, con el fin de identificar la alternativa más viable en términos de eficiencia, asequibilidad y sostenibilidad a largo plazo.

La propuesta no se limita al dimensionamiento hidráulico de las unidades, sino que incorpora el análisis del impacto ambiental potencial y la verificación del cumplimiento con normativas nacionales e internacionales en materia de saneamiento. Así, esta monografía contribuye al desarrollo de soluciones ingenieriles integrales, contextualizadas y con potencial de ser escaladas como parte de estrategias para cerrar la brecha de saneamiento en Nicaragua.

II. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar sistemas unifamiliares de tratamiento de aguas residuales domesticas adecuados para viviendas en zonas rurales y periurbanas de Nicaragua.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar las necesidades y características de las viviendas unifamiliares en zonas rurales y periurbanas de Nicaragua en relación con la gestión de aguas residuales.
- Evaluar las alternativas tecnológicas propuestas (Fosa Séptica, Filtros Biológicos, y Biodigestores Unifamiliares) en términos de eficiencia, implementación y operación.
- Desarrollar modelos para cada alternativa tecnológica, considerando las condiciones geográficas, climáticas y socioeconómicas de las zonas rurales y periurbanas de Nicaragua.
- Evaluar el posible impacto ambiental potencial de cada sistema de tratamiento sugerido, asegurando la conformidad con las normativas y estándares locales e internacionales.

III. Marco Teórico

3.1. Características socioeconómicas, ambientales y culturales de la población de zonas rurales y periurbanas en relación con la gestión de aguas residuales.

Según el Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE) de Nicaragua, se caracterizan por una baja densidad poblacional y actividades económicas centradas en la agricultura y ganadería. Las zonas periurbanas, por otro lado, son áreas de transición entre zonas urbanas y rurales, a menudo con características mixtas de ambas.

Dinámicas Socioeconómicas: Las zonas rurales y periurbanas a menudo enfrentan desafíos socioeconómicos distintos a las áreas urbanas, incluyendo niveles más altos de pobreza, menor acceso a servicios básicos y educación, y una mayor dependencia de los recursos naturales (PNUD, Informes Nacionales).

3.1.1. Infraestructura y Saneamiento en Nicaragua

Estado Actual del Saneamiento: Estudios del Banco Mundial y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) han señalado que Nicaragua tiene un déficit significativo en infraestructura de saneamiento, especialmente en zonas rurales y periurbanas.

Desafíos en la Gestión de Aguas Residuales: La falta de sistemas de tratamiento adecuados, la liberación directa de aguas residuales al medio ambiente y la contaminación de fuentes de agua son problemas comunes en estas áreas (INAA, Informes Anuales).

3.1.2. Aspectos Culturales y Educativos

Conciencia Ambiental: La percepción y conciencia sobre la importancia del tratamiento adecuado de aguas residuales puede variar en zonas rurales y periurbanas. La educación y la cultura juegan un papel crucial en la gestión y tratamiento de aguas residuales (MINED, Programas de Educación Ambiental).

Prácticas Tradicionales: En algunas áreas, las prácticas tradicionales y las creencias culturales pueden influir en la gestión de aguas residuales y excretas.

Es esencial comprender y respetar estas prácticas al proponer soluciones (CIPAF, Estudios Culturales).

3.1.3. Aspectos Geográficos y Climáticos

Topografía y Geografía: Nicaragua, con su diversidad geográfica, presenta desafíos específicos para la implementación de sistemas de tratamiento. La topografía, la calidad del suelo y la proximidad a cuerpos de agua son factores clave a considerar (INETER, Estudios Geográficos).

Clima: El clima tropical de Nicaragua, con sus estaciones de lluvia y sequía, puede influir en la eficiencia y operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Es esencial diseñar sistemas que sean resilientes a estas variaciones climáticas (MARENA, Informes Climáticos).

3.1.4. Aspectos Socioeconómicos y Demográficos

Distribución y Densidad Poblacional: Las zonas rurales y periurbanas en Nicaragua presentan una distribución poblacional dispersa, lo que puede complicar la implementación de sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales. La densidad poblacional y la estructura familiar, como el tamaño promedio de las familias, son factores determinantes en el diseño de sistemas adecuados (INIDE, Censos Nacionales).

Niveles de Pobreza: Las limitaciones económicas en estas áreas pueden influir en la capacidad de las comunidades para invertir en infraestructura de saneamiento. Además, la pobreza puede llevar a la priorización de necesidades inmediatas sobre inversiones a largo plazo como el saneamiento (PNUD, Informes sobre Desarrollo Humano).

3.1.5. Educación y Capacitación

Niveles de Escolarización: Las zonas rurales y periurbanas pueden presentar niveles de escolarización más bajos en comparación con áreas urbanas. La educación es un factor clave para la adopción y mantenimiento de sistemas de tratamiento, así como para la comprensión de la importancia del saneamiento (MINED, Estadísticas Educativas).

Programas de Capacitación: La implementación exitosa de sistemas de tratamiento requiere no solo la instalación física, sino también la capacitación de la comunidad en su operación y mantenimiento. Las iniciativas previas de capacitación y su éxito pueden ofrecer lecciones valiosas (OPS/OMS, Programas de Capacitación en Saneamiento).

3.1.6. Políticas y Regulaciones

Normativas Nacionales: El Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INAA) y el Ministerio de Salud (MINSA) han establecido normativas y directrices relacionadas con el saneamiento y el tratamiento de aguas residuales. Estas regulaciones definen estándares mínimos y prácticas recomendadas (INAA, Normativas de Saneamiento).

Iniciativas y Proyectos Previos: La revisión de proyectos e iniciativas anteriores en el ámbito del saneamiento en zonas rurales y periurbanas puede ofrecer insights sobre desafíos enfrentados, soluciones implementadas y resultados obtenidos. Estos antecedentes pueden informar y enriquecer propuestas futuras (Banco Mundial, Proyectos de Saneamiento en Nicaragua).

3.1.7. Participación Comunitaria y Cultura

Importancia de la Participación Comunitaria: La adopción y éxito de cualquier sistema de tratamiento dependen en gran medida de la aceptación y participación de la comunidad. Entender las dinámicas comunitarias, las estructuras de liderazgo y las actitudes hacia el saneamiento es esencial (UNICEF, Estudios sobre Participación Comunitaria).

Aspectos Culturales: Las creencias, tradiciones y prácticas culturales pueden influir en la percepción y actitud hacia el saneamiento. Es crucial que cualquier intervención sea culturalmente sensible y adaptada a las particularidades de la comunidad (CIPAF, Estudios Culturales en Nicaragua).

3.2. Alternativas Tecnológicas en Tratamiento de Aguas Residuales

3.2.1. Fundamentos del Tratamiento de Aguas Residuales

Principios Básicos: El tratamiento de aguas residuales se basa en procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar o reducir contaminantes. Estos procesos buscan proteger la salud pública y el medio ambiente (Metcalf & Eddy, "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse").

Tipos de Tratamiento: Existen diferentes niveles de tratamiento: primario (sedimentación), secundario (procesos biológicos) y terciario o avanzado (remoción de nutrientes y desinfección) (Tchobanoglous et al., "Wastewater Engineering").

3.2.2. Fosa Séptica

Definición y Funcionamiento: Una fosa séptica es un sistema de tratamiento primario que utiliza procesos anaeróbicos para tratar las aguas residuales. Los sólidos se sedimentan y se descomponen parcialmente, mientras que el líquido sobrenadante puede requerir tratamiento adicional (EPA, "Design Manual: Onsite Wastewater Treatment and Disposal Systems").

Ventajas y Desafíos: Las fosas sépticas son relativamente simples y económicas, pero requieren mantenimiento regular y no son adecuadas para todas las condiciones geográficas o del suelo.

- **Influencia de la cinética de los procesos físicos, químicos y microbiológicos.**

La cinética de los procesos físicos, químicos y microbiológicos juega un papel crucial en el diseño y operación de una fosa séptica. Estos procesos determinan la eficiencia con la que los contaminantes son removidos y, por ende, la calidad del efluente. A continuación, se describe cómo influyen estos procesos cinéticos en el funcionamiento de una fosa séptica:

Procesos Físicos

Sedimentación: Las partículas más pesadas que el agua tienden a sedimentar en el fondo de la fosa. La velocidad de sedimentación depende del tamaño y

densidad de las partículas. Si la fosa séptica no tiene un tiempo de retención adecuado, las partículas no tendrán tiempo suficiente para sedimentar y podrían ser arrastradas al efluente.

Flotación: Materiales menos densos que el agua, como grasas y aceites, tienden a flotar. La velocidad con la que estos materiales ascienden a la superficie puede influir en la necesidad de dispositivos de retención o trampas de grasa.

Procesos Químicos

Hidrólisis: Muchos compuestos orgánicos complejos no son directamente biodisponibles para los microorganismos. La hidrólisis es un proceso químico que rompe estos compuestos en moléculas más pequeñas que pueden ser utilizadas por los microorganismos. La velocidad de este proceso puede influir en la eficiencia de la digestión anaeróbica.

Neutralización: Las reacciones químicas en la fosa pueden alterar el pH. Un pH equilibrado es esencial para la actividad microbiana. Si las reacciones químicas alteran rápidamente el pH, puede inhibir la actividad biológica.

Procesos Microbiológicos

Digestión Anaeróbica: En una fosa séptica, los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno. La velocidad de esta reacción depende de factores como la temperatura, el pH y la concentración de nutrientes. Si la cinética de este proceso es lenta, la fosa séptica puede no tener suficiente capacidad para tratar toda la carga orgánica entrante.

Producción de Biogás: Durante la digestión anaeróbica, se producen gases como metano y dióxido de carbono. La velocidad de producción de estos gases puede influir en la necesidad de sistemas de ventilación o almacenamiento de gas.

La comprensión de la cinética de estos procesos es esencial para el diseño adecuado de una fosa séptica. Por ejemplo, si se sabe que la digestión anaeróbica es lenta a bajas temperaturas, se podría considerar aislar la fosa séptica o enterrarla más profundamente para mantener una temperatura más constante. Del mismo modo, si la sedimentación es lenta debido al tamaño de las partículas,

se podría considerar un diseño con un tiempo de retención más largo o con dispositivos de sedimentación adicionales.

3.2.3. Filtros Biológicos

Definición y Funcionamiento: Los filtros biológicos son sistemas que utilizan medios porosos (como rocas o plástico estructurado) para facilitar el tratamiento biológico aeróbico de las aguas residuales. Los microorganismos se adhieren a los medios y descomponen los contaminantes (Tchobanoglous et al., "Wastewater Engineering").

Ventajas y Desafíos: Ofrecen un tratamiento eficiente en un espacio reducido, pero pueden requerir energía para la aireación y son sensibles a las fluctuaciones en el flujo de aguas residuales.

- **Cinética de los procesos**

La cinética de los procesos físicos, químicos y microbiológicos tiene una influencia directa en el diseño y operación de un filtro biológico. Estos procesos determinan la eficiencia con la que los contaminantes son removidos y, por ende, la calidad del efluente. A continuación, se describe cómo influyen estos procesos cinéticos en el funcionamiento de un filtro biológico:

Procesos Físicos

Difusión: La eficiencia del filtro biológico depende de la capacidad de los contaminantes para difundirse a través del medio filtrante y entrar en contacto con los microorganismos. Si la difusión es lenta, puede limitar la tasa de tratamiento.

Adsorción: Algunos contaminantes pueden adherirse a la superficie del medio filtrante antes de ser degradados. La cinética de este proceso puede influir en la retención y posterior descomposición de contaminantes.

Procesos Químicos

Nitrificación y Desnitrificación: Estos son procesos químicos clave en la eliminación de nitrógeno. La cinética de estas reacciones determina la eficiencia de eliminación de nitrógeno y, por lo tanto, el tamaño y diseño del filtro.

Hidrólisis: La descomposición de compuestos orgánicos complejos en moléculas más simples es esencial para que los microorganismos puedan utilizarlos. La velocidad de esta reacción puede influir en la eficiencia de degradación de la materia orgánica.

Procesos Microbiológicos

Descomposición Aeróbica: Los microorganismos en el filtro biológico degradan la materia orgánica en presencia de oxígeno. La cinética de esta reacción depende de factores como la concentración de oxígeno, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes.

Descomposición Anaeróbica: En zonas del filtro donde el oxígeno es limitado, los microorganismos pueden degradar la materia orgánica en ausencia de oxígeno. La cinética de este proceso es generalmente más lenta que la aeróbica.

Crecimiento Microbiano: La tasa de crecimiento de los microorganismos puede influir en la acumulación de biomasa en el filtro y, por lo tanto, en la necesidad de mantenimiento y limpieza.

La comprensión de la cinética de estos procesos es esencial para el diseño adecuado de un filtro biológico. Por ejemplo, si la nitrificación es un proceso clave, el filtro debe diseñarse para proporcionar suficiente oxígeno y tiempo de retención para que esta reacción ocurra eficientemente. Del mismo modo, si la acumulación de biomasa es rápida, el diseño debe considerar métodos para eliminarla y evitar la obstrucción del filtro.

3.2.4. Combinación de Fosa Séptica y Filtros Biológicos

Definición y Funcionamiento: Al combinar ambos sistemas, se busca aprovechar la eficiencia de la fosa séptica en la sedimentación y la descomposición anaeróbica con la eficacia del filtro biológico en la remoción de contaminantes biológicos (EPA, "Decentralized Systems Technology Fact Sheet: Septic Tank – Soil Absorption Systems").

La coordinación entre la fosa séptica y el filtro biológico es esencial para garantizar un tratamiento eficiente. Aquí hay algunas estrategias y consideraciones para regular el caudal y coordinar ambas unidades:

- **Diseño Coordinado**

Al diseñar el sistema, es fundamental que el volumen y el tiempo de retención de la fosa séptica estén en línea con las necesidades del filtro biológico. Es decir, la fosa séptica debe ser lo suficientemente grande como para manejar las cargas pico y proporcionar un tratamiento preliminar adecuado, pero no tan grande como para retener el agua por demasiado tiempo y causar problemas anaeróbicos.

- **Uso de Dispositivos de Control de Flujo**

Se pueden instalar dispositivos de control de flujo entre la fosa séptica y el filtro biológico para regular el caudal que entra en el filtro. Estos dispositivos pueden ser simples, como tuberías de diámetro reducido, o más complejos, como válvulas de control ajustables.

- **Diseño de Rebosadero y Sifón**

Un sifón o un dispositivo de rebose puede ser utilizado para liberar agua de la fosa séptica al filtro biológico a intervalos regulares. Esto puede ayudar a garantizar que el filtro reciba un flujo constante y evite sobrecargas.

- **Uso de Tanques de Ecualización**

Si hay variaciones significativas en el flujo de entrada (por ejemplo, debido a usos puntuales de mucha agua), se puede considerar un tanque de ecualización después de la fosa séptica. Este tanque recoge el efluente de la fosa y lo libera al filtro biológico a un ritmo constante, ayudando a evitar picos de flujo.

- **Monitoreo y Mantenimiento**

Es esencial monitorear regularmente el rendimiento de ambas unidades. Si se observa que el efluente de la fosa séptica es de baja calidad o que el filtro biológico está recibiendo demasiado o muy poco flujo, se pueden hacer ajustes en el sistema para corregir estos problemas.

El mantenimiento regular, como la limpieza y desludificación de la fosa séptica y la eliminación de biomasa excesiva del filtro biológico, también es crucial para mantener un flujo y tratamiento adecuados.

- **Educación y Concienciación del Usuario**

Informar a los usuarios sobre prácticas adecuadas de uso del agua y el sistema de tratamiento puede ayudar a reducir picos de flujo y garantizar un funcionamiento más uniforme del sistema.

Al coordinar adecuadamente la fosa séptica y el filtro biológico y al considerar las estrategias mencionadas, se puede garantizar que ambos componentes trabajen de manera eficiente y proporcionen un tratamiento efectivo de las aguas residuales.

Ventajas y Desafíos: Esta combinación puede ofrecer un tratamiento más completo y eficiente, pero requiere un diseño cuidadoso y un mantenimiento adecuado de ambos componentes.

- **Influencia de la Cinética**

La cinética de los procesos físicos, químicos y microbiológicos juega un papel crucial en la eficiencia y eficacia de un sistema de tratamiento de aguas residuales, especialmente en un sistema combinado de fosa séptica y filtro biológico. A continuación, se detalla cómo influyen estos procesos cinéticos:

Procesos Físicos

Sedimentación: En la fosa séptica, la velocidad a la que los sólidos se asientan (sedimentación) es esencial para separar los sólidos del líquido. Si la cinética de sedimentación es lenta, puede requerir una fosa más grande o un tiempo de retención más largo.

Difusión: En el filtro biológico, la eficiencia del tratamiento depende de la capacidad de los contaminantes para difundirse a través del medio y entrar en contacto con los microorganismos. Una difusión inadecuada puede limitar la tasa de tratamiento.

Procesos Químicos

Hidrólisis: La descomposición de compuestos orgánicos complejos en moléculas más simples es esencial para que los microorganismos puedan utilizarlos. Una hidrólisis lenta puede limitar la tasa de biodegradación posterior.

Nitrificación y Desnitrificación: Estos procesos químicos son vitales para la eliminación del nitrógeno. La cinética de estas reacciones determina la eficiencia de eliminación de nitrógeno y, por lo tanto, el diseño y operación del filtro biológico.

Procesos Microbiológicos

Digestión Anaeróbica: En la fosa séptica, la materia orgánica es parcialmente descompuesta por bacterias anaeróbicas. La velocidad de esta reacción afecta la calidad del efluente de la fosa y la acumulación de lodos.

Descomposición Aeróbica: En el filtro biológico, los microorganismos aeróbicos degradan la materia orgánica restante. La cinética de esta reacción depende de factores como la concentración de oxígeno, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes.

Crecimiento Microbiano: La tasa de crecimiento de los microorganismos puede influir en la acumulación de biomasa en el filtro biológico, lo que puede afectar el flujo y la eficiencia del filtro.

La comprensión y consideración de la cinética de estos procesos son fundamentales para el diseño, operación y mantenimiento de un sistema combinado de fosa séptica y filtro biológico. Por ejemplo, si la cinética de nitrificación es lenta, el filtro biológico puede necesitar ser diseñado con un tiempo de retención más largo o con un medio que favorezca el crecimiento de bacterias nitrificantes. Del mismo modo, si la cinética de sedimentación es lenta en la fosa séptica, puede ser necesario aumentar el volumen de la fosa o considerar mecanismos adicionales para mejorar la sedimentación.

En resumen, la cinética de los procesos físicos, químicos y microbiológicos es un factor determinante en la eficiencia y eficacia de un sistema de tratamiento de

aguas residuales y debe ser cuidadosamente considerada en todas las etapas del diseño y operación del sistema.

3.2.5. Biodigestores Unifamiliares

Definición y Funcionamiento: Los biodigestores son sistemas que tratan las aguas residuales y producen biogás (principalmente metano) como subproducto. El biogás puede ser utilizado como fuente de energía (SNV, "Domestic Biogas").

Ventajas y Desafíos: Además de tratar las aguas residuales, los biodigestores proporcionan un beneficio adicional en forma de energía. Sin embargo, requieren un diseño y manejo adecuados para garantizar la producción y seguridad del biogás.

- **Influencia de la Cinética**

La cinética de los procesos físicos, químicos y microbiológicos en un biodigestor es fundamental para entender y predecir su rendimiento y eficiencia. Estos procesos determinan la velocidad y eficacia con la que se descompone la materia orgánica y se produce biogás. A continuación, se detalla cómo influyen estos procesos cinéticos en el funcionamiento de un biodigestor:

Procesos Físicos

Transferencia de Masa: La difusión de sustratos hacia los microorganismos y la difusión de productos de desecho fuera de las células microbianas es esencial para la eficiencia del proceso. Una transferencia de masa ineficiente puede limitar la velocidad de las reacciones bioquímicas.

Mezcla: Una mezcla adecuada en el biodigestor asegura un contacto uniforme entre los microorganismos y los sustratos, lo que puede mejorar la velocidad de las reacciones y la producción de biogás.

Procesos Químicos

Hidrólisis: La descomposición de polímeros complejos (como proteínas, grasas y carbohidratos) en monómeros más simples es el primer paso en la digestión anaerobia. La velocidad de esta reacción puede ser un factor limitante si los compuestos no se hidrolizan rápidamente.

Neutralización: La producción de ácidos durante la fermentación acidogénica puede disminuir el pH, afectando la actividad microbiana. La capacidad del sistema para neutralizar estos ácidos (a menudo mediante la producción de bicarbonato) es crucial para mantener un pH óptimo.

Procesos Microbiológicos

Fermentación Acidogénica: Los monómeros producidos durante la hidrólisis son convertidos en ácidos volátiles, alcohol, dióxido de carbono e hidrógeno por bacterias acidogénicas. La cinética de esta etapa influirá en la acumulación de ácidos y, por lo tanto, en el pH del sistema.

Fermentación Acetogénica: Los productos de la fermentación acidogénica son convertidos en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. La velocidad de esta etapa es esencial para garantizar una producción constante de ácido acético, que es el principal sustrato para la producción de metano.

Metanogénesis: Es la etapa final donde el ácido acético, el CO_2 y el H_2 se convierten en metano. La cinética de esta reacción determina la tasa de producción de biogás. Es sensible a perturbaciones como cambios en el pH o la presencia de inhibidores.

La interacción entre estos procesos cinéticos es compleja y debe ser cuidadosamente equilibrada. Por ejemplo, si la hidrólisis y la fermentación acidogénica ocurren demasiado rápidamente en relación con la metanogénesis, puede haber una acumulación de ácidos volátiles, lo que disminuiría el pH y podría inhibir la actividad de las bacterias metanogénicas, reduciendo la producción de metano.

Por otro lado, si la metanogénesis es más rápida que las etapas previas, podría haber una falta de sustrato (ácido acético, CO_2, H_2) para las bacterias metanogénicas, lo que también reduciría la producción de biogás.

- **Factores que Influyen en la Cinética**

- Temperatura: La actividad microbiana generalmente aumenta con la temperatura hasta un punto óptimo, después del cual disminuye. Los

biodigestores pueden operar en rangos mesofílicos (alrededor de 30-40°C) o termofílicos (50-60°C). La temperatura afecta directamente la velocidad de las reacciones bioquímicas.

- pH: La mayoría de los procesos en un biodigestor ocurren de manera óptima en un rango de pH de 6.5 a 8. Fuera de este rango, la actividad microbiana puede verse inhibida.
- Concentración de Sustrato: La disponibilidad de sustrato puede influir en la velocidad de las reacciones. Sin embargo, una concentración excesivamente alta puede ser tóxica o inhibidora para los microorganismos.
- Inhibidores: La presencia de sustancias tóxicas o inhibidoras (como amoníaco, sales, pesticidas, entre otros) puede afectar la cinética de las reacciones al inhibir la actividad microbiana.
- Concentración de Microorganismos: Una mayor biomasa microbiana puede aumentar la velocidad de las reacciones hasta cierto punto. Sin embargo, una excesiva acumulación de biomasa puede causar problemas de mezcla y transferencia de masa.

En otras palabras, la cinética de los procesos físicos, químicos y microbiológicos en un biodigestor es esencial para su diseño, operación y optimización. Una comprensión profunda de estos procesos y su interacción permite diseñar biodigestores más eficientes, predecir su comportamiento bajo diferentes.

condiciones y responder adecuadamente a las perturbaciones. Es esencial monitorear regularmente las condiciones y el rendimiento del biodigestor para asegurar un tratamiento eficaz y una producción óptima de biogás.

3.3. Consideraciones de Diseño para cada Prototipo Propuesto

3.3.1. Fosa Séptica

- Determinar el volumen diario de aguas residuales basado en el número de usuarios.
- Capacidad basada en el número de usuarios y el vo3lumen diario de aguas residuales.
- Durabilidad y resistencia de los materiales.

- Protección contra la infiltración de aguas superficiales.
- Facilidad de acceso para mantenimiento y limpieza.

3.3.2. Filtros Biológicos

- Determinar el volumen y la carga orgánica de las aguas residuales.
- Tamaño y profundidad adecuados para el volumen de aguas residuales.
- Medio filtrante adecuado (roca, grava, plástico estructurado).
- Aireación adecuada para mantener la actividad biológica.
- Acceso para mantenimiento y limpieza.

3.3.3. Combinación de Fosa Séptica y Filtros Biológicos

- Integración eficiente de ambos sistemas.
- Secuencia adecuada: fosa séptica para sedimentación y descomposición anaeróbica, seguida del filtro biológico para tratamiento adicional.
- Tamaño y capacidad adecuados para el volumen de aguas residuales.

3.3.4. Biodigestores Unifamiliares

- Determinar el volumen diario de aguas residuales y la cantidad de materia orgánica disponible.
- Capacidad adecuada para el volumen de aguas residuales y materia orgánica disponible.
- Diseño hermético para la producción y captura de biogás.
- Materiales resistentes y duraderos.
- Sistemas de seguridad para la captura, almacenamiento y uso del biogás.

Para cada prototipo, es esencial considerar las condiciones específicas del sitio, las necesidades de la comunidad y las regulaciones locales. Además, es recomendable involucrar a la comunidad en el proceso de diseño e implementación para garantizar la aceptación y el éxito a largo plazo del sistema.

- **Factores Locales**

Al diseñar prototipos, es esencial considerar factores como el clima, la topografía, la calidad del suelo, la disponibilidad de materiales y la cultura local (WHO, "Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater").

- **Sostenibilidad**

Cualquier diseño debe considerar no solo la eficiencia del tratamiento, sino también la sostenibilidad a largo plazo, incluyendo la facilidad de mantenimiento, la adaptabilidad y la aceptación por parte de la comunidad.

3.4. Criterios de Evaluación de Alternativas Tecnológicas en Tratamiento de Aguas Residuales en el Contexto Nicaragüense.

Eficiencia: Se refiere a la capacidad de un sistema para eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua tratada. La eficiencia se mide generalmente en términos de porcentajes de remoción de contaminantes específicos (Metcalf & Eddy, "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse").

Indicadores de Eficiencia: Porcentaje de remoción de contaminantes, calidad del efluente, producción de biogás (si aplica).

Sostenibilidad: Implica la capacidad de un sistema para operar a largo plazo sin degradarse o fallar, considerando aspectos ambientales, económicos y sociales (UNEP, "Towards a Green Economy").

Indicadores de Sostenibilidad: Durabilidad de los materiales, facilidad de mantenimiento, impacto ambiental.

Adaptabilidad: Se refiere a la capacidad de un sistema para ajustarse a diferentes condiciones o cambios en el entorno, como variaciones climáticas, demográficas o de uso (IPCC, "Adaptation to Climate Change").

Indicadores de Adaptabilidad: Flexibilidad ante variaciones de flujo, resistencia a variaciones climáticas, capacidad de expansión.

Asequibilidad: Relacionado con los costos iniciales y operativos de un sistema y la capacidad de las comunidades o individuos para financiarlo (WHO, "Costing Sanitation").

Indicadores de Asequibilidad: Costo inicial, costos operativos y de mantenimiento, retorno de inversión (especialmente si se produce biogás).

3.4.1. Contexto Nicaragüense

Condiciones Geográficas y Climáticas: Nicaragua, con su diversidad geográfica y climática, presenta desafíos específicos para la implementación de sistemas de tratamiento. Las variaciones en precipitación, temperatura y topografía pueden influir en la eficiencia y operación de los sistemas (INETER, Estudios Geográficos).

Aspectos Socioeconómicos: Las limitaciones económicas, especialmente en zonas rurales y periurbanas, pueden influir en la asequibilidad y sostenibilidad de los sistemas de tratamiento (PNUD, Informes sobre Desarrollo Humano en Nicaragua).

3.5. Evaluación de Impacto Ambiental de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.

3.5.1. Elementos de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)

Definición: La EIA es un proceso formal que identifica, predice, evalúa y mitiga los impactos ambientales de un proyecto propuesto antes de tomar decisiones y comprometer recursos.

Objetivo: Asegurar que las decisiones sobre proyectos propuestos se tomen teniendo en cuenta las consecuencias ambientales.

Componentes de una EIA

- Descripcion del Proyecto: Detallar las características del sistema de tratamiento propuesto.
- Establecimiento de la Línea Base: Identificar las condiciones ambientales existentes antes de la implementación del proyecto.

- Identificación de Impactos: Determinar los impactos positivos y negativos que el proyecto podría tener en el ambiente.
- Evaluación de Impactos: Cuantificar y calificar los impactos identificados.
- Mitigación de Impactos: Proponer medidas para evitar, reducir o compensar los impactos negativos.
- Plan de Monitoreo: Establecer un sistema para monitorear y evaluar los impactos a lo largo del tiempo.

3.5.2. Impacto Ambiental de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

- Beneficios Potenciales: Reducción de contaminantes, protección de fuentes de agua, prevención de enfermedades.
- Impactos Negativos Potenciales: Generación de lodos, emisión de gases de efecto invernadero, uso excesivo de energía, entre otros.

3.5.3. Normativas y Estándares

- Normativas Locales: Es esencial revisar y cumplir con las regulaciones y estándares locales relacionados con el tratamiento de aguas residuales y la protección del medio ambiente.
- Estándares Internacionales: Existen estándares y directrices internacionales, como los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), que pueden servir como referencia.

3.5.4. Herramientas y Métodos para la EIA

- Métodos Cuantitativos: Modelos matemáticos, análisis estadístico, simulaciones.
- Métodos Cualitativos: Listas de verificación, matrices, métodos de consenso.

IV. Diseño Metodológico

4.1. Tipo de Investigación

El presente informe desarrollado entra en la clasificación del diseño y tecnológica en busca de la resolución de problemas específicos en la industria química a nivel nacional (UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA [UNI], 2010).

Por lo tanto, el estudio no se limita a la descripción, sino que orienta a proponer alternativas tecnológicas funcionales, basadas en principios de la mención ambiental abordada en los estudios universitarios previos, buscando demostrar su viabilidad operativa, su eficiencia en remoción de contaminantes, su sostenibilidad a largo plazo y sobre todo su aceptación local.

4.2. Diseño de Investigación

El diseño metodológico tomado es de tipo no experimental, longitudinal y analítico, basado en simulación, modelado técnico e interpretación ingenieril de datos contextuales, se procesan condiciones reales del entorno en función de los parámetros técnicos que rigen el diseño de los sistemas seleccionados. La simulación matemática y el análisis funcional se integran como método central, mediante el uso de algoritmos de diseño desarrollados expresamente para cada tecnología evaluada.

En perspectiva se permite explorar de forma anticipada el comportamiento hidráulico, cinético y microbiológico de los sistemas, al igual que predecir la eficiencia de tratamiento, estimar los volúmenes de producción de subproductos y establecer criterios de dimensionamiento ajustados al contexto geográfico y socioeconómico del país. Además, se enlaza con un análisis ambiental y socioeconómico para garantizar la viabilidad integral de las propuestas.

4.3. Determinación del Universo de Estudio

El análisis está dirigido a viviendas unifamiliares en zonas rurales y periurbanas sin conexión al servicio de alcantarillado La delimitación de este universo responde a la necesidad de diseñar alternativas de tratamiento de aguas

residuales domesticas que se ajustan a contextos de baja infraestructura y escasa cobertura de servicios públicos básicos.

Para la identificación se consideran los siguientes criterios:

Geográfico: Se especifica a áreas rurales y periurbanas en Nicaragua, debido a que presentan características comunes como baja densidad poblacional, dispersión de viviendas y limitadas infraestructura de saneamiento.

Técnico: Se incluyeron únicamente aquellas viviendas que no están conectadas a una red de alcantarillado sanitario, y que actualmente gestionan sus aguas residuales mediante soluciones individuales o informales, tales como letrinas, pozos, etc.

Poblacional: El universo de estudio quedo constituido por el total de viviendas unifamiliares dentro de la zona delimitada, es decir, aquellas habitadas por una sola familia y cuya gestión del agua es autónoma. La información poblacional se obtuvo mediante registros municipales, censos del Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE).

Definir este universo permite realizar una evaluación realista de las alternativas de tratamientos de aguas residuales que se ajusten a las características y necesidades de las comunidades rurales y periurbanas, considerando su contexto técnico, social y ambiental.

4.4. Metodología para la Ejecución de la Investigación

El desarrollo se fundamenta en los principios del diseño ingenieril, el análisis comparativo y la evaluación ambiental aplicada siguiendo una secuencia lógica de procesos técnicos para cumplir cada uno de los objetivos propuestos.

4.4.1. Análisis de las características y Necesidades Específicas de las Zonas Rurales y Periurbanas en Nicaragua en Relación con la Gestión de Aguas Residuales

Se caracteriza las condiciones físicas, socioeconómicas, culturales y ambientales de la zona estudiada mediante un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo) en el cual se combina.

Revisión Bibliográfica

Estudio de documentos, informes y literaturas existentes sobre la situación del saneamiento y gestión de aguas residuales en Nicaragua, además de las tecnologías apropiadas y normas de calidad ambiental.

Encuestas y Entrevistas

Aplicación de cuestionarios a pobladores de comunidades rurales y periurbanas para identificar sus necesidades y percepciones (Ver en Anexo I y II). Realización de entrevistas a expertos y autoridades locales para obtener una visión más técnica y regulatoria.

Análisis de Datos

Procesamiento y análisis de la información recopilada para identificar patrones, necesidades, áreas de intervención, capacidades locales y requerimientos específicos que deben considerar los sistemas propuestos.

4.4.2. Diseño de Prototipos para cada una de las Cuatro Alternativas Tecnológicas Propuestas

A partir de las condiciones identificadas en el diagnóstico, se elaboran algoritmos que permiten el dimensionamiento de los sistemas de tratamientos unifamiliares, integrando criterios hidráulicos, cinéticos, microbiológicos, operativos y normativos.

Los diseños de los prototipos para cada una de las cuatro alternativas tecnológicas propuestas se realizan conforme los algoritmos de diseño, que a continuación se detallan.

Las fórmulas y ejecución de la simulación se encuentran en el libro de Excel titulado “Dimensionamiento y simulación de los sistemas”.

Algoritmo de Diseño de la Fosa Séptica

El diseño de una fosa séptica implica varios pasos y consideraciones. A continuación, se presenta un algoritmo para el diseño de una fosa séptica junto con las ecuaciones necesarias:

- ***Determinar la población servida***

La población servida corresponde al número de personas en una vivienda o en un conjunto de viviendas.

Ec 1. Población futura

$$P_f = P_i * (1 + r)^t$$

Donde:

P_f: Población Futura (Personas)

P_i: Población Inicial (Personas)

r: Factor de Crecimiento (%)

t: Periodo de Diseño, $t_2 - t_1$ (Años)

- ***Estimar el flujo diario de aguas residuales***

- Producción per cápita de aguas residuales

Se asume que la producción per cápita es lo que retorna de la dotación de agua potable que se le brinda a una persona.

Ec 2. Caudal de aporte unitario de aguas residuales

$$q = \%Retorno * D_t$$

Donde:

q: Caudal de Aporte Unitario de Aguas Residuales o Producción Per Cápita $(\frac{Litros}{Personas * dia})$

D_t: Dotación de Agua Potable a la Población ($\frac{Litros}{Personas * dia}$)

%Retorno: El porcentaje de la dotación que se devuelve, típicamente es del 80%

- Caudal o flujo diario de aguas residuales

Ec 3. Caudal de aguas residuales

$$Q_{AR} = q * P_f$$

Donde:

Q_{AR}: Caudal de Aguas Residuales ($\frac{Litros}{dia}$)

q: Caudal de Aporte Unitario de Aguas Residuales ($\frac{Litros}{Personas * dia}$)

P_f: Población Futura (Personas)

- ***Calcular el tiempo de retención hidráulica***

Ec 4. Tiempo de retención hidráulica

$$t_{rh} = 1{,}5 - 0{,}3\, log\, (P_f * q)$$

Donde:

t_{rh}: Tiempo de retención hidráulico (días)

P_f: Población futura (Personas)

q: Caudal de Aporte Unitario de Aguas Residuales ($\frac{Litros}{Personas * dia}$)

- ***Determinar volúmenes de la fosa séptica***

Ec 5. Volumen total de la fosa séptica

$$V_{fosa} = 1{,}3 * P_f\, (D_t * t_{rh} + 100\, L_f)$$

Donde:

V_{fosa}: Volumen de la fosa (L)

P_f: Población futura (Personas)

D_t: Dotación de agua potable a la población ($\frac{Litros}{Personas * dia}$)

t_{rh}: Tiempo de retención hidráulico (días)

L_f: Producción de lodo fresco por persona ($\frac{Litros}{Personas * dia}$)

1,3: Coeficiente de seguridad para la capacidad

100: Valor de ajuste para los lodos fresco

La contribución de lodos frescos deberá ser de un $\frac{Litros}{Personas * dia}$

Ec 6. Volumen de sedimentación

$$Vs = 10^{-3} * (\mathrm{P_f} * q) * \mathrm{t_{rh}}$$

Donde:

V_s: Volumen de sedimentación (m^3)

P_f: Población futura (Personas)

q: Caudal de Aporte Unitario de Aguas Residuales ($\frac{Litros}{Personas * dia}$)

t_{rh}: Tiempo de retención hidráulico (días)

Ec 7. Volumen de digestión y almacenamiento de lodos

$$V_d = 70 * 10^{-3} * \mathrm{P_f} * N$$

Donde:

V_d: Volumen de digestión y almacenamiento de lodos (m^3)

P_f: Población futura (Personas)

N: Intervalo de remoción de lodos (años)

Ec 8. Volumen de natas

$$V_n = 0{,}7$$

Donde:

V_n: Volumen de natas (m^3) como mínimo se usa 0,7 m^3

- Volumen de lodos producidos

Clima cálido 40 ($\frac{Litros}{Personas * año}$)

Clima frio 50 ($\frac{Litros}{Personas * año}$)

- ***Dimensionar la fosa séptica***

Las dimensiones de la fosa séptica (largo, ancho y profundidad) deben ser determinadas de manera que se garantice una operación eficiente y se evite la salida prematura de sólidos.

Las consideraciones para su diseño son las siguientes:

- Relación entre la longitud total y ancho: $2 \leq \frac{L}{B} \leq 4$
- Profundidad útil mínima: 1,20 m
- El ancho máximo del tanque no deberá ser mayor que 2 veces la profundidad útil mínima.
- La primera y segunda cámara deberán tener una longitud igual a 2/3 y 1/3 de ella respectivamente.
- El periodo de retención debe ser 0,5 días mínimo
- Área de la fosa = $\frac{V_{fosa}}{Profundidad\ util} = Longitud * Ancho$

Ec 9. Área de la fosa séptica

$$A = \frac{V_{fosa}}{H}$$

Donde:

A: Área de la fosa séptica (m^2)

V_{fosa}: Volumen de la fosa (m^3)

H: Profundidad útil, 1,20 m (mínimo)

- ***Calcular las profundidades de la fosa***

Ec 10. Profundidad máxima de espuma sumergida

$$H_e = \frac{0,7}{A}$$

Donde:

H_e: Profundidad máxima de espuma sumergida

A: Área de la fosa séptica (m^2)

- Profundidad libre de espuma sumergida

Se considera como profundidad libre de espuma sumergida la distancia entre la superficie inferior de la capa de espuma y el nivel inferior de la Tee de salida de la fosa o tanque séptico, este deberá tener un valor mínimo de 0,10 m.

Ec 11. Profundidad libre de lodo

$$H_o = 0,82 - 0,26 * A$$

Donde:

H_o: Profundidad libre de lodo (m)

A: Área de la fosa séptica (m^2)

Ec 12. Profundidad mínima requerida para la sedimentación

$$H_s = \frac{V_s}{A}$$

Donde:

H_s: Profundidad mínima requerida para la sedimentación (m)

A: Área de la fosa séptica (m^2)

V_s: Volumen de sedimentación (m^3)

- Profundidad de espacios libres

Esta comprende la superficie libre de espuma sumergida y la profundidad de lodos, se toma el valor mayor entre la profundidad del espacio libre mínimo total ($1+H_o$) y la profundidad mínima requerida para la sedimentación.

- Profundidad neta de la fosa

La suma de las profundidades de natas, sedimentación, almacenamiento de lodos y la profundidad libre de natas sumergidas.

- ***Determinar las dimensiones del compartimiento de sedimentación y digestión***

- Es común que las fosas sépticas tengan dos comportamientos: uno para sedimentación y otro para digestión.
- El comportamiento de sedimentación suele ocupar entre el 50% y el 75% del volumen total
- La primera y segunda cámara deberán tener un volumen igual a 2/3 y 1/3 respectivamente del volumen útil calculado
- La capacidad para almacenamiento de lodo digerido deberá ser para un periodo mínimo de un año.
- Los coeficientes de reducción de lodos serán iguales a 0.25 y 0.50 para lodo digerido y lodo en digestión respectivamente.

- ***Diseñar las entradas y salidas***

- Las tuberías de entrada y salida deben estar diseñadas para evitar la entrada de grandes sólidos y la salida de sólidos sedimentados.
- Es común usar una “T” invertida para esto.
- El borde inferior de la abertura de pase entre las cámaras deberá estar a 2/3 de la profundidad útil y el superior a una distancia mínima de 0.30 m bajo el nivel del líquido. El área total de la abertura deberá estar entre el 5 y 10% del área de la sección transversal del volumen útil.
- La rasante del tubo de entrada deberá estar a 0.075 m por encima de la superficie libre del líquido.

- Solo deberán proveer los correspondientes dispositivos de entrada y salida en los cuales la parte sumergida será no menor de 0.30 m y la parte fuera de la superficie del agua no menor de 0.20 m.
- Se deberá proveer en cada cámara una boca de inspección de forma circular con un diámetro no menor de 0.60 m y la tapa deberá estar colocada sobre un bordillo de 0.15 m de alto con respecto al nivel superior del tanque.

- ***Considerar la ventilación***

Es esencial proporcionar la ventilación adecuada para liberar gases producidos durante la digestión anaeróbica.

Algoritmo de Diseño del Filtro Biológico

El filtro biológico, también conocido como biofiltro, es un sistema de tratamiento secundario que utiliza microorganismos adheridos a un medio filtrante para degradar la materia orgánica presente en las aguas residuales. A continuación, se presenta un algoritmo para el diseño de un filtro biológico junto con las ecuaciones necesarias:

- ***Seleccionar el tipo de filtro biológico***

Puede ser de flujo ascendente o descendente, dependiendo de las condiciones y requerimientos específicos.

- ***Población futura***

Se determina usando la ecuación 1

- ***Contribución de aguas residuales***

Se determina usando la ecuación 2

- ***Caudal de aguas residuales***

Se determina usando la ecuación 3

- ***Determinar la carga orgánica***

Basado en el flujo de aguas residuales y la concentración de materia orgánica (usualmente expresada como DBO).

Ec 13. Carga orgánica

$$Co = Q_{AR} * \left[DBO_{Afluente}\right] * 0{,}0864$$

Donde:

Co: Carga Orgánica ($\frac{Kg}{día}$)

Q_{AR}: Caudal de Aguas Residuales ($\frac{L}{s}$)

[$DBO_{Afluente}$]: Concentración de materia orgánica ($\frac{mg}{L}$). Ver tabla 15 en Anexo III

0.0864: Conversión de mg/s a Kg/día para el cálculo de la carga orgánica

Ec 14. Carga orgánica per cápita

$$Cop = \frac{Co}{P_f}$$

Donde:

Cop: Carga Orgánica Per Cápita ($\frac{Kg}{día * Personas}$)

Co: Carga Orgánica ($\frac{Kg}{día}$)

P_f: Población Futura (Personas)

Ec 15. Carga orgánica volumétrica

$$Cov = \frac{Co}{V_{FAFA}}$$

Donde:

Cov: Carga Orgánica Volumétrica ($\frac{Kg}{día * m^3}$)

Co: Carga Orgánica ($\frac{Kg}{día}$)

V_{fafa}: Volumen del Filtro Anaeróbico (m^3)

Ec 16. Carga superficial

$$CS = \frac{CO}{As}$$

Donde:

CS: Carga Superficial del filtro ($\frac{g\ DBO}{día * m^2}$)

Co: Carga Orgánica ($\frac{Kg}{día}$)

As: Área superficial del filtro (m^2)

- ***Volúmenes del filtro***

Ec 17. Volumen efectivo del filtro

$$V_{efectivo} = 1{,}6 * P_f * q * t_{rh}$$

Donde:

$V_{efectivo}$: Volumen efectivo del filtro (m^3)

P_f: Población futura (personas)

q: Caudal de Aporte Unitario de Aguas Residuales o Producción Per Cápita ($\frac{m^3}{día * Personas}$)

t_{rh}: Tiempo de retención hidráulica (día)

- Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica también se puede encontrar en las tablas dependiendo de temperaturas, este se basa en el volumen efectivo, no en el volumen total del medio filtrante. Por lo tanto, al diseñar un biofiltro, es crucial considerar ambos volúmenes para garantizar un tratamiento efectivo y determinar la cantidad de material filtrante necesario.

Ec 18. Volumen total del filtro

$$V_{FAFA} = \frac{V_{efectivo}}{\varphi} * V_{lodo}$$

Donde:

V_{FAFA}: Volumen total del filtro

$V_{efectivo}$: Volumen efectivo del filtro (m^3)

φ: Porosidad del medio filtrante (Puede ser de 0.3 a 0.4 según el material)

$V_{Lodo:}$ Volumen generado de lodo (m^3)

- ***Eficiencia de remoción***

Ec 19. Eficiencia de remoción

$$E = 100\,[1 - 0.87\,({t_{rh}}^{-0.5})]$$

E: Porcentaje de remoción (%)

t_{rh}: Tiempo de retención hidráulica (h)

Ec 20. Volumen de espacios requeridos

$$V_{er} = t_{rh} * q * P_f$$

Donde:

Ver: Volumen de espacios requeridos (m^3)

t_{rh}: Tiempo de retención hidráulica (día)

q: Caudal de Aporte Unitario de Aguas Residuales o Producción Per Cápita ($\frac{L}{día * Personas}$)

P_f: Población Futura (Personas)

Ec 21. Volumen del medio filtrante

$$V_{mf} = V_{er} * \frac{100}{\varphi}$$

Donde:

V_{mf}: Volumen del medio filtrante (m^3)

V_{er}: Volumen de espacios requeridos (m^3)

φ: Porosidad del medio filtrante (Puede ser de 0.3 a 0.4 según el material)

- ***Altura total***

Ec 22. Altura total del filtro

$$H = h_{LF} + h_{SN} + h_{FF} + h_{BL}$$

Donde:

H: Altura total del filtro (m)

h_{LF}: Altura del lecho filtrante (m), depende del tipo de medio (roca, grava, plástico estructurado) y del diseño específico. Esta profundidad varía según el diseño, pero suele estar entre 1 y 2.5 metros para la mayoría de los filtros biológicos.

h_{SN}: Sobrenadante (m)

h_{FF}: Altura del falso fondo (m), el fondo falso deberá tener aberturas con ϕ: 0.03 m espaciados entre sí, 0.15 m de centro a centro.

h_{BL}: Altura del borde libre (m)

- ***Área superficial***

Ec 23. Área superficial del filtro

$$As = \frac{V_{mf}}{h_{LF}}$$

Donde:

A_S: Área Superficial (m^2)

V_{mf}: Volumen del lecho filtrante (m^3)

h_{LF}: Altura del lecho filtrante (m)

- ***Área total del filtro***

Ec 24. Área total del filtro

$$A = \frac{V_{FAFA}}{H}$$

Donde:

A: Área total (m^2)

H: Altura total del filtro (m)

V_{FAFA}: Volumen total del filtro (m^3)

- ***Geometría***

Ec 25. Geometría redonda

$$D = \sqrt{\frac{4 * As}{\pi}}$$

Ec 26. Geometría cuadrada

$$L = \sqrt{A}$$

Donde:

D: Diámetro del filtro (m)

A_S: Área Superficial (m^2)

A: Área total (m^2)

L: Lado (m)

- ***Generación de lodos en el filtro***

Ec 27. Lodos generados por solidos suspendidos totales

$$W_sSST = E * SST_{Af} * q * P_f$$

Donde:

W_sSST: Lodos generados por solidos suspendidos totales ($\frac{Kg}{día}$)

SST_{Af}: Sólidos suspendidos totales en el afluente (encontrados en tabla)

q: Caudal de Aporte Unitario de Aguas Residuales o Producción Per Cápita ($\frac{L}{día * Hab}$)

P_f: Población Futura (Hab)

Ec 28. Volumen de lodos por SST

$$V_{SST} = \frac{W_sSST}{\rho_{H_2O} * P_{LP} * P_I}$$

Donde:

V_{SST}: Volumen de lodos por solidos suspendidos totales (m^3)

W_sSST: Lodos generados por solidos suspendidos totales ($\frac{Kg}{día}$)

ρ_{H_2O} : Densidad del agua (1000) ($\frac{Kg}{m^3}$)

P_{LP}: Peso especifico del lodo primario (1.03)

P_I: Peso específico del solido (4%)

Ec 29. Lodos por DQO

$$W_sDQO = Pn * \left[DQO_{Afluente}\right] * q * P_f$$

Donde:

W_sDQO: Lodos generados por DQO ($\frac{Kg}{día}$)

Pn: Producción de lodos en sistemas anaerobios 0.1 – 0.2 ($\frac{Kg\ SST}{Kg\ DQO}$)

[$DQO_{Afluente}$]: Concentración de materia orgánica ($\frac{Kg}{m^3}$) Ver tabla 15 en Anexo III

q: Caudal de Aporte Unitario de Aguas Residuales o Producción Per Cápita ($\frac{m^3}{día * Personas}$)

P_f: Población Futura (Personas)

Ec 30. Volumen de lodos generados por DQO

$$V_{DQO} = \frac{W_s DQO}{\rho_{H_2O} * P_{LP} * P_I}$$

Donde:

V_{DQO}: Volumen de lodos por DQO (m^3)

W_sDQO: Lodos generados por DQO ($\frac{Kg}{día}$)

ρ_{H_2O} : Densidad del agua (1000)

P_{LP}: Peso específico del lodo primario (1.03)

P_I: Peso específico del solido (4%)

Ec 31. Volumen generado de lodo en un día

$$V_{Lodo} = V_{SST} + V_{DQO}$$

V_{Lodo}: Volumen generado de lodo (m^3)

V_{DQO}: Volumen de lodos por DQO (m^3)

V_{SST}: Volumen de lodos por solidos suspendidos totales (m^3)

- ***Concentración de DBO esperada en el efluente***

Ec 32. Concentración de DBO esperada en el efluente

$$DBO_4 = [DBO_{Afluente}] - \frac{E * [DBO_{Afluente}]}{100}$$

Donde:

$[DBO_4]$: Concentración del DBO en el efluente ($\frac{mg}{L}$)

$[DBO_{Afluente}]$: Concentración de materia orgánica ($\frac{mg}{L}$) Ver tabla 15 en Anexo III

E: Porcentaje de remoción

- ***Seleccionar y diseñar el sistema de distribución***

Asegurar una distribución uniforme del agua residual sobre el medio filtrante.

- ***Diseñar el sistema de recolección del efluente***

Capturar y conducir el agua tratada hacia el siguiente paso o al punto de descarga. Puede ser a través de un pozo de absorción o un campo de infiltración

- ***Considerar la ventilación***

Asegurar un suministro adecuado de oxígeno para los microorganismos aeróbicos

- ***Establecer procedimientos de mantenimiento***

Incluyendo la eliminación periódica de biomasa excesiva y la inspección de los sistemas de distribución y recolección.

Se considerará en el diseño del filtro biológico otros factores adicionales como la temperatura, la presencia de nutrientes, el pH, entre otros, que pueden influir en la actividad microbiana y, por ende, en la eficiencia del sistema. Además, es esencial seguir las normativas y regulaciones locales al diseñar e instalar un filtro biológico.

Algoritmo de Diseño del Sistema Combinado (Fosa séptica + Filtro biológico)

El diseño de un sistema combinado de fosa séptica seguido de un filtro biológico implica considerar las características y requerimientos de ambos componentes. A continuación, se presenta un algoritmo para el diseño de este sistema combinado junto con las ecuaciones necesarias:

- ***Diseño de la fosa séptica***

Se diseña usando el mismo algoritmo de la fosa séptica anterior.

- ***Diseño del filtro biológico***

Se diseña usando el mismo algoritmo del filtro biológico anterior.

- Determinar dimensiones del filtro biológico

El tipo deberá ser de sección cuadrada, con un fondo falso perforado, el lecho filtrante deberá tener 1.20 m de altura. El material filtrante deberá tener una granulometría lo más uniforme posible pudiendo variar entre 4 y 7 cm colocándose la más gruesa en la parte inferior del lecho.

La profundidad útil del filtro deberá ser de 1.80 m para cualquier volumen dimensionado. La pérdida de carga en el filtro deberá ser de 0.10 m; por lo tanto, el nivel de salida del efluente del filtro estará a 0.10 m abajo del nivel de la superficie del agua en el tanque séptico.

El fondo falso deberá tener aberturas con φ: 0.03 m espaciados entre sí, 0.15 m de centro a centro. También el paso del tanque séptico hacia el filtro podrá ser de un tubo con una Tee en la salida del tanque y su rama vertical deberá estar curvada próximamente al fondo del filtro. El tubo deberá ser de PVC o Polietileno, con un diámetro no menor de 0.10 m.

El filtro deberá proveerse de su boca de inspección similar a la indicada para el tanque séptico. También se le proveerá de un sistema adecuado para aplicarle agua a presión en la parte superior del lecho filtrante, cuando sea necesario su limpieza.

- ***Seleccionar y diseñar el sistema de distribución y recolección***

Asegurar una distribución uniforme del agua residual sobre el medio filtrante. Así mismo, capturar y conducir el agua tratada hacia el siguiente paso o al punto de descarga.

- ***Parámetros cinéticos y microbiológicos***

- Tasa de descomposición microbiana

Depende de la temperatura, concentración de oxígeno y características del agua residual.

- Tasa de nitrificación y desnitrificación

Esencial si la eliminación de nitrógeno es un objetivo

- Tasa de crecimiento microbiano

Influencia la acumulación de biomasa y la frecuencia de mantenimiento

- Tiempo de retención para ambas unidades

Es crucial diseñar adecuadamente ambos componentes con sus respectivos tiempos de retención para garantizar un tratamiento eficiente. Si el t_{rh} es demasiado corto en cualquiera de las unidades, puede no proporcionar suficiente tiempo para que ocurran los procesos de tratamiento deseados, lo que resultaría en un efluente de baja calidad. Por otro lado, un t_{rh} excesivamente largo puede llevar a problemas como la acumulación de sólidos y la producción excesiva de gases en la fosa séptica o la saturación del medio en el filtro biológico. Por lo tanto, esencial equilibrar estos tiempos de retención según las necesidades específicas del sistema y las condiciones del sitio.

El tiempo de retención hidráulica (t_{rh}) no es el mismo para ambas unidades. Cada unidad tiene un propósito y diseño diferente, lo que lleva a diferentes tiempos de retención.

El principal propósito de la fosa séptica es separar sólidos del líquido y comenzar el proceso de digestión anaeróbica de la materia orgánica.

El trh en una fosa séptica es típicamente más largo, generalmente entre 24 a 72 horas (1 a 3 días). Este tiempo prolongado permite la sedimentación de sólidos y la flotación de grasas y aceites, así como proporciona un ambiente para la digestión anaeróbica inicial.

Ec 33. Tiempo de retención hidráulica para fosa séptica

$$t_{rhfosa} = \frac{Q_{AR}}{V_{fosa}}$$

Donde:

V_{fosa}: Es el volumen de la fosa séptica (m^3)

Q_{AR}: Es el flujo diario de aguas residuales. $\left(\frac{Litros}{días}\right)$

El propósito principal del filtro biológico es proporcionar tratamiento secundario, donde la materia orgánica restante en el efluente de la fosa séptica es degradada por microorganismos en un ambiente aeróbico.

El trh en un filtro biológico es generalmente más corto, a menudo en el rango de horas (por ejemplo, 4-6 horas), ya que el objetivo es mantener un flujo constante y evitar la saturación del medio filtrante, esto dependerá del caudal de aguas residuales.

Ec 34. Tiempo de retención hidráulica para FAFA

$$t_{rhfafa} = \frac{Q_{AR}}{V_{efectivo}}$$

Donde:

$V_{Efectivo}$: Es el volumen efectivo del filtro biológico, que es una fracción del volumen total del medio filtrante debido a la porosidad del medio. (m^3)

Q_{AR}: Es el flujo diario de aguas residuales. $\left(\frac{Litros}{días}\right)$

Estas ecuaciones y pasos proporcionan una guía básica para el diseño de un sistema combinado de fosa séptica y filtro biológico. Es esencial considerar las condiciones específicas del sitio, las características del agua residual, y las normativas locales al diseñar e implementar cualquier sistema de tratamiento.

Algoritmo de Diseño de Biodigestor Unifamiliar

El diseño de un biodigestor para el tratamiento de aguas residuales domesticas en zonas rurales implica una serie de pasos y consideraciones. A continuación, se presenta un algoritmo para el diseño de un biodigestor, junto con las ecuaciones y parámetros necesarios:

- ***Determinación de la población servida y carga orgánica***

- Estimar la población servida que corresponde al número de personas en una vivienda.
- Producción per cápita de aguas residuales
- Carga orgánica basada en la concentración de materia orgánica (DBO)
- Determinación de carga orgánica per cápita

- ***Diseño geométrico e hidráulico***

- Caudal de aguas residuales
- Volumen del biodigestor

Ec 35. Volumen del biodigestor

$$V_{bio} = V_{liq} + V_{gas}$$

Donde:

V_{bio}: Volumen del Biodigestor (m^3)

V_{liq}: Volumen Liquido Teórico (m^3)

V_{gas}: Volumen Gaseoso Teórico (m^3)

- Volumen líquido teórico

Ec 36. Volumen líquido teórico

$$V_{liq} = Q_{AR} * t_{rh}$$

Donde:

V_{liq}: Volumen Liquido Teórico (m^3)

Q_{AR}: Caudal de Aguas Residuales (m^3/dia)

t_{rh}: Tiempo de Retención Hidráulica (de 20 a 40 días para biodigestores)

- Volumen gaseoso teórico

Según Jaime Martí (2008), el volumen del gaseoso equivale al 25% del volumen total, por lo tanto:

Ec 37. Volumen liquido

$$V_{liq} = V_{bio} * 0{,}75$$

Ec 38. Volumen gaseoso

$$V_{gas} = V_{bio} * 0{,}25$$

Donde:

V_{gas}: Volumen Gaseoso Teórico (m^3)

V_{liq}: Volumen Liquido Teórico (m^3)

V_{bio}: Volumen del Biodigestor (m^3)

- Altura y diámetro del biodigestor

En casos donde un biodigestor se asume que la altura es igual al diámetro, por lo tanto, usando la ecuación la ecuación del volumen de un cilindro para encontrar la altura, se tiene que:

Ec 39. Altura del biodigestor

$$h = \sqrt[3]{\frac{V_{bio} * 4}{\pi}}$$

Donde:

h: Altura del Biodigestor (m)

V_{bio}: Volumen del Biodigestor (m^3)

- Área superficial

Ec 40. Área superficial del biodigestor

$$A_S = 2 * \pi * r * (r + h)$$

Donde:

As: Área Superficial (m^2)

h: Altura del Biodigestor (m)

r: Radio del Biodigestor (m)

- Volumen requerido para la digestión y almacenamiento de lodos

Ec 41. Volumen requerido para la digestión y almacenamiento de lodos

$$V_d = \frac{P_f * Tl * N}{1000}$$

Donde:

P_f: Población Futura (Hab)

Tl: Tasa Acumuladora de Lodos (80) (L/Hab/año)

N: Intervalo de remoción de Lodos (año)

- Profundidad requerida para la digestión y almacenamiento

Ec 42. Profundidad requerida para la digestión y almacenamiento

$$h_d = \frac{V_d}{A_S}$$

Donde:

hd: Profundidad de almacenamiento (m)

Vd: Volumen para el almacenamiento (m^3)

As: Área Superficial (m^2)

- Profundidad de alimentación

Ec 43. Profundidad de alimentación en el biodigestor

$$h_a = \frac{V_{liq}}{A_S}$$

Donde:

ha: Profundidad de alimentación (m)

V_{liq}: Volumen Liquido del Biodigestor (m^3)

As: Area Superficial (m^2)

- Borde Libre (BL) = 0,30m
- Altura del biodigestor

Ec 44. Altura del biodigestor

$$h_t = h + BL$$

Donde:

h_t : Altura Total del Biodigestor (m)

h: Altura del Biodigestor (m)

BL: Borde Libre

- Altura de los deflectores

Ec 45. Altura de deflectores

$$H_{dt} = h$$

- Tasa de producción de biogás

Estimar la cantidad de biogás producido por kg de DBO removida.

Ec 46. Cálculo de solidos totales

$$ST = \frac{Cov * 0{,}17}{V_{gas}}$$

Ec 47. Cálculo de solidos volátiles

$$SV = ST * 0{,}75$$

Ec 48. Producción de biogás

$$P_{bg} = \frac{SV * 0{,}39}{1{,}133 * 1000}$$

Ec 49. Tasa de producción de biogás

$$T_P = \frac{P_{bg}}{DBO\ removido}$$

Ec 50. Cálculo del DBO removido

$$DBO\ removido = 100\ (1 - 0{,}70\ {t_{rh}}^{-0{,}50})$$

Donde:

ST: Solidos Totales

SV: Solidos Volátiles

COV: Carga Orgánica Volumétrica (kg/día*Hab)

P_{bg}: Producción de biogás (L)

T_p: Tasa de Producción de biogás

1,133: Densidad del biogás (kg/m^3)

1000: Conversión a litros

- ***Caja de registros de lodos***

La Cantidad de lodos producidos depende de la temperatura ambiental y de la descarga de residuos de la cocina.

- Clima tropical: 40 L/Hab/año
- Clima Frio: 50 L/Hab/año
- Volumen total de lodos producidos

Ec 51. Volumen total de lodos producidos

$$V_{tl} = \frac{Tipo\ de\ Clima\ *\ N\ *\ P_f}{1000}$$

Donde:

V_{tl}: Volumen Total de Lodos Producidos (m^3)

N: Intervalo de remoción de Lodos (año)

P_f: Población Final (Hab)

- Dimensiones de la caja de registro

Ec 52. Dimensionamiento de la caja de registro

$$V = l * b * h$$

Donde:

l: Largo de la caja (m)

b: Base de la caja

h: Altura de la caja (mínimo 0,7m)

V: Volumen efectivo de la cámara de lodos

$V > V_{tl}$

Algoritmo de Diseño del Pozo de Absorción

- ***Coeficiente de infiltración***

Para las pruebas de infiltración o absorción se deberá preparar un agujero lo suficientemente profundo para colocar una capa de arena, piedra y piedrín, cada una de 5 cm, y otro agujero con la misma profundidad, pero sin arena, piedra y piedrín.

El agujero vacío se tendrá lleno de agua 24 horas previas para la saturación y alta precipitación natural de los terrenos. Tras las 24 horas se llena el otro agujero por lo menos 15 cm sobre la arena y se registra el tiempo, se tomarán lecturas en intervalos de 30 minutos, durante 4 horas añadiendo agua sobre la arena cuando sea necesario, la tasa de infiltración se expresa en min/cm. (Menendez Wither, 2021)

Si el coeficiente de infiltración es bajo, se recomienda buscar otra solución como el campo de infiltración o humedales. Existen diversas tablas que dan un valor típico del coeficiente de absorción según el suelo.

- ***Entrada del caudal hacia el pozo***

Ec 53. Caudal de entrada en el pozo de absorción

$$Q = \frac{Q_{AR}}{DBO\ \%}$$

Donde:

Q: Caudal de entrada hacia el pozo de absorción

Q_{AR}: Caudal de Aguas Residuales (m^3/día)

DBO%: Porcentaje removido de DBO

- ***Área de infiltración requerida***

Ec 54. Área de infiltración

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

Donde:

A: Área de Infiltración (m^2)

Q_{AR}: Caudal de Aguas Residuales (m^3/día)

Ci: Coeficiente de Infiltración

- ***Profundidad útil del pozo***

Ec 55. Profundidad útil del pozo de absorción

$$H = \frac{A}{\pi * D}$$

Donde:

H: Profundidad Útil del Pozo (m)

D: Diámetro del Pozo (m)

A: Área de Infiltración (m^2)

- ***Volumen de lodos***

Ec 56. Volumen de lodos en el pozo de absorción

$$V_{lodos} = Q * T_{ac} * 365 * 0.002$$

Donde:

Q: Caudal de entrada hacia el pozo de absorción

V_{lodos}: Volumen de lodos (m^3)

T_{ac}: Tiempo de acumulación de lodos

- ***Profundidad de lodos***

Ec 57. Profundidad de lodos en el pozo de absorción

$$H_{lodos} = \frac{V_{lodos}}{A_{fondo}}$$

Donde:

H_{lodos} : Profundidad de Lodos (m)

V_{lodos}: Volumen de lodos (m^3)

A_{fondo}: Área de fondo (m^2)

- ***Áreas***

Ec 58. Area de fondo

$$A_{fondo} = \frac{\pi * D^2}{4}$$

Donde:

A_{fondo}: Área de Fondo (m^2)

- D: Diámetro del Pozo (m)

Ec 59. Área del pozo

$$A_{pozo} = \frac{\pi * D^2}{4} + A_{fondo}$$

Donde:

A_{pozo}: Área de pozo (m^2)

D: Diámetro del pozo (m)

A_{fondo}: Área de fondo (m^2)

- ***Diseño de sistemas auxiliares***

- Entrada y Salida: Diseñar tuberías de entrada y salida con trampas de gas y deflectores
- Evacuación de Lodos: Proveer puntos de acceso para la extracción periódica de lodos acumulados.
- Evacuación de Gases: Diseñar un sistema de almacenamiento y/o utilización del biogás producido, instalar válvulas de alivio de presión para evitar sobrepresiones.
- Ventilación: Asegurar una ventilación adecuada para liberar gases y evitar la acumulación de gases tóxicos o inflamables.
- Sistemas de Mantenimiento: Proveer puntos de acceso para inspección y mantenimiento.

En el diseño de un biodigestor para aguas residuales domesticas en zonas rurales se debe considerar las condiciones locales, como la temperatura ambiente (que afecta la actividad microbiana y la producción de biogás), la disponibilidad de materiales y la capacidad de mantenimiento. Además, es esencial considerar la seguridad del diseño, especialmente en relación con la acumulación y liberación del biogás.

4.4.3. Simulación del Desempeño Técnico y Validación Funcional

Cada algoritmo es sometido a una simulación funcional bajo condiciones operativas reales y extremas. Para ello:

- Se crean escenarios de simulación en Excel ajustando parámetros de entrada: dotación per cápita, coeficientes de retorno, población futura, DBO_5, producción de lodos.
- Se analizan puntos de falla y márgenes de seguridad del sistema ante sobrecargas hidráulicas, temperaturas extremas o interrupciones en el mantenimiento.

Este análisis permite predecir el comportamiento de cada alternativa bajo condiciones reales, lo que fortalece la capacidad del sistema para responder a las necesidades del entorno.

4.4.4. Evaluación de la Eficiencia, Sostenibilidad, Adaptabilidad y Asequibilidad de cada Alternativa en el Contexto Nicaragüense

Mediante un multicriterio se compara las alternativas incorporando indicadores cuantitativos y cualitativos en:

Eficiencia: Basándose en la remoción teórica de DBO, SST, reducción de coliformes, producción de biogás y otros sub y/o productos.

Sostenibilidad: Refiriéndose a la vida útil del sistema, frecuencia de mantenimiento, complejidad operativa, uso de materiales locales.

Adaptabilidad: Compatibilidad con las practicas sanitarias locales, resistencia climática, facilidad de instalación comunitaria.

Asequibilidad: Costos de construcción, operación y mantenimiento, calculados por m^3 tratado o por vivienda.

Monitoreo y Recopilación de Datos: Monitoreo constante de los prototipos en los simulados para recopilar datos sobre su eficiencia, operación y mantenimiento.

Análisis Costo-Beneficio: Estudio económico para determinar la asequibilidad de cada alternativa, considerando costos de implementación, operación y mantenimiento.

4.4.5. Análisis de Impacto Ambiental de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas

Se estructura una evaluación ambiental bajo metodología reconocida como la matriz de Leopold, listas de chequeo, esto incluye lo siguiente:

Definición del Alcance de la Evaluación

Establecimiento de los límites geográficos y temporales de la evaluación, además de identificar las fases del proyecto a evaluar teóricamente y por medio de simulación (construcción, operación, mantenimiento, post-operación)

Revisión de Normativas y Estándares.

Revisar y compilar las normativas y estándares locales e internacionales relacionados con el tratamiento de aguas residuales y la protección del medio ambiente, por otro lado, identificar criterios y parámetros clave que deben ser considerados en la evaluación, según los límites permisibles establecidos por MARENA, OMS y la legislación sanitaria nacional.

Establecimiento de la Línea Base Ambiental

Realizar un diagnóstico inicial del área donde se implementarán los sistemas de tratamiento, recopilar datos sobre calidad del agua, calidad del aire, características del suelo, biodiversidad, entre otros.

Identificación y Evaluación de Impactos Ambientales

Impactos negativos y positivos en fases de construcción, operación y post-operación, en áreas como agua, suelo, aire, flora, fauna, salud, economía, infraestructura y paisaje. Clasificar los impactos magnitud, extensión, duración y reversibilidad.

Comparar los resultados con los criterios y parámetros establecidos en las normativas y estándares

Propuesta de Medidas de Mitigación

Diseñar medidas para evitar, minimizar, restaurar o compensar los impactos negativos identificados.

V. Análisis y Discusión de Resultados

5.1. Identificación de las Necesidades y Características de las Viviendas Unifamiliares en Zonas Rurales y Periurbanas de Nicaragua en Relación con la Gestión de Aguas Residuales.

Las zonas rurales tienen una población menos de 2500 personas en cada localización según (Comisión Nacional del Agua, Managua [CONAGUA], 2015) mientras que la peri-urbanismo es definido como el crecimiento continuo de la ciudad y la absorción de los espacios rurales.

Se estima que las viviendas nicaragüenses albergan de 4 a 6 personas aproximadamente y un porcentaje alto de toda la población nacional pertenece a las áreas rurales y periurbanas, además se expone en artículos e informes realizados por instituciones gubernamentales correspondientes que estas áreas carecen de un servicio de aguas negras necesarias para un vivir mejor.

Debido a que la infraestructura de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales domésticas es insuficiente en zonas rurales la mayoría de los habitantes utilizan pequeños pozos y letrinas individuales para gestionar las aguas grises y los desechos humanos. Estos recursos hídricos suelen emplearse en la irrigación de jardines y cultivos pequeños, o simplemente se liberan en caminos o cursos de agua. Un 30.5% de la población rural carece de letrinas, y aquellas que existen necesitan ser evaluadas en cuanto a su estado actual. La disponibilidad de información para determinar la cobertura de saneamiento en estas áreas es muy limitada. (Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Centroamérica y República Dominicana).

En cuanto al peri-urbanismo las aguas residuales son administradas por empresas privadas que no brindan un tratamiento adecuado, se hace uso de inodoros como en la urbanización con la única diferencia que al verterlas toman un camino incorrecto, ya que las tuberías van a dar a ríos o cauces, ciertas áreas periurbanas cuentan con un sistema de tratamiento que probablemente no de abasto para todos sus residentes, además de no brindarles el mantenimiento necesario para

que cumpla con su función. (Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Centroamérica y República Dominicana)

Otro punto clave es la contaminación del recurso hídrico subterráneo ya que al construir una letrina o un sumidero cerca de una vertiente se da la alta probabilidad de que las aguas domésticas y el excremento se filtre y mezcle con el agua limpia, también está la contaminación del suelo y los cultivos, ya que por medio de estos se propagan las enfermedades. (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2017).

Por consiguiente, al no tener un correcto alcantarillado sanitario las enfermedades aparecen y afecta a toda la población contrayendo problemas de salud como el Chikungunya, Zika, cólera la diarrea disentería, la hepatitis a fiebre tifoidea y poliomielitis también agrava el retraso del crecimiento, entre otras. (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2017).

Para evitar que surjan estas patologías graves y brindar una mejor calidad de vida se necesita el correcto tratamiento de aguas residuales domesticas en viviendas unifamiliares, además de ser necesarias las capacitaciones de mantenimiento ya que lo recomendable es un tratamiento completo por vivienda, teniendo en cuenta el nivel económico de estas familias.

5.1.1. Diagnostico Nacional de Saneamiento en Zonas Rurales y Periurbanas

Los datos de organismos internacionales muestran que en las zonas rurales solo alrededor del 60% de la población cuenta con algún tipo de instalación para la disposición de excretas, lo que significa que el restante carece de instalaciones básicas para la evacuación de estas. En contraste, en las zonas periurbanas la cobertura de saneamiento es mayor, pero aún insuficiente, en el 2011 se estimaba que un 15.2% de la población no tenía ningún servicio sanitario, mientras que el resto se repartía entre letrinas (57.8%) y sistemas de alcantarillado o fosas sépticas (27%).

Según las investigaciones solo 31 de los 153 municipios del país cuentan con un sistema de alcantarillado sanitario operado por la empresa ENACAL (SICA, 2013). En el ámbito nacional, se calcula que apenas 57.6% del volumen de aguas residuales generadas recibe algún tratamiento, y el resto es vertido al ambiente sin ninguna depuración.

También es crítico el acceso a agua potable ya que se estima que solo el 29% de la población rural accede a agua considerada segura (FCAS, 2019), lo que da como resultado a pozos artesanales para que las familias se puedan abastecer lo cual agrava los riesgos sanitarios. En zonas periurbanas la cobertura de aguas potable también es limitada o el servicio es intermitente.

Tipología de Viviendas Unifamiliares Rurales y Periurbanas

Las viviendas unifamiliares en el medio rural nicaragüense suelen ser de construcción sencilla, con materiales locales y disponibilidad limitada de servicios. En general, predominan las casas de adobe, de zinc e incluso de plásticos en condiciones extremas, a veces con combinaciones de bloques de concreto en viviendas más consolidadas. Los techos comúnmente son de zinc.

El piso de tierra es muy común: más del 70% de las viviendas rurales cuentan con piso de tierra apisonada, lo cual refleja condiciones de habitabilidad básicas. En cambio, viviendas periurbanas tienden a mostrar una transición en materiales: Es frecuente el uso de bloques de concreto o ladrillo para paredes y planchas de zinc en el techo, con pisos de cemento en las viviendas de familias de ingresos medios. No obstante, en asentamientos periurbanos de origen espontáneo, pueden persistir materiales improvisados (tablones, láminas reutilizadas) y pisos de tierra, especialmente en barrios marginales.

La tabla 1 resume las características típicas de las viviendas unifamiliares en zonas rurales frente a zonas periurbanas de Nicaragua.

Tabla 1. Comparación de las características de viviendas unifamiliares en zonas rurales y periurbanas de Nicaragua.

Aspecto	Viviendas rurales	Viviendas periurbanas
Materiales de construcción	Paredes de bahareque, adobe o madera; techos de zinc o teja. Piso de tierra en >70% de hogares. Estructuras generalmente autoconstruidas, de calidad limitada.	Paredes de mampostería (bloques) mezcladas con madera o lámina en asentamientos precarios. Techos mayoritariamente de zinc. Piso de cemento en viviendas consolidadas, aunque persiste piso de tierra en asentamientos informales.
Abastecimiento de agua	Pozos artesanales, ríos o pipas; baja cobertura de agua entubada. Solo 29% con fuente mejorada segura. Muchos hogares acarrean agua y la almacenan.	Conexiones informales a la red urbana en algunos barrios; otros dependen de pozos comunales o camiones cisterna. Frecuentes cortes de agua y servicio intermitente. Calidad del agua dudosa por tuberías improvisadas.
Energía eléctrica	Cobertura parcial: en 2005, ~56% de viviendas rurales de municipios como Teustepe sin luz eléctrica. Uso de candiles, leña o baterías solares donde no hay red. Hoy en día todos tienen energía eléctrica.	Mayor acceso por proximidad urbana; muchos hogares logran conectarse a la red pública (a veces de forma irregular). Iluminación eléctrica disponible en la mayoría, aunque con variaciones de voltaje y legalidad de la conexión.

Eliminación de excretas	Predominan letrinas de hoyo individuales. Cerca de 1/3 de hogares sin ningún inodoro ni letrina (defecación al aire libre). Cero coberturas de alcantarillado sanitario público	Uso de letrinas o fosas sépticas rudimentarias. Muchas viviendas con inodoro descargan a pozos absorbentes comunes. Red de alcantarillado ausente; algunas urbanizaciones instalan sistemas privados, a menudo vertiendo a ríos sin tratamiento
Disposición de aguas grises	Vertido directo al entorno: aguas jabonosas corren por patios, caminos y quebradas. Pocos sumideros artesanales para infiltrar; riesgo de encharcamiento y focos de insectos.	Drenaje informal hacia cunetas y cauces pluviales. En barrios periurbanos, las aguas domésticas suelen mezclarse con aguas lluvia en zanjas abiertas, arrastrando contaminantes a los cuerpos de agua urbanos.

Nota: Elaboración propia con datos de INIFOM, INIDE y ENACAL.

Barreras para la Adopción de Tecnologías de Saneamiento Mejorado

A pesar de las necesidades evidentes, existen barreras multidimensionales que dificultan la adopción de tecnologías de saneamiento más seguras en las viviendas rurales y periurbanas:

- Barreras económicas: La pobreza en las zonas rurales y periféricas limita severamente la capacidad de inversión de las familias en infraestructura sanitaria. Construir una letrina mejorada, un biodigestor o una fosa séptica representa un costo que muchos hogares campesinos no pueden asumir sin subsidio. Por ejemplo, el ingreso rural promedio suele destinarse prioritariamente a alimentación y vivienda, relegando el gasto en saneamiento. Asimismo, la falta de financiamiento y subsidios suficientes ha hecho que los

programas gubernamentales (p. ej. FISE) no cubran a toda la población objetivo.

- Barreras educativas y culturales: En varias comunidades persisten prácticas y creencias tradicionales en torno al saneamiento. Algunas familias, acostumbradas por generaciones a defecar en el campo o monte, no perciben la urgencia de construir una letrina e incluso pueden tener resistencia cultural a usar baños por considerarlos insalubres cerca de la casa. La educación sanitaria es limitada; muchos pobladores desconocen la relación entre contaminación fecal y enfermedades, o la importancia de tratar las aguas residuales. Por ejemplo, hay reticencia a tecnologías como las letrinas aboneras o composteras por la idea de manejar excretas, o temor a que la fosa séptica contamine el pozo por falta de información técnica. Estas percepciones, sumadas a un bajo nivel educativo general, dificultan la adopción de soluciones innovadoras.
- Barreras técnicas y geográficas: La dispersión de la población rural (caseríos muy separados) dificulta soluciones colectivas como alcantarillados condominales. Además, las condiciones edáficas y geográficas presentan retos: zonas con nivel freático alto o propensas a inundación hacen inviables las letrinas tradicionales, pues los pozos sépticos se llenan de agua o filtran contaminantes al acuífero. En regiones de suelos rocosos es complicado excavar pozos profundos; en laderas muy inclinadas, la estabilidad de las letrinas es un problema. Nicaragua tiene regiones volcánicas donde el terreno poroso facilita la infiltración rápida (y potencial contaminación de mantos), así como zonas arcillosas donde el drenaje es pobre. Diseñar tecnologías de saneamiento apropiadas requiere adaptarse a estas variantes, lo que a veces excede la capacidad técnica local. A nivel periurbano, una barrera técnica es la falta de planificación: asentamientos irregulares crecen sin espacio reservado para redes sanitarias, y luego es costoso introducirlas.
- Institucional y de gestión: Históricamente, las políticas públicas se han enfocado más en agua potable que en saneamiento. Existe un rezago institucional en promoción de letrinas y tratamiento de aguas residuales.

Muchas alcaldías rurales carecen de Unidades Municipales de Agua y Saneamiento activas, o de personal técnico para dar seguimiento a proyectos. La operación y mantenimiento de las pocas obras construidas (sistemas sépticos comunales) es deficiente por falta de capacitación y apropiación comunitaria (SICA, 2013). Adicionalmente, la regulación y control son débiles: descargas ilegales a ríos y pozos ciegos mal construidos proliferan ante la ausencia de fiscalización en áreas dispersas.

5.1.2. Descripción del sitio de estudio

Diagnóstico de Saneamiento en Zonas Rurales y Periurbanas del Sitio de Estudio (Teustepe, Boaco).

El sitio de estudio es Teustepe, Boaco, conocido por sus manantiales de aguas termales, corrientes de agua, piscinas naturales y cascadas, está ubicado a 71 kilómetros al este de Managua y a 20 kilómetros de Boaco, la ciudad principal del departamento, Teustepe limita con San José de los Remates y Ciudad Darío al norte, Granada y Tipitapa al sur, San Lorenzo al este y Tipitapa al oeste. Con una extensión de 645.73 km^2 y una altitud de 560 msnm, según el Ministerio de la Salud su población asciende a 34,778 habitantes para el año 2023.

Ilustración 1. Teustepe, Municipio de Boaco



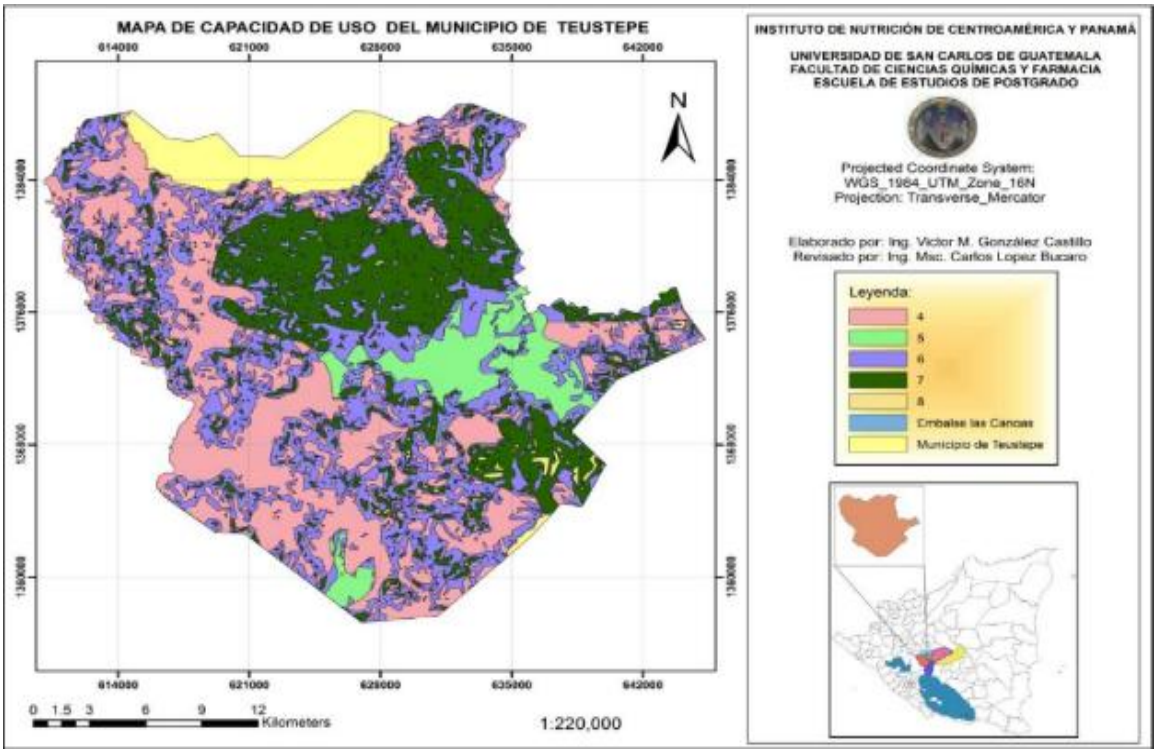
Nota: Tomado de Google Maps

El municipio tiene 18 sectores del Modelo de Salud Familiar y Comunitario (MOSAFC) que están clasificados por ser urbanos o rurales. En cuanto a territorio se refiere, este está dividido en 8 microrregiones y un área urbana.

Pedología del Municipio

La capacidad de uso del suelo se refiere a la manera más adecuada de utilizar la tierra dentro de cada tipo de suelo y clima, de modo que, a través de prácticas de manejo adecuadas, pueda ser explotada de manera sostenible con el menor impacto posible en los recursos naturales. (PREVDA).

Ilustración 2. Uso del suelo del municipio



Nota: Tomado de Teustepe en cifras

En la ilustración 2. Se observa que existen 7 categorías de uso del suelo, se describirán a continuación según la leyenda.

Sistemas agroforestales (4): Los suelos para sistemas agroforestales presentan condiciones ambientales restringidas y un riesgo moderado de erosión. Para mejorar su productividad, se recomienda combinar cultivos anuales con árboles, aplicar técnicas de conservación del suelo y captar agua. Suelen encontrarse en zonas de hasta 300 msnm, con un clima seco, temperaturas superiores a 25°C y lluvias entre 900-1200 mm anuales. Son aptos para cultivos como maíz, sorgo, caña de azúcar, frutales y árboles para leña. Estos suelos se ubican alrededor del embalse Las Canoas.

Cultivos especiales (5): Estos suelos se encuentran en áreas llanas con pendientes menores al 15% y una profundidad variable de superficial a profunda. Su textura es franco-arcillosa a arcillosa, con drenaje de moderadamente bueno a imperfecto. Destacan por su alta fertilidad y un CIC superior a 40. Reciben entre

800 y 1600 mm de lluvia anual y se localizan entre la cabecera municipal de Teustepe y el Empalme a Boaco.

Sistemas Silvopastoriles (6): Estos terrenos montañosos tienen pendientes del 15% al 30% y suelos de profundidad superficial a moderada, con textura franco-arcillosa a arenosa y fertilidad promedio. La presencia de piedras y la pendiente aumentan el riesgo de erosión y dificultan el uso de maquinaria. Además, los suelos poco profundos limitan el enraizamiento y la retención de agua. Para su manejo, se recomienda mantener cobertura vegetal y combinar pastizales con árboles para forraje, madera y leña. Se localizan en el noroeste del municipio de Teustepe.

Sistemas forestales (7): Esta categoría abarca suelos con topografía abrupta y pendientes mayores al 30%. Distribuidos por la subcuenca, presentan gran diversidad en suelo y clima. Cubren 30,154 hectáreas, el 21.8% del área total.

Protección (8): Esta categoría incluye terrenos con pendientes del 50% al 75%, suelos de profundidad variable y erosión de moderada a severa. Su textura va de franco arenosa a franco arcillosa, con abundante gravilla y rocas. Reciben entre 800 y 1200 mm de lluvia anual y tienen una temperatura media superior a 22°C.

Sistemas forestales: Son todos los suelos caracterizados por una topografía que va desde escarpada hasta muy escarpada, con pendientes que superan el 30%. Se encuentran en la zona norte del municipio. Estos terrenos son adecuados para la producción forestal, tanto de árboles de hoja ancha como de coníferas.

Propiedades Hidrológicas

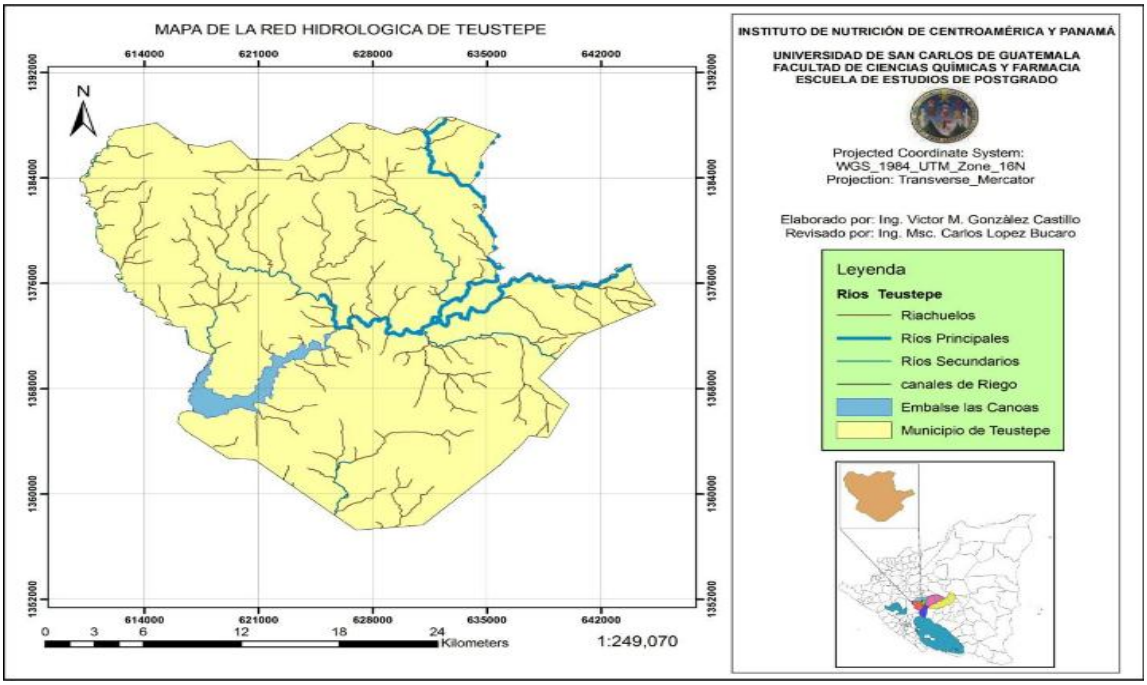
El clima en Teustepe se clasifica como Sabana Tropical Seca, con temperaturas que oscilan entre los 27° y 30°C, y una cantidad de lluvia que varía entre 1,000 y 1,200 mm. Lo característico de este clima es la distribución uniforme de las precipitaciones a lo largo de todo el año. (Quintero Manuel, 2013).

En los estudios climáticos, se destacan principalmente la temperatura y la distribución de agua. Teustepe, ubicada al oeste del departamento, presenta condiciones considerablemente más secas que otros municipios, con una

temporada seca prolongada, aunque las temperaturas siguen un patrón similar a los del área central y sur. (PREVDA).

Entre los principales ríos se encuentran el Malacatoya, el río Fonseca, El Barco, Asedades y Las Limas. Este último se forma a partir de vertientes hidrográficas que tienen su origen en las comunidades de La Cuesta, Potrerillo y Cusirisne. (González Victor, 2010), como se puede observar en la ilustración 3.

Ilustración 3. Mapa Hidrológico de Teustepe



Nota: Tomado de Teustepe en cifras

Servicio de Agua y Saneamiento

La empresa nacional de acueductos y alcantarillados, ENACAL, es responsable de proporcionar el suministro de agua potable en Teustepe. Tiene una sucursal en la cabecera municipal y su principal función es la gestión administrativa del servicio. En la zona urbana, el abastecimiento de agua se realiza mayormente a través de conexiones domiciliarias y puntos de acceso público. Por otro lado, en las áreas rurales, las fuentes de agua más comunes incluyen pozos, ríos o manantiales. En situaciones donde se implementen proyectos de agua potable, la comunidad asume la responsabilidad de la gestión del suministro mediante la

creación de comités de agua potable y saneamiento (CAPS). (González Victor, 2010).

En la ciudad no hay sistema de alcantarillado, por lo que el tratamiento de desechos se realiza principalmente con letrinas y/o sumideros, que cubren alrededor del 95% de la población. Sin embargo, la eliminación de excrementos sigue siendo un problema, ya que aproximadamente el 5% de la población carece de acceso a letrinas. En las áreas rurales, alrededor del 80% de la población utiliza letrinas. Esta situación es un riesgo para la salud y la higiene de la población, por el potencial peligro de contaminación de las fuentes de agua superficial que abastecen a la comunidad y de enfermedades asociadas a este tipo de contaminación (Proyecto Regional de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental [PREVDA]).

Un diagnóstico local encontró que muchas letrinas están en mal estado: estructuras colapsadas, pozos llenos o letrinas ubicadas demasiada cerca de pozos de agua. Este último punto es crítico, ya que la contaminación del agua subterránea por letrinas mal ubicadas es un riesgo real en Teustepe, varias comunidades se abastecen de pozos someros y nacientes, vulnerables a infiltrar bacterias fecales si las letrinas se sitúan a menos de 30 m o en la dirección de flujo del agua subterránea. Estudios de OPS han advertido que construir letrinas o sumideros cerca de vertientes eleva la probabilidad de que los desechos se filtren al acuífero, mezclándose con el agua de consumo. Lamentablemente, en ausencia de asesoramiento técnico, es común hallar pozos de consumo y letrinas coexistiendo en el mismo terreno sin la distancia de protección recomendada.

La siguiente tabla muestra algunos indicadores relevantes de las condiciones de vivienda y saneamiento en Teustepe, comparados con promedios nacionales, para dimensionar las brechas:

Tabla 2. Indicadores de viviendas y saneamiento en Teustepe vs promedios nacionales rurales.

Indicador (Censo 2005)	Teustepe	Promedio nacional (rural)
Viviendas particulares ocupadas	5,248	–
Hogares sin servicio higiénico (sin letrina ni inodoro)	~30%	33%
Viviendas con piso de tierra	71%	64% aprox.
Viviendas sin acceso a agua por red pública (pipa o pozo mecánico)	53%	45% (agua segura)
Viviendas sin electricidad	56%	42% (zona rural, 2005)
Cobertura de alcantarillado sanitario	0%	0% (rural) – 20% (municipios con alcantarillado)

Nota: Elaboración Propia con datos de INIDE, COSUDE, FACS

Como muestra la tabla 2, Teustepe refleja patrones similares a los del resto del país en áreas rurales: cobertura nula de alcantarillado, alta dependencia en letrinas y una fracción significativa de hogares sin ningún servicio sanitario. Las carencias en materiales (piso de tierra, viviendas inadecuadas) y servicios básicos (agua, luz) evidencian las condiciones de pobreza que inciden en el bajo nivel de saneamiento (Teustepe es categorizado de pobreza extrema alta según el mapa de NBI 2005, con numerosas comunidades en los cuartiles más pobres).

Frente a esta realidad, en años recientes se han emprendido algunas iniciativas locales. La alcaldía de Teustepe, con apoyo de instituciones como el Nuevo FISE y organismos no gubernamentales, ha impulsado la construcción de letrinas aboneras y pozos sépticos en ciertas comunidades. Por ejemplo, en la comarca Los Bajos de Cerro de Piedra se realizó una asamblea de concertación para un proyecto de agua potable y saneamiento con apoyo del FISE (FISE, 2024). También ENACAL ha mejorado el sistema de agua en la cabecera (perforación

de nuevos pozos y tanques) (FISE, 2024), lo cual indirectamente mejora las condiciones sanitarias al proveer más agua para higiene. Sin embargo, persiste una gran brecha de cobertura, muchas zonas rurales de Teustepe continúan sin saneamiento formal.

Tipología de Necesidades Sanitarias no Cubiertas

El análisis de las condiciones sanitarias en las viviendas unifamiliares del municipio de Teustepe ha revelado una serie de deficiencias estructurales y funcionales en la gestión de las aguas residuales domésticas. Se ha determinado que una proporción significativa de las viviendas en zonas rurales y periurbanas no cuenta con infraestructura adecuada para el tratamiento o disposición segura de estas aguas. La problemática se manifiesta de diversas formas, dependiendo del nivel socioeconómico de las familias, el tipo de vivienda y el acceso a servicios básicos.

Una de las situaciones más recurrentes es la descarga directa de aguas grises (provenientes del lavado de ropa, utensilios y aseo personal) hacia áreas adyacentes a la vivienda, sin ningún tipo de tratamiento previo. En muchos casos, estas aguas son vertidas sobre superficies de tierra, drenajes improvisados o caminos comunitarios de tierra batida, generando encharcamientos, proliferación de vectores y degradación ambiental local. Este patrón es particularmente notorio en viviendas ubicadas en pequeñas colinas, donde el escurrimiento superficial conduce los vertidos hacia zonas bajas compartidas entre viviendas, constituyendo focos de contaminación.

En cuanto a los pozos de infiltración existentes, en su mayoría no cumplen con los requisitos técnicos mínimos establecidos por la NTON 09 006-11 para garantizar un tratamiento adecuado del efluente. Muchos presentan signos de saturación, rebose o colapso estructural debido al uso continuo sin mantenimiento periódico. En algunos casos, el diseño mismo de estos pozos fue improvisado o construido con materiales no adecuados, como llantas, barriles plásticos o piedras sin recubrimiento, lo cual reduce su vida útil y eficiencia.

Otro hallazgo relevante es la ausencia de soluciones adaptadas para la disposición de aguas negras (provenientes de sanitarios), ya que muchas familias optan por letrinas tradicionales que no cuentan con mecanismos de retención o tratamiento de líquidos percolados. Estas estructuras, a menudo cercanas a fuentes de agua subterránea o pozos de abastecimiento doméstico, representan un riesgo considerable para la salud pública.

Finalmente, se observó una baja apropiación comunitaria de la problemática, acompañada por limitaciones técnicas y económicas que impiden a muchas familias acceder a soluciones sostenibles. Esto refuerza la necesidad de alternativas tecnológicas adaptadas, de bajo costo, fácil mantenimiento y con alta eficiencia sanitaria, como las evaluadas en esta investigación.

Actividad Económica

Teustepe cuenta con una industria artesanal que se centra en productos de primer procesamiento. Esta industria es poco diversificada y carece de especialización, además de enfrentar cierto rezago tecnológico, de recursos humanos y empresariales. En líneas generales, no hay una base industrial productiva en el municipio, aunque existen pequeños establecimientos familiares (Proyecto Regional de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental [PREVDA]).

En la actividad económica se destaca la producción divida en tres sectores:

- Sector primario (Agricultura): Los cultivos son de ciclos cortos como el maíz, sorgo, frijol, etc. En menor escala se encuentran el tomate, sandia, chayote, ayote, chiltoma, chile, etc.
- Sector Secundario (Producción Pecuaria): La ganadería ha sido la actividad económica más destacada en el municipio, se estima que existe más de 20,000 cabezas de ganado las cuales rinden dos litros de leche cada una.
- Otros sectores: La pesca manual constituye otra fuente de ingresos en ciertas áreas del municipio. Cuatro comunidades de Teustepe (El Boquerón, La Concha, El Caracol y El Ventarrón) se dedican a la pesca en el cuerpo de agua local. Esta labor se lleva a cabo en pequeñas embarcaciones de madera y se utilizan redes, chinchorros y atarrayas para la captura.

Infraestructura Vial

El municipio de Teustepe cuenta con una red de vías interconectadas, con cuatro principales rutas que facilitan el acceso tanto a las comunidades locales como a otros municipios del departamento. La red vial interna del municipio es de 676.63 kilómetros, de los que 39.52 están asfaltados, 160.54 son transitables todo el año y 18 son caminos aptos para el verano. En el área urbana, las calles están revestidas con adoquines en 6.815 metros, pavimento en 0.671 metros y macadán en 3.690 metros. La vía principal que conecta con el casco urbano mide 2 kilómetros y está pavimentada. (González Victor, 2010).

Amenazas Naturales

El territorio municipal está en una región con terreno accidentado, caracterizado por pendientes que superan el 30%, la mayoría propicios para actividades forestales. Pero estos terrenos se utilizan principalmente para la ganadería y la agricultura. Esta situación, junto con la inadecuada gestión de las actividades no compatibles con el potencial natural del área, como quemas y deforestación, ha provocado la degradación de los suelos debido a la erosión causada por el agua y el viento. Como resultado, estos suelos se vuelven susceptibles a fenómenos como deslizamientos de tierra, derrumbes y deslaves (Proyecto Regional de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental [PREVDA]).

Entre los cerros que representan esta amenaza se encuentran destacados Los Guácimos y Huacaltepec (San Jerónimo). Las comunidades expuestas a estos riesgos son San Jerónimo, Bramadero y San Rafael. También se presentan amenazas como deslizamientos, derrumbes, sequias, inundaciones, deforestaciones, erosión, quemas agropecuarias.

Manejo de Residuos Sólidos

La contaminación por desechos sólidos es un grave problema en Teustepe, principalmente debido al desecho de envases de productos químicos agrícolas en áreas cercanas a las fuentes de agua, una práctica común entre los agricultores. La falta de un centro de acopio de basura y la falta de conciencia ambiental en la población agravan la situación, con basura dejada al aire libre y vertederos a cielo

abierto cerca de las comunidades y cursos de agua. Aunque la alcaldía recolecta basura en el área urbana una vez por semana, el servicio no cubre toda la ciudad, lo que lleva a prácticas de quema y entierro de basura. Además, la basura recolectada no recibe tratamiento sanitario y el área urbana solo cuenta con un servicio de limpieza de calles (Proyecto Regional de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental [PREVDA]).

Caracterización Social del Entorno Habitual

Los hábitos de uso del agua están marcados por la disponibilidad intermitente y las condiciones climáticas. La dotación promedio de agua potable en las viviendas rurales se estima entre 60 y 80 litros por persona al día, de los cuales un 80 % se convierte en aguas residuales domésticas que requieren tratamiento adecuado (MEFCCA, 2017). En muchas comunidades, el agua utilizada para limpieza de utensilios, aseo personal y descarga de inodoros se descarga directamente al suelo o a cuerpos receptores sin ningún tratamiento previo.

En cuanto al saneamiento, las viviendas no contaban con ningún sistema formal de eliminación de excretas. Aquellas que sí disponen de algún sistema utilizan en su mayoría letrinas rudimentarias, muchas veces colapsadas o mal construidas, sin aislamiento del subsuelo ni mecanismos de tratamiento de aguas grises. Se reporta además el uso frecuente de pozos de absorción sin pretratamiento, los cuales, por la naturaleza arcillosa de los suelos, tienden a saturarse rápidamente, generando problemas de escorrentía, proliferación de vectores y contaminación del entorno inmediato (INIDE, 2005; Menéndez Wither, 2021).

Estas aguas contienen elevada carga orgánica y sólidos suspendidos provenientes de residuos fecales, aguas grises de cocina y baños, así como detergentes, grasas y nutrientes como nitrógeno y fósforo (MAGFOR, 2019). La falta de sistemas de pretratamiento o tratamiento primario genera una alta vulnerabilidad ambiental en los alrededores de las viviendas, especialmente en épocas de lluvia donde la saturación de suelos es más común.

Estas condiciones reflejan la necesidad urgente de implementar soluciones de tratamiento de aguas residuales que sean técnicamente viables, económicamente accesibles y adaptadas al contexto rural del municipio.

5.1.3. Condiciones Físicas y Ambientales para la Implementación de Tecnologías Descentralizadas.

La implementación eficiente de sistemas unifamiliares de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales y periurbanas depende en gran medida de las condiciones físicas y ambientales del sitio. En el caso del municipio de Teustepe, las particularidades geográficas, edafológicas y climáticas influyen de manera determinante en la selección, dimensionamiento y desempeño de las tecnologías descentralizadas.

Desde el punto de vista topográfico, Teustepe presenta una morfología moderadamente ondulada, con altitudes que oscilan entre los 250 y 500 msnm. En las comunidades periurbanas del núcleo municipal se observan pendientes suaves y acceso parcial a caminos revestidos. Sin embargo, en las zonas rurales predominan pendientes moderadas y caminos de tierra, lo que limita el transporte de materiales y condiciona el tipo de infraestructura que puede ser instalada. En este contexto, es prioritario que los sistemas propuestos no dependan de electricidad ni maquinaria compleja, siendo favorables los diseños compactos, de bajo mantenimiento y con operación por gravedad.

En cuanto a la naturaleza del suelo, el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2018) clasifica los suelos predominantes en la zona como franco-arcillosos y arcillosos, Este factor implica una limitación para sistemas que dependen de procesos de infiltración profunda, como pozos de absorción o zanjas de percolación. (Menéndez Wither, 2021). Esto obliga a considerar profundidades y áreas suficientes para evitar colapsos o reboses, así como intervalos adecuados de limpieza y reposición.

Respecto al nivel freático, se observaron variaciones importantes entre zonas. En comunidades como Santa Bárbara y El Nancital, el nivel freático superficial se encuentra a menos de 2.5 metros de profundidad durante la temporada lluviosa,

lo cual representa una restricción crítica para la instalación de cámaras sépticas profundas o biodigestores tradicionales, debido al riesgo de contaminación de acuíferos. En cambio, en sectores como El Carrizal y Las Lajitas, los suelos más elevados permiten un mayor margen de seguridad hidráulica.

5.1.4. Análisis Ambiental para Sistemas Descentralizados de Tratamiento de Aguas Residuales en Teustepe.

Este análisis ofrece una evaluación integral de las condiciones ambientales, técnicas y socio sanitarias del municipio de Teustepe, estableciendo las bases para el diseño de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales domésticas. Los resultados demuestran que el contexto de Teustepe refleja las típicas limitaciones de las zonas rurales nicaragüenses, donde se combinan infraestructura deficiente, suelos heterogéneos, viviendas dispersas, acceso limitado a servicios básicos y riesgos sanitarios latentes como se muestra en la tabla 3.

En este escenario, las soluciones descentralizadas, modulares y de bajo mantenimiento se posicionan como la alternativa más viable. Las tecnologías propuestas han sido diseñadas para cumplir con estos criterios, garantizando alta eficiencia en remoción de contaminantes, adaptabilidad al entorno y sostenibilidad operativa.

Los resultados de este análisis son un instrumento esencial que permite para sintetizar de forma visual y técnica las condiciones de las viviendas unifamiliares evaluadas en el municipio de Teustepe, permite establecer, de manera sistemática, los factores clave que condicionan la elección e implementación de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales domésticas.

El sitio de estudio abarca diversas comunidades rurales distribuidas en las microrregiones del municipio, como La Cuesta, San Jerónimo, Potrerillo, Las Cañitas y La Concha, donde predominan viviendas de autoconstrucción con techos de zinc, paredes de adobe o bloque, pisos de tierra o concreto, y donde el acceso a servicios de agua potable es mayoritariamente a través de pozos o sistemas comunitarios gestionados por CAPS. La mayoría de estas viviendas

carece de acceso a sistemas formales de saneamiento y depende de letrinas o pozos de infiltración artesanales, muchos de ellos en estado crítico.

Tabla 3. Análisis ambiental para sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en el Municipio de Teustepe: Clima, suelos, hidrología y contexto socio sanitario.

Elemento técnico	Características encontradas
Ubicación geográfica	Municipio de Teustepe, Departamento de Boaco, Nicaragua
Altitud	560 m.s.n.m.
Clima	Sabana Tropical Seca (27–30 °C; 1000–1200 mm de lluvia anual)
Tipo de suelo	Franco-arcilloso, arcilloso, arenoso; con infiltración promedio de 0.12 m/día
Fuentes de agua	Pozos artesanales, manantiales, y ríos locales (Malacatoya, Las Limas, Fonseca)
Población estimada	34,778 habitantes (distribuidos en 18 sectores, 109 comunidades)
Tipo de vivienda	Unifamiliares, autoconstrucción, sin conexión a redes de alcantarillado
Gestión del agua potable	ENACAL (urbano), CAPS (rural)
Gestión de aguas residuales	Letrinas, pozos de infiltración, descarga a superficie
Problemática sanitaria	Contaminación de fuentes por filtración, deficiencia de tratamiento
Accesibilidad vial	Red vial rural poco desarrollada, caminos de acceso estacionales

Nota: Elaboración propia con información de Teustepe en Cifras

5.2. Desarrollo de Modelos para cada Alternativa Tecnológica de Tratamiento de Aguas Residuales

En este apartado se presentan los modelos desarrollados para cuatro sistemas de tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas, diseñados específicamente para viviendas unifamiliares del municipio de Teustepe. Estos modelos fueron concebidos bajo criterios de eficiencia técnica, viabilidad operativa, sostenibilidad ambiental y adaptabilidad a las condiciones geográficas, climáticas y socioeconómicas del contexto rural y periurbano del sitio de estudio.

El diseño de estos sistemas responde a las necesidades tecnológicas de la realidad nacional, priorizando tecnologías de bajo costo, fácil mantenimiento y capacidad de tratamiento suficiente para proteger la salud pública y los recursos hídricos.

Los modelos considerados incluyen: Fosa séptica, filtro biológico anaerobio de flujo ascendente (FAFA), un sistema combinado (Fosa séptica + FAFA), y un biodigestor unifamiliar de flujo continuo.

Para cada sistema se describe: su principio de funcionamiento, los componentes principales, el fundamento técnico que respalda su diseño, los cálculos hidráulicos y sanitarios aplicados, así como esquemas y planos constructivos que permiten su implementación efectiva. Este proceso de modelado tecnológico incorpora también las recomendaciones de normas nacionales (NTON) y literatura técnica especializada (Metcalf & Eddy, 2003; Crites & Tchobanoglous, 1998), garantizando que los dispositivos cumplan con los estándares de calidad exigidos.

5.2.1. Fosa Séptica

El proceso de dimensionamiento del sistema de fosa séptica con pozo de absorción parte de la necesidad de garantizar un tratamiento efectivo de las aguas residuales domésticas generadas en viviendas unifamiliares rurales del municipio de Teustepe.

Principio de Funcionamiento y Elementos Constitutivos

La funcionalidad y operación de una fosa séptica se da en tres etapas las cuales son físicos, química y biológicas. Cuando se descarga el inodoro o se usa el lavamanos, los residuos líquidos y sólidos fluyen a través de la tubería de desagüe hacia la primera cámara de la fosa séptica. En esta etapa, los sólidos más pesados se sedimentan en el fondo formando lodos, mientras que las grasas y aceites flotan en la superficie, creando una capa de espuma o nata (Peña Varón, 2017).

A continuación, el agua parcialmente tratada pasa a la segunda cámara a través de un sistema de comunicación que impide el paso de sólidos flotantes y lodos sedimentados. En esta segunda cámara, continúa la sedimentación de partículas más finas y se intensifican los procesos de digestión anaerobia, reduciendo aún más la carga orgánica del efluente. Este proceso disminuye la concentración de contaminantes y mejora la calidad del agua antes de su disposición final (Ramírez & Gómez, 2019).

Posteriormente, el efluente clarificado sale de la segunda cámara y es conducido hacia el pozo de absorción. Este pozo es una excavación rellena con material permeable como piedra de rio, grava, piedrín y arena, que permite la filtración del agua al subsuelo. Durante este proceso, los microorganismos presentes en el suelo continúan degradando los compuestos orgánicos restantes, logrando un tratamiento adicional antes de que el agua se infiltre en las capas más profundas del terreno (Gutiérrez et al., 2020).

Finalmente, el lodo acumulado en el fondo de la fosa experimenta reacciones de degradación anaerobia, reduciendo su volumen hasta un 50% y desprendiendo biogás, y en menor cantidad compuestos del azufre lo que explica los olores desagradables que emanan las fosas. Estos deben ser extraídos periódicamente mediante un proceso de limpieza. (Rodríguez & Pérez, 2018).

El modelo adoptado en esta investigación corresponde a una fosa séptica bicameral, diseñada conforme a los principios establecidos por la norma NTON 05-010-98, NTON 05 027-05 y la guía técnica del Banco Mundial (2019). Está compuesta por dos cámaras: una de sedimentación primaria y otra de

estabilización secundaria, conectadas mediante un paso hidráulico inferior. Las tuberías de entrada y salida están diseñadas con “T” invertidas para evitar el escape de sólidos y mejorar el flujo laminar. El sistema incluye un pozo de absorción adaptado a las condiciones edáficas locales, construido con materiales locales.

Criterios de Diseño Hidráulico y Sanitario Aplicados

El diseño de la fosa séptica con pozo de absorción se fundamenta en principios de ingeniería sanitaria que buscan garantizar una adecuada retención hidráulica, separación de sólidos, digestión de materia orgánica y una disposición final del efluente compatible con las características del suelo y la protección de fuentes de agua. En primer lugar, el caudal de diseño se estimó a partir de la dotación de agua potable recomendada por la NTON 09-007-19 para viviendas unifamiliares, que establece un valor de 80 litros por persona por día, aplicando un coeficiente de retorno del 80%, lo que equivale a 64 litros/persona/día de aguas residuales generadas (MIFIC & INAA, 2019).

El tiempo de retención hidráulico se seleccionó conforme a los rangos sugeridos por la literatura especializada y normativa centroamericana, entre 12 y 24 horas (Metcalf & Eddy, 2003), garantizando la sedimentación de sólidos y la flotación de grasas. En este diseño se adoptó un tiempo de retención de 16.49 horas, valor que permite un equilibrio técnico entre eficiencia y volumen constructivo.

Para la acumulación y digestión de lodos se considero una tasa de producción de lodos de 40 litros por persona al año, apropiada para climas cálidos como el de Teustepe (Jaramillo, 2004). Esta estimación dimensiona los comportamientos de almacenamiento y establecer un intervalo de remoción anual, asegurando una operación segura y sostenible del sistema.

En cuanto a las condiciones del suelo, se asumió un coeficiente de infiltración promedio de 0.12 m/día, característico de los suelos franco-arcillosos de la región, con base en los estudios técnicos realizados y en la literatura edáfica aplicable (Menéndez Wither, 2021). Esta tasa condicionó el dimensionamiento del pozo de

absorción y su profundidad útil, garantizando un proceso de percolación eficiente sin saturación prematura del subsuelo.

Desde el punto de vista sanitario, para futuras construcciones se deberá tener en cuenta las distancias mínimas de protección establecidas por la NTON 05 027-05, que exige mantener más de 20 metros de separación entre los puntos de infiltración y fuentes de agua para prevenir riesgos de contaminación de acuíferos. Asimismo, tomar en cuenta recomendaciones del PAHO (2006) sobre la necesidad de ventilación adecuada, sellado de cámaras, y protección contra ingreso de aguas pluviales.

El diseño estructural respondió a una relación longitud/ancho de 3:1 para optimizar el flujo laminar y evitar la resuspensión de sólidos, conforme a lo propuesto por Qasim (1994). Se estableció una profundidad útil mínima de 1.20 m, tal como se indica en manuales internacionales de diseño de sistemas sépticos para zonas rurales, asegurando la estabilidad hidráulica del sistema.

Implementación

Según la norma de diseño de los sistemas domésticos y particulares para el tratamiento y disposición de aguas servidas, la implementación de una fosa séptica requiere de pruebas y puestas en marcha, A continuación, se detallan los aspectos más importantes de esta etapa:

- Rata de absorción: es un proceso en que se mira como el agua se infiltra en el suelo. Este posee una eficiencia que permite completar el tratamiento natural de contaminantes en el efluente, evita la acumulación de efluente en la superficie y reduciendo riesgos de contaminación.
- Pruebas de Estanqueidad: se realiza un llenado del tanque con agua hasta su capacidad máxima y se observa durante un periodo de tiempo determinado este puede ser de 24 horas para verificar si hay disminución del nivel de agua. Una vez estanca el agua se realiza una prueba de flujo para asegurarse de que el efluente fluya adecuadamente a través del sistema.

- Simulación de uso: Se puede simular el uso de agua en el hogar para observar cómo se comporta el sistema bajo condiciones normales. Esto puede incluir la activación de grifos y el uso de inodoros.

Cálculos Técnicos y Parámetros de Dimensionamiento

Los cálculos presentados fueron ejecutados con base en un algoritmo estructurado en Excel, que sistematiza la aplicación de fórmulas hidráulicas y sanitarias ajustadas a las condiciones técnicas locales. Este diseño responde a una población estimada de 8 personas por vivienda, considerando un periodo de diseño de 20 años y condiciones climáticas y edáficas específicas.

Tabla 4. Dimensionamiento hidráulico y geométrico para el sistema de Fosa Séptica con Pozo de Absorción.

Parámetros	**Nomenclatura**	**Resultados**	**Unidades**
Dotación de Agua Potable	D_t	80	L/Personas/día
Caudal o flujo diario de Aguas Residuales	Q_{AR}	0.51	m3/día
Tiempo de Retención Hidráulica	t_{rh}	0.69	día
Volumen Total de la Fosa Séptica	V_{fosa}	1.61	m3
Área de la fosa	A	1.34	m2
Profundidad neta	Ht	2.34	m
Pozo de Absorción			
Coeficiente de Infiltración	Ci	0.12	m/día
Entrada del caudal	Q_{SFS}	0.41	m^3/día
Área de Infiltración	A	3.41	m^2
Profundidad total del pozo	H_{Total}	2.07	m

Nota: Elaboración propia

Dimensionamiento de la Fosa Séptica

Se estimó una población futura de 8 habitantes, aplicando una tasa de crecimiento de 0.0156 % anual durante el horizonte de diseño. Se consideró una dotación de 80 L/hab·día, conforme la NTON 09-007-19, lo que implica un consumo de agua potable estimado para uso doméstico. Con un coeficiente de retorno del 80 %, se obtiene un caudal diario de aguas residuales de 0.512 m³/día, valor fundamental para el cálculo de tiempos de retención, volúmenes y dimensiones estructurales del sistema.

El tiempo de retención hidráulico (T_{RH}) se calculó aplicando la ecuación empírica basada en población y dotación. Se obtuvo un T_{RH} de 0.69 días (16.49 horas), garantizando un periodo suficiente para la sedimentación primaria y la digestión parcial de sólidos.

El volumen total de la fosa fue de 1.61m³, distribuido en dos cámaras: 1.07m³ en la primera (sedimentación) y 0.53m³ en la segunda (digestión). Estos volúmenes se ajustan a los criterios de diseño propuestos por Metcalf & Eddy (2014) y la práctica recomendada por la OMS para viviendas rurales. En cuanto al volumen de sedimentación es de 0.35m³, el volumen de digestión y almacenamiento de lodos de 0.56m³, el volumen de lodos producidos es de 0.50m^3/personas/año, el volumen de natas (mínimo), 0.7m³.

La profundidad útil mínima fue de 1.20 m, y la profundidad total de 2.34 m, considerando espacio libre (0.57m), zona de lodos (0.42m) y profundidad de natas (0.52m), profundidad libre de natas sumergida (mínimo) (0.10m) y la profundidad requerida para la sedimentación. Las cámaras fueron dimensionadas con base en una relación largo/ancho de 3:1, resultando en 2.01m de longitud total, con un ancho constante de 0.67m. Esto cumple con la relación recomendada de $2 \leq L/B \leq 4$ (Kern, 2011).

Dimensionamiento del Pozo de Absorción

Dado un coeficiente de infiltración de 0.12 m/día (para suelos franco-arcillosos, según Menéndez Wither, 2021), se calculó un área de infiltración de 3.41 m², lo que se traduce en una altura útil de 0.72 m para el pozo de absorción. Se dejó

una altura de seguridad adicional de 0.50 m y profundidad de lodos de 0.85 m, alcanzando una profundidad total de 2.07 m. Estos valores garantizan la capacidad de percolación y retención de lodos acumulados durante 5 años.

Consideraciones Constructivas y Operativas

El éxito funcional de una fosa séptica con pozo de absorción en zonas rurales y periurbanas como Teustepe no depende únicamente del diseño hidráulico y estructural, sino también de las condiciones reales de construcción y de la operación cotidiana del sistema. Este apartado presenta las consideraciones técnicas clave que deben seguirse durante la ejecución de la obra y en su etapa de uso, garantizando la eficiencia y durabilidad del sistema.

Desde el punto de vista constructivo, es fundamental que el sistema sea implementado con materiales durables y accesibles localmente. El tanque séptico debe construirse con paredes de bloque de concreto, para evitar filtraciones al entorno. El fondo debe diseñarse con una pendiente suave hacia la salida del 2%, favoreciendo el flujo laminar y evitando la acumulación de sólidos. Las dimensiones del pozo de absorción y sus materiales (grava, piedra y arena) deben respetar las capas diseñadas (según el plano técnico proporcionado), asegurando una tasa adecuada de infiltración según los ensayos previos del suelo.

Materiales de Construcción

La estructura de la fosa séptica debe ser resistente y durable. Para ello, se refuerza con acero #2 y #3 estándar y alambre de amarre #18, lo que permite una mayor estabilidad ante movimientos del terreno. La utilización de refuerzos en estructuras de concreto es clave, ya que reduce el riesgo de fisuras y prolonga la vida útil del sistema (ACI, 2015).

Posteriormente, se construyen vigas sísmicas y losa de concreto para obtener resistencia y durabilidad, luego se instalan bloques con vigas intermedias y vigas corona, usando moldes temporales de madera (encofrado) para darle forma a las paredes y se retiran una vez fraguado el concreto (desencofrado). Según la normativa ASTM C94, el concreto utilizado debe tener una resistencia mínima de 3,000 PSI para asegurar su durabilidad y resistencia a la humedad.

En el interior de la fosa, se aplica un acabado de repello fino tipo pizarra, que evita filtraciones y facilita la limpieza. Además, se coloca una base de agregado grueso y mediano (piedra bolón), lo que mejora la estabilidad y el drenaje del sistema.

Luego, se elaboran o instalan cajas de registro, permitiendo la inspección y mantenimiento del sistema. La correcta instalación de estos elementos es clave para evitar obstrucciones y facilitar la operación de la fosa (EPA, 2021).

Fácil Acceso para Limpieza

La tapa de inspección debe estar siempre accesible, preferiblemente señalizada, y ubicada a nivel del suelo o ligeramente elevada para evitar ingreso de aguas pluviales. La ventilación del tanque debe mantenerse libre de obstrucciones, permitiendo el escape de gases sin poner en riesgo la salud de los usuarios.

Condiciones Hidráulicas y Control Operativo

En lo referente a operación, se debe garantizar un mantenimiento anual, especialmente para la remoción de lodos. El tiempo estimado de llenado de la capacidad útil de lodos se estableció en 1 año, por lo cual la frecuencia mínima de extracción debe ser anual, usando procedimientos manuales o mecánicos que no afecten las paredes internas del sistema.

Mantenimiento del Sistema

El mantenimiento y la limpieza de una fosa séptica son procesos que se llevan a cabo cada 1 a 5 años, dependiendo del tamaño de la fosa y el uso de la misma. Para asegurar que el sistema funcione correctamente y evitar problemas como obstrucciones, rajaduras o malos olores.

Inicialmente se realiza una Inspección de la fosa séptica esto incluye revisar la cubierta de la fosa, verificar si hay signos de filtraciones o daños, y comprobar el nivel de los sólidos acumulados, luego se comienza el vaciado de la fosa. Para ello, se utiliza un camión de succión especializado, que con una bomba extrae los residuos líquidos y sólidos. Este camión está equipado con una manguera de gran diámetro que permite succionar los residuos de manera eficiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). Una vez vaciada la fosa, es

recomendable limpiar sus paredes internas y el fondo. Para ello, se eliminan lodos adheridos y otros materiales sólidos mediante agua a presión y cepillos industriales (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2020).

Ubicación e Instalación

Se debe observar estrictamente la distancia mínima en metros entre el sistema y cualquier fuente de agua, conforme a la NTON 05-010-98. El pozo de absorción debe ubicarse en terrenos donde no haya riesgo de saturación hídrica durante la temporada lluviosa. En su construcción, se debe evitar el uso de selladores o aditivos impermeabilizantes en las paredes, ya que esto contraviene el principio de infiltración progresiva del efluente tratado.

Preparación del Terreno

El primer paso en la construcción de una fosa séptica es la nivelación y trazo del terreno asegurando que la ubicación elegida tenga una pendiente adecuada para el correcto flujo de las aguas residuales.

Según la Guía Técnica de Saneamiento del Banco Mundial (2019), una vez identificado el lugar ideal, se realiza la excavación estructural con las dimensiones establecidas. Además, la profundidad de la excavación ira dependiendo de la capacidad de la fosa y el tipo de suelo (EPA, 2021).

Luego de la excavación, se realiza el relleno y compactación, utilizando materiales adecuados como piedra de rio, grava, piedrín o arena para mejorar la estabilidad del sistema.

Adaptabilidad y Sostenibilidad

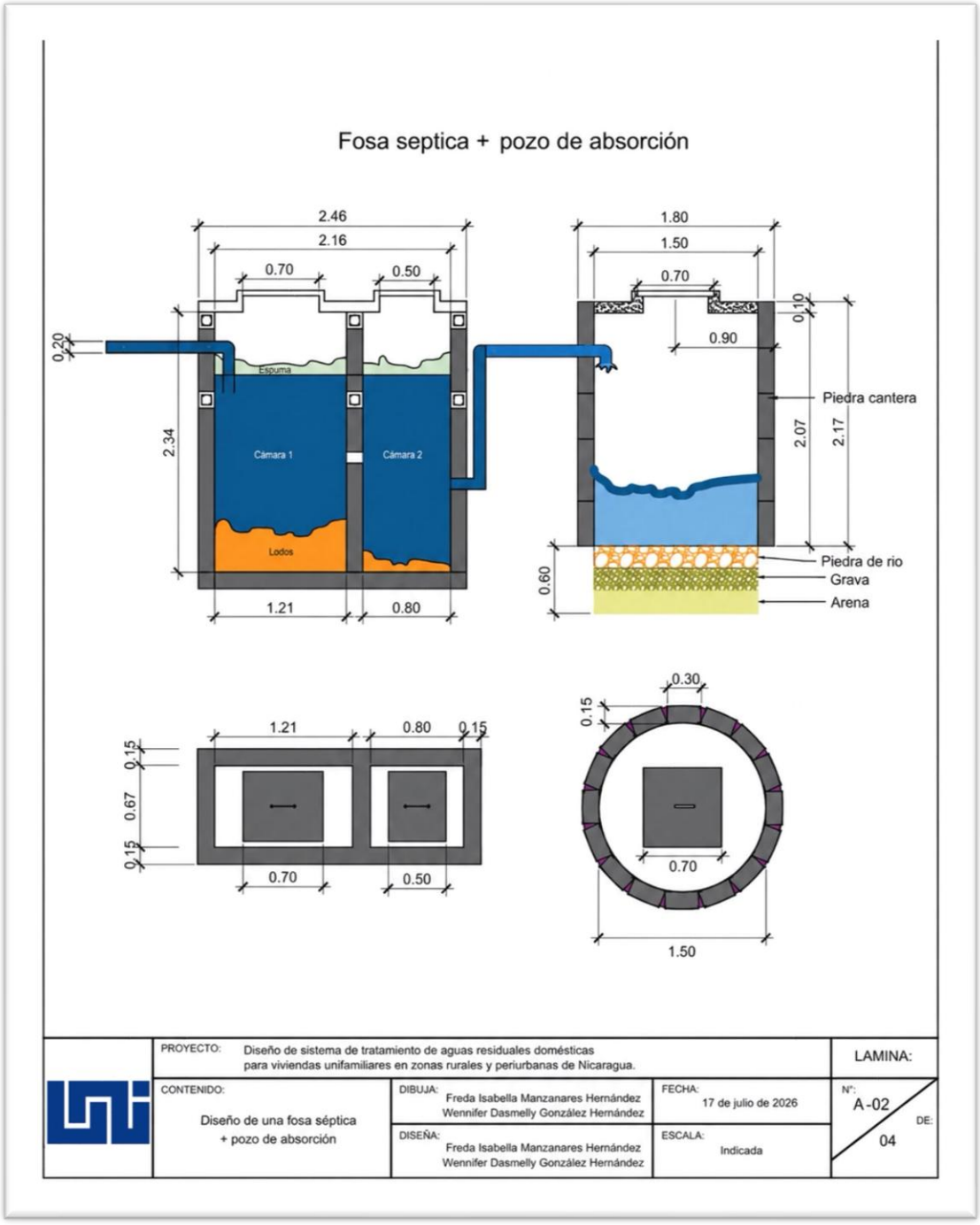
La comunidad beneficiaria debe ser instruida en prácticas adecuadas para el uso del sistema, tales como no verter grasas, químicos ni aguas de lluvia al tanque, así como mantener controlado el ingreso de sólidos suspendidos, lo que prolongará la vida útil del sistema y reducirá la necesidad de intervenciones frecuentes.

Finalmente, el sistema fue diseñado con criterios de bajo costo, alta eficiencia y factibilidad comunitaria, permitiendo su construcción con mano de obra local

capacitada y materiales disponibles en el entorno, facilitando su réplica en otras comunidades rurales del país. Además, no requiere energía ni productos químicos

Planos Técnico

Plano 1. Plano Técnico de Fosa Séptica con Pozo de Absorción para Vivienda Unifamiliar



Nota: Elaboración propia con base a la NTON 05-010-98 y criterios de diseño hidráulico sanitario.

Geometría Estructural de la Fosa Séptica

La fosa séptica tiene forma prismática rectangular de planta alargada. Esta configuración responde a criterios hidráulicos fundamentales, garantizando un flujo horizontal laminar que favorece la sedimentación en la primera cámara y la estabilización anaerobia en la segunda.

Distribución

El diseño contempla una fosa séptica bicameral, donde la primera cámara ocupa 2/3 del volumen útil (zona de sedimentación) y la segunda 1/3 restante (zona de digestión). La separación interna se realiza mediante un tabique intermedio con paso hidráulico sumergido tipo “T”, con base en las recomendaciones de la norma NTON 05-010-98.

Cada cámara cuenta con una boca de inspección cuadrada de 0.70 m y de 0. 50 de diámetro, ubicada centrada sobre su eje longitudinal, para facilitar el mantenimiento y evacuación de lodos acumulados.

Diseño del Sistema de Entrada y Salida

La entrada y salida de aguas residuales se realiza mediante una tubería de PVC de 4”, equipada con un codo invertido tipo “T” sumergido, cuya base se encuentra a 0.075 m por encima del nivel del agua. Esta configuración minimiza la turbulencia superficial y mejora la eficiencia del proceso de sedimentación.

La salida está ubicada en la segunda cámara, también equipada con una T invertida, a una profundidad de 0.30 m bajo el nivel del líquido, asegurando la retención de sólidos flotantes y evitando la salida de materiales suspendidos.

Geometría y Ubicación del Pozo de Absorción

El pozo de absorción se encuentra alineado en planta a la salida de la fosa séptica, minimizando la longitud de la conducción de interconexión y facilitando el flujo por gravedad. Según el plano, el diámetro del pozo corresponde a 1.50 m, la altura

total de 2.07 m, el material constructivo es local (Bloque, cemento y hierro), con cama filtrante en el fondo. El fondo del pozo está relleno con grava y arena lavada.

5.2.2. Filtro Biológico de Flujo Ascendente

Principio de Funcionamiento y Elementos Constitutivos

El filtro anaerobio es un sistema de tratamiento de aguas residuales que opera mediante un flujo ascendente a través de un medio filtrante, donde los microorganismos forman una biopelícula que facilita la degradación de la materia orgánica. Este proceso se desarrolla en condiciones sin oxígeno y consta de cuatro etapas fundamentales:

- Hidrolisis: Las macromoléculas presentes en el agua residual, como carbohidratos, proteínas y grasas, son descompuestas en compuestos mas simples mediante la acción de enzimas bacterianas. Este proceso permite la transformación de carbohidratos en ácidos grasos volátiles, proteínas en aminoácidos y compuestos nitrogenados, grasas en glicerol y ácidos grasos.
- Acidogénesis: Las moléculas simples obtenidas en la hidrólisis son fermentadas por bacterias acido génica, produciendo ácidos grasos volátiles (principalmente ácido acético), hidrógeno y dióxido de carbono. También se generan compuestos como ácido propiónico, butírico y fórmico, cuya composición depende de las condiciones ambientales del sistema, como temperatura y pH.
- Acetogénesis: En esta etapa, los productos intermedios de la acido génesis son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono por bacterias acetogénicas. Esta conversión es fundamental, ya que el ácido acético es el principal sustrato para la siguiente fase del proceso.
- Metano génesis: Bacterias metano génicas convierten el ácido acético y el hidrógeno en metano (CH_4), el cual puede liberarse a la atmósfera o aprovecharse como biogás para generación de energía. Además, se produce dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno en menores proporciones.

Dependiendo de la carga orgánica del agua residual, puede presentarse sulforogenesis, donde bacterias reductoras de sulfato compiten por los sustratos,

generando sulfuro de hidrogeno y reduciendo la producción de metano. Este fenómeno puede provocar olores desagradables e inhibir la actividad de las bacterias metanos génicos.

El sistema requiere mantenimiento, ya que con el tiempo la biopelícula crece y puede generar obstrucciones en el medio filtrante, reduciendo su eficiencia. Para evitarlo, se deben realizar procesos periódicos de limpieza y regeneración del filtro.

El sistema FAFA está compuesto por los siguientes elementos estructurales fundamentales:

- Camara de entrada: Es el punto de ingreso del afluente, su diseño debe garantizar una distribución uniforme del caudal y evitar turbulencias que puedan afectar el rendimiento del filtro.
- Falso fondo perforado: Ubicado en la base del filtro, permite el paso uniforme del liquido hacia el medio filtrante y sostiene las capas de material. Debe tener orificios regularmente distribuidos con diámetros entre 2 y 5 cm, diseñados para evitar el taponamiento.
- Lecho filtrante o medio biológico: Compuesto por material inerte como grava, arena gruesa o piedra volcánica, con alta porosidad (usualmente entre 35 y 45%), permite la formación de biopelícula microbianas que realizan la biodegradación. La altura del lecho filtrante es de 1.5m según la carga hidráulica y la carga orgánica.
- Cámara de sobrenadante: Ubicada en la parte superior del sistema, permite la acumulación temporal del efluente tratado antes de ser descargado al siguiente componente del sistema (como un pozo de absorción o campo de infiltración).
- Tubería de salida: Conduce el agua tratada fuera del filtro. Debe ubicarse a una altura que permita mantener un nivel constante dentro del filtro, promoviendo la retención hidráulica adecuada.

- Tapa de inspección y sistema de ventilación: Facilita el mantenimiento, la limpieza y el monitoreo del sistema, así como la liberación controlada de gases producidos durante la digestión anaerobia.

Puntos Críticos en el FAFA

El proceso de tratamiento en la FAFA puede verse afectado por diversas condiciones que comprometen su eficiencia. Entre los principales puntos críticos se encuentran:

- Acumulación de Ácidos: Un desequilibrio en la acido génesis puede generar una acumulación excesiva de ácidos grasos volátiles, disminuyendo el pH del sistema. Esto afecta la actividad de las bacterias metano génicas, reduciendo la producción de biogás y dificultando la estabilización de la materia orgánica (Metcalf & Eddy, 2014).
- Formación de Espumas: La presencia de grasas y tenso activo en las aguas residuales puede generar espumas en la superficie de la fosa séptica, afectando la sedimentación y disminuyendo la eficiencia del tratamiento (Tchobanoglous et al., 2014).
- Obstrucción de Lodos: Si no se realiza una extracción periódica, los lodos pueden acumularse y saturar la fosa, reduciendo su capacidad de tratamiento y afectando el tiempo de retención hidráulica, lo que disminuye la eficiencia del proceso anaerobio (Speece, 2008).
- Condiciones Ambientales Extremas: Factores como temperaturas inferiores a 15 °C o la presencia de sustancias tóxicas (detergentes, antibióticos, metales pesados) pueden inhibir la actividad bacteriana, afectando significativamente la fermentación anaerobia y reduciendo su rendimiento (CONAGUA, 2015).

Para mitigar estos problemas, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha desarrollado manuales técnicos que establecen directrices para el diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, asegurando su correcto funcionamiento y sostenibilidad.

Criterios de Diseño Hidráulico y Sanitario Aplicados

El diseño de un filtro biológico anaerobio de flujo ascendente (FAFA) está fundamentado en principios hidráulicos, sanitarios y microbiológicos que garantizan la eficiencia del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas. Este tipo de sistema se basa en el crecimiento de biomasa adherida sobre un medio filtrante inerte, a través del cual el afluente fluye de forma ascendente, permitiendo la biodegradación de la materia orgánica bajo condiciones anaerobias.

En función de ello, el diseño se realizó para una población servida de entre 6 y 8 personas por vivienda, con una dotación diaria de 80 L/persona/día y un 80% de retorno como aguas residuales. Este parámetro debe garantizar una remoción mínima del 75% de la DBO_5 para aguas residuales domésticas, lo cual ha sido integrado como criterio de eficiencia.

En cuanto a la relación entre volumen útil y volumen total del filtro, se adoptó una proporción que permite el desarrollo óptimo de la biomasa adherida sin colmatar el sistema. El volumen total del filtro se dimensionó en función del volumen útil necesario para cumplir el T_{RH}, y del volumen del medio filtrante requerido para garantizar una carga orgánica específica menor a 0.2 $kgDBO_5/m^3 \cdot día$, en concordancia con el límite inferior recomendado para filtros anaerobios en clima cálido (Kakac & Liu, 2002).

Finalmente, se respetaron todas las distancias sanitarias y criterios de protección ambiental establecidos por la NTON 05 027-05 y la NTON 09-007-19, asegurando una separación mínima en metros respecto a fuentes de agua potable y evitando la exposición de la población a patógenos o contaminantes.

Implementación

Para la lograr la implementación de un FAFA se toma en cuenta elementos siguientes:

- Localización: geografía, aspectos climáticos, vías de acceso y características del suelo.

- Afectación a las personas cercanas al FAFA
- Materiales de construcción, mano de obra y capacitación
- Aspectos económicos

Cálculos Técnicos y Parámetros de Dimensionamiento

Los cálculos aquí presentados fueron ejecutados con base en un algoritmo estructurado en Excel, que sistematiza la aplicación de fórmulas hidráulicas y sanitarias ajustadas a las condiciones técnicas locales. Este diseño responde a una población estimada de 8 personas por vivienda, considerando un periodo de diseño de 20 años y condiciones climáticas y edáficas específicas.

Tabla 5. Dimensionamiento hidráulico y geométrico para el FAFA con Pozo de Absorción

Parámetros	**Nomenclatura**	**Resultados**	**Unidades**
Dotación de Agua Potable	D_t	80	L/Personas/día
Caudal o flujo diario de Aguas Residuales	Q_{AR}	0.512	m^3/día
Carga Orgánica	C_O	0.20	Kg/día
Volumen Total del Filtro	V_{FAFA}	1.90	m^3
Tiempo de Retención Hidráulica	t_{rh}	0.92	día
Área del Filtro	A	0.90	m^2
Pozo de Absorción			
Coeficiente de Infiltración	Ci	0.12	m/día
Entrada del caudal	Q_{SFS}	0.42	m^3/dia
Área de Infiltración	A	3.48	m^2
Profundidad total del pozo	H_{Total}	2.10	m

Nota: *Elaboración propia*

Dimensionamiento del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

Se estimó una población futura de 8 habitantes, aplicando una tasa de crecimiento de 0.0156% anual durante el horizonte de diseño. Se consideró una dotación de 80 L/hab·día, conforme la NTON 09-007-19, lo que implica un consumo de agua

potable estimado para uso doméstico. Con un coeficiente de retorno del 80%, se obtiene un caudal diario de aguas residuales de 0.512 m³/día, valor fundamental para el cálculo de tiempos de retención, volúmenes y dimensiones estructurales del sistema.

El tiempo de retención hidráulico (T_{RH}) se estimó basado en el intervalo de tiempo que dictan las bibliografías, se obtuvo un T_{RH} de 0.92 días (22.08 horas), garantizando un periodo suficiente para la filtración. Con esto su eficiencia de remoción es de 81.49%, resultando una concentración en el efluente de DBO_4 0.074 mg/L.

El volumen total es de 1.90 m³ y el efectivo es de 0.75 m^3, En cuanto al volumen de espacios requerido es de 0.47 m³, el volumen del medio filtrante es de 0.19 m³ y un volumen de lodos generados al día de 0.014 m^3.

La altura útil del lecho es de 1.50 m, y la altura total de 2.1 m, considerando borde libre (0.30 m), falso fondo (0.10 m) y sobrenadante (0.20 m), perdida de carga (0.10m). Su diámetro corresponde a 1.07 m y su área superficial a 0.1256 m^2.

Dimensionamiento del Pozo de Absorción

Dado un coeficiente de infiltración de 0.12 m/día (para suelos franco-arcillosos, según Menéndez Wither, 2021), se calculó un área de infiltración de 3.48 m², lo que se traduce en una altura útil de 0.74 m para el pozo de absorción. Se dejó una altura de seguridad adicional de 0.50 m y profundidad de lodos de 0.86 m, alcanzando una profundidad total de 2.10 m. Estos valores garantizan la capacidad de percolación y retención de lodos acumulados durante 5 años.

Consideraciones Constructivas y Operativas

Además, se contemplaron elementos constructivos como el falso fondo y el espacio de sobrenadante, para permitir una distribución uniforme del flujo y evitar perturbaciones en la superficie superior del sistema. La incorporación de un borde libre de 0.3 m garantiza la seguridad hidráulica durante eventos de sobrecarga o mantenimiento.

Materiales de Construcción

El cuerpo del FAFA está diseñado por acero estructural (acero #3, acero #2, y alambre de amarre #18), Concreto estructural (Concreto de 3000 psi, bloque hueco), parrilla de 3/8", piedra bolón, piedra de rio, grava ¾, grava 1", materiales conductores (tuberías de 4" SDR 41, tubos de 2" SDR 41, Tee).

Medio Filtrante y Configuración del Lecho

El medio filtrante está compuesto por tres capas sucesivas: piedra de río (gruesa), grava (media) y arena (fina), cada una de 30 cm de espesor. Esta configuración permite retener partículas sólidas y facilita el desarrollo de la biopelícula microbiana responsable de la depuración anaerobia. La porosidad del medio filtrante se ha considerado como 40 %, y debe mantenerse constante durante la vida útil del sistema.

Fácil Acceso para Limpieza

Aunque el FAFA genera una menor cantidad de lodos que otros sistemas, estos se acumulan gradualmente en la parte inferior. Se ha previsto un volumen de producción de lodos para su extracción manual mediante equipos básicos, como bombas de vacío portátiles o extracción por gravedad.

Condiciones Hidráulicas y Control Operativo

El diseño considera un tiempo de retención hidráulica de 0.92 días, asegurando un contacto prolongado entre el afluente y el medio filtrante. La tasa de aplicación hidráulica y la carga orgánica volumétrica han sido ajustadas para evitar saturación y favorecer la eficiencia de remoción de materia orgánica. Se recomienda evitar variaciones bruscas de caudal, por lo cual se aconseja que el sistema no reciba descargas intermitentes de gran volumen.

Ubicación e Instalación

Se realiza la excavación teniendo en cuenta las dimensiones del sistema y la tubería proveniente de la vivienda dejando de diámetro de 20 a 50 cm más que el diámetro del filtro para mejor instalación si este es prefabricado, de lo contrario se calcula el material (ladrillos, cemento, hierro, etc) en cantidad a usarse para la construcción.

Se siguen las normativas de construcción en cuanto a la ubicación de las tuberías tanto en el afluente como en el efluente, además de los múltiples accesorios de ser necesarios (codos y tee) para la conducción del agua.

Sus materiales filtrantes serán de más a menos, es decir, de mayor granulometría arriba y de menor granulometría al final del filtro, estos se eligen de acuerdo con su fácil traslado y comparación de costos, tratando de ocasionar el menor impacto ambiental.

El nivel de agua se encuentra al menos 0,3 m del material filtrante con el fin de garantizar un régimen de flujo uniforme. La superficie es amplia para el desarrollo de las bacterias.

Para empezar a usarlo, se debe instalar un tubo sanitario desde la vivienda hasta la entrada del filtro y conectar la salida del agua al campo de infiltración o al pozo de absorción. Por último, el filtro tiene un sistema de ventilación por medio de tuberías para la liberación de gases posiblemente dañino u oloroso.

Adaptabilidad y Sostenibilidad

Este sistema se adapta bien a climas cálidos como el de Teustepe, ya que las altas temperaturas aceleran la actividad microbiológica, mejorando la eficiencia del tratamiento. No requiere energía eléctrica ni productos químicos, y su mantenimiento puede ser realizado por miembros de la comunidad con capacitación básica. Esto lo convierte en una opción sostenible, replicable y eficaz para mejorar el saneamiento en comunidades rurales y periurbanas.

Mantenimiento del Sistema

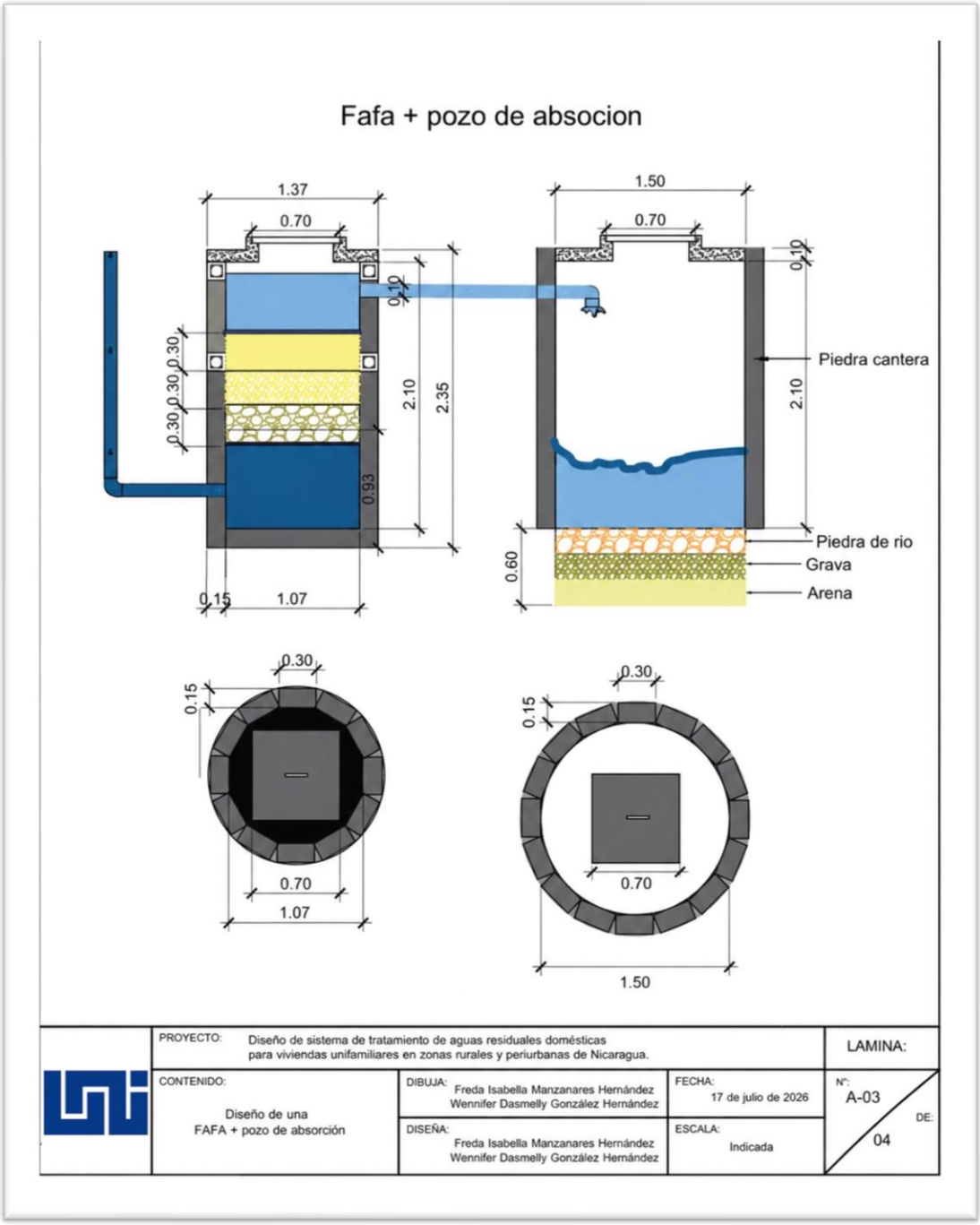
Para garantizar que el sistema funcione adecuadamente es necesario darle mantenimiento de manera continua preferiblemente de manera preventiva para evitar el mantenimiento correctivo. Esto consiste en:

- Revisar periódicamente la impermeabilidad del tanque.
- Monitorear el nivel de espuma y lodo.
- Abrir la tapa de inspección y dejar que se ventile por 15 minutos aproximadamente para el desalojo de los gases.

- Retrolavar el filtro, con una manguera o hidro lavadora verter agua a presión para lavar el filtro, logrando remover los lodos que se depositen en el medio filtrante.

Plano Técnico

Plano 2. Plano técnico de FAFA con pozo de absorción para vivienda unifamiliar.



Nota: Elaboración propia con base a la NTON 05 027-05 y criterios de diseño hidráulico-sanitario.

Geometría Estructural

La geometría del sistema responde a un modelo cilíndrico vertical, optimizado para maximizar el tiempo de retención hidráulica (T_{RH}) y garantizar la depuración anaerobia del agua residual.

El filtro presenta una altura total de 1.20 m, el lecho filtrante tiene una altura de 1.50 m, un fondo falso perforado de 0.10 m, sobrenadante de 0.20 m y un borde libre de 0.30 m.

El diámetro interno del filtro es de 1.07 m, lo que proporciona un área total de 0.90 m², conforme con los requerimientos del volumen efectivo de tratamiento. La elección de esta geometría favorece la estabilidad estructural del dispositivo y su adaptabilidad a espacios reducidos, típicos en viviendas rurales y periurbanas.

Distribución Funcional Interna

El filtro está diseñado en cinco secciones verticales funcionales:

- Cámara de entrada: Permite el ingreso uniforme del afluente desde punto de descarga doméstico.
- Lecho filtrante (material bioportador): Está compuesto por tres capas de material granular natural (grava gruesa, grava media y piedra de río), cada una de 30 cm de altura, lo cual favorece la formación de biopelícula anaerobias que degradan la materia orgánica presente en el agua.
- Falso fondo: Permite la recolección homogénea del afluente, garantizando un flujo ascendente continuo y evitando la obstrucción de los conductos inferiores.
- Zona sobrenadante: Actúa como espacio de transición entre el lecho filtrante y la salida, reduciendo turbulencias y facilitando la decantación final de sólidos arrastrados.
- Tubería de salida elevada: Conecta con el pozo de absorción manteniendo el nivel hidráulico interno constante.

Relación con Criterios de Diseño

Este diseño permite mantener condiciones estrictamente anaerobias en el interior del filtro, y su configuración vertical facilita el transporte de biomasa, la reducción de sólidos suspendidos y la remoción parcial de nutrientes. Además, su estructura modular y su construcción en materiales disponibles localmente (como concreto o polietileno reforzado) facilitan su implementación en comunidades rurales.

Geometría y Ubicación del Pozo de Absorción

El pozo de absorción se encuentra alineado en planta a la salida del FAFA, minimizando la longitud de la conducción de interconexión y facilitando el flujo por gravedad. Según el plano, el diámetro del pozo corresponde a 1.50 m, la altura total de 2.10 m, el material constructivo es local (Bloque, cemento y hierro), con cama filtrante en el fondo. El fondo del pozo está relleno con grava y arena lavada.

5.2.3. Sistema Combinado

Principio de Funcionamiento y Elementos Constitutivos

El sistema combinado de fosa séptica y filtro biológico funciona de manera secuencial desde la evacuación de los residuos hacia el sistema de tratamiento. En primer lugar, el agua y los residuos sólidos son transportados por las tuberías de desagüe hacia la fosa séptica dentro de esta, los residuos sólidos se separan debido a dos procesos fundamentales. Primero, ocurre la sedimentación y Luego, se inicia la digestión anaeróbica (Burton & Stensel, 2014).

Posteriormente, el efluente parcialmente tratado en la fosa séptica se dirige hacia el filtro biológico, donde el flujo de efluentes es controlado mediante válvulas de control. En este punto, el efluente fluye a través de un medio filtrante, facilitando el contacto con microorganismos aeróbicos. Este proceso reduce la carga orgánica y elimina compuestos contaminantes, como el nitrógeno (Metcalf & Eddy, 2014).

Finalmente, el efluente tratado en el filtro biológico, ahora significativamente purificado, puede ser liberado hacia el suelo para su infiltración o bien reutilizado, dependiendo de los requisitos y la calidad alcanzada (CONAGUA, 2018). Además,

durante el proceso de digestión anaeróbica en la fosa séptica, se produce biogás, que puede ser aprovechado energéticamente si el sistema está optimizado para su recolección (McCarty, 2018).

Puntos Críticos en un Sistema Combinado

Los puntos críticos de un sistema combinado de fosa séptica y filtro biológico incluyen un diseño adecuado, el control de flujo entre ambos sistemas, y la acumulación de lodos en la fosa séptica, que deben ser gestionados para evitar obstrucciones y garantizar un tratamiento eficiente. La eficiencia microbiológica depende de factores como la temperatura y el oxígeno, lo que influye en el proceso de descomposición de los residuos (Tchobanoglous, Burton & Stensel, 2014). Además, la gestión del biogás y el cumplimiento de normativas ambientales son esenciales para maximizar la sostenibilidad y evitar impactos negativos en el medio ambiente (Metcalf & Eddy, 2014).

Criterios de Diseño Hidráulico y Sanitario Aplicados

El sistema hace honor al combinar el diseño hidráulico de los tratamientos anteriormente descritos, el parámetro más importante en esta de opción de tratamiento es el tiempo de retención hidráulica para que puedan mejorar la eficiencia de remoción, por lo tanto, al establecer una dotación diaria de 80 L/persona/día y un 80 % de retorno como aguas residuales según la normativa nacional NTON 05 027-05, el tiempo de remoción para la fosa séptica es de 24 horas mientras que el del FAFA es de 22.08 horas.

Para la acumulación y digestión de lodos se consideró una tasa de producción de lodos de 40 litros/persona/año, apropiada para climas cálidos como el de Teustepe (Jaramillo, 2004). Esta estimación permitió dimensionar adecuadamente los compartimientos de almacenamiento y establecer un intervalo de remoción anual, asegurando una operación segura y sostenible del sistema.

El diseño estructural respondió a una relación longitud/ancho de 3:1 para optimizar el flujo laminar y evitar la resuspensión de sólidos, conforme a lo propuesto por Qasim (1994). Se estableció una profundidad útil mínima de 1.20 m, tal como se

indica en manuales internacionales de diseño de sistemas sépticos para zonas rurales, asegurando la estabilidad hidráulica del sistema.

En cuanto a la relación entre volumen útil y volumen total del filtro, se adoptó una proporción que permite el desarrollo óptimo de la biomasa adherida sin colmatar el sistema. El volumen total del filtro se dimensionó en función del volumen útil necesario para cumplir el T_{RH}, y del volumen del medio filtrante requerido para garantizar una carga orgánica específica menor a 0.2 $kgDBO_5/m^3 \cdot día$, en concordancia con el límite inferior recomendado para filtros anaerobios en clima cálido (Kakac & Liu, 2002).

Finalmente, se respetaron todas las distancias sanitarias y criterios de protección ambiental establecidos por la NTON 05 027-05 y la NTON 09-007-19, asegurando una separación mínima en metros respecto a fuentes de agua potable y evitando la exposición de la población a patógenos o contaminantes.

Implementación

La implementación de un sistema combinado de fosa séptica y filtro biológico requiere un espacio grande para asegurar su eficiencia operativa, además es fundamental realizar un estudio geotécnico del terreno, para garantizar que el sistema funcione adecuadamente. Este debe incluir un sistema de control de flujo para regular el paso de efluentes de la fosa al filtro biológico, asegurando un tratamiento eficiente.

En cuanto a la conexión de ambos sistemas se realiza mediante tuberías, con sistemas de válvulas de control y rebosaderos para regular el caudal y evitar sobrecargas en el sistema (Metcalf & Eddy, 2014).

El sistema debe cumplir con las normativas locales e internacionales, como la NOM-003-SEMARNAT-1997 de CONAGUA en México y la Ley General del Medio Ambiente de MARENA en Nicaragua, asegurando que el efluente tratado cumpla con los estándares de calidad y sea apto para su disposición o reutilización. Además, es necesario un plan de monitoreo y mantenimiento regular para

garantizar su eficiencia, lo que incluye la limpieza periódica de la fosa séptica y la inspección del filtro biológico

La implementación exitosa de este sistema no solo contribuye a la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales, sino que también ayuda a proteger el medio ambiente y la salud pública.

Cálculos Técnicos y Parámetros de Dimensionamiento

Los cálculos aquí presentados fueron ejecutados con base en un algoritmo estructurado en Excel, que sistematiza la aplicación de fórmulas hidráulicas y sanitarias ajustadas a las condiciones técnicas locales. Este diseño responde a una población estimada de 8 personas por vivienda, considerando un periodo de diseño de 20 años y condiciones climáticas y edáficas específicas.

Tabla 6. Dimensionamiento hidráulico y geométrico para el Sistema Combinado con Pozo de Absorción

Parámetros	**Nomenclatura**	**Resultados**	**Unidades**
Dotación de Agua Potable	D_t	80	L/Personas/día
Caudal o flujo diario de Aguas Residuales	Q_{AR}	0.51	m3/día
Fosa Séptica			
Tiempo de Retención Hidráulica	t_{rh}	1.00	día
Volumen Total de la Fosa Séptica	V_{fosa}	1872	L
		1.87	m3
Área de la fosa	A	1.56	m2
Profundidad neta	Ht	2.16	m
Carga Orgánica	C_O	0.036	Kg/día
FAFA			
Tiempo de Retención Hidráulica	t_{rh}	0.92	día

		22.08	h
Volumen Total del Filtro	V_{FAFA}	1.90	m^3
Área del Filtro	A	0.90	m^2
Pozo de Absorción			
Coeficiente de Infiltración	Ci	0.12	m/día
Entrada del caudal	Q_{SFS}	0.42	m^3/día
Área de Infiltración	A	3.48	m^2
Profundidad total del pozo	H_{Total}	2.10	m

Nota: Elaboración propia

Dimensionamiento de la Fosa Séptica

Se estimó una población futura de 8 habitantes, aplicando una tasa de crecimiento de 0.0156 % anual durante el horizonte de diseño. Se consideró una dotación de 80 L/hab·día, conforme la NTON 09-007-19, lo que implica un consumo de agua potable estimado para uso doméstico. Con un coeficiente de retorno del 80%, se obtiene un caudal diario de aguas residuales de 0.512m³/día, valor fundamental para el cálculo de tiempos de retención, volúmenes y dimensiones estructurales del sistema.

El tiempo de retención hidráulico (T_{RH}) se calculó aplicando la ecuación empírica basada en población y dotación. Se obtuvo un T_{RH} de 1 día (24 horas), garantizando un periodo suficiente para la sedimentación primaria y la digestión parcial de sólidos.

El volumen total de la fosa fue de 1.87m³, distribuido en dos cámaras: 1.25m³ en la primera (sedimentación) y 0.62m³ en la segunda (digestión). Estos volúmenes se ajustan a los criterios de diseño propuestos por Metcalf & Eddy (2014) y la práctica recomendada por la OMS para viviendas rurales. En cuanto al volumen de sedimentación es de 0.51m³, el volumen de digestión y almacenamiento de lodos de 0.56m³, el volumen de lodos producidos es de 0.50m^3/personas/año, el volumen de natas (mínimo), 0.7m³.

La profundidad útil mínima fue de 1.20m, y la profundidad total de 2.16m, considerando espacio libre (0.51m), zona de lodos (0.36m) y profundidad de natas (0.45m), profundidad libre de natas sumergida (mínimo) (0.10m) y la profundidad requerida para la sedimentación (0.33m). Las cámaras fueron dimensionadas con base en una relación largo/ancho de 3:1, resultando en 2.16m de longitud total, con un ancho constante de 0.72m. Esto cumple con la relación recomendada de 2≤L/B≤4 (Kern, 2011).

Dimensionamiento del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

La eficiencia de remoción de la fosa séptica calculada en la simulación es del 82.24%, por lo que implica un tiempo de retención hidráulico (T_{RH}) que se estimó basado en el intervalo de tiempo que dictan las bibliografías, se obtuvo un T_{RH} de 0.92 días (22.08 horas), garantizando un periodo suficiente para la filtración. Con esto su eficiencia de remoción es de 81.49%, resultando una concentración en el efluente de DBO_4 0.013mg/L.

El volumen total es de 1.90m³ y el efectivo es de 0.75m^3, En cuanto al volumen de espacios requerido es de 0.47m³, el volumen del medio filtrante es de 0.19m³ y un volumen de lodos generados al día de 0.014m^3.

La altura útil del lecho es de 1.50m, y la altura total de 2.1m, considerando borde libre (0.30m), falso fondo (0.10m) y sobrenadante (0.20m), perdida de carga (0.10m). Su diámetro corresponde a 1.07 m y su área superficial a 0.1256m^2.

Dimensionamiento del Pozo de Absorción

Dado un coeficiente de infiltración de 0.12m/día (para suelos franco-arcillosos, según Menéndez Wither, 2021), se calculó un área de infiltración de 3.48 m², lo que se traduce en una altura útil de 0.74m para el pozo de absorción. Se dejó una altura de seguridad adicional de 0.50 m y profundidad de lodos de 0.86 m, alcanzando una profundidad total de 2.10m. Estos valores garantizan la capacidad de percolación y retención de lodos acumulados durante 5 años.

Consideraciones Constructivas y Operativas

El diseño y construcción de los sistemas de fosa séptica y filtro biológico deben cumplir con una serie de condiciones técnicas y normativas para garantizar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. En primer lugar, las conexiones de ambos sistemas deben estar cuidadosamente diseñada para garantizar que el efluente tratado en la fosa séptica fluya hacia el filtro biológico a una tasa constante y adecuada. Según las normas locales y los principios de ingeniería en el tratamiento de aguas residuales, se deben emplear dispositivos de control de flujo para regular el caudal que se dirige al filtro. Estos dispositivos pueden ser válvulas de control, que permiten ajustar el flujo, o sistemas de sifón, que liberan el efluente a intervalos regulares para evitar sobrecargar el filtro (Metcalf & Eddy, 2014).

Es fundamental que el flujo entre los sistemas sea gravitacional, aprovechando la pendiente natural del terreno, sin necesidad de utilizar bombas, lo que reduce el costo de operación y mantenimiento. Además, en ambos sistemas es esencial la inspección del filtro biológico para asegurar que el material filtrante no esté obstruido ni saturado de biomasa (Burton & Stensel, 2014).

Desde el punto de vista constructivo, es fundamental que el sistema sea implementado con materiales durables y accesibles localmente. El tanque séptico debe construirse con paredes de bloque de concreto, para evitar filtraciones al entorno. El fondo debe diseñarse con una pendiente suave hacia la salida del 2%, favoreciendo el flujo laminar y evitando la acumulación de sólidos. Las dimensiones del pozo de absorción y sus materiales (grava, piedra y arena) deben respetar las capas diseñadas (según el plano técnico proporcionado), asegurando una tasa adecuada de infiltración según los ensayos previos del suelo.

Materiales de Construcción

Para esta consideración se tiene previsto construirlo con la misma metodología de los dos diseños anteriores individualizados, deben ser materiales no tóxicos, resistentes a la corrosión y de fácil adquisición en la zona, se garantiza la durabilidad para el periodo de diseño propuesto.

Medio Filtrante y Configuración del Lecho

El medio filtrante está compuesto por tres capas sucesivas: piedra de río (gruesa), grava (media) y arena (fina), cada una de 30 cm de espesor. Esta configuración permite retener partículas sólidas y facilita el desarrollo de la biopelícula microbiana responsable de la depuración anaerobia. La porosidad del medio filtrante se ha considerado como 40 %, y debe mantenerse constante durante la vida útil del sistema.

Fácil Acceso para Limpieza

La tapa de inspección debe estar siempre accesible, preferiblemente señalizada, y ubicada a nivel del suelo o ligeramente elevada para evitar ingreso de aguas pluviales. La ventilación de los sistemas debe mantenerse libre de obstrucciones, permitiendo el escape de gases sin poner en riesgo la salud de los usuarios.

Aunque el FAFA genera una menor cantidad de lodos que otros sistemas, estos se acumulan gradualmente en la parte inferior. Se ha previsto un volumen de producción de lodos para su extracción manual mediante equipos básicos, como bombas de vacío portátiles o extracción por gravedad.

Condiciones Hidráulicas y Control Operativo

En lo referente a operación, se debe garantizar un mantenimiento anual, especialmente para la remoción de lodos. El tiempo estimado de llenado de la capacidad útil de lodos se estableció en 1 año, por lo cual la frecuencia mínima de extracción debe ser anual, usando procedimientos manuales o mecánicos que no afecten las paredes internas del sistema.

Mantenimiento del Sistema

El mantenimiento de un sistema combinado de fosa séptica y filtro biológico es fundamental para garantizar su eficiencia y funcionamiento a largo plazo. Esto incluye la eliminación de los lodos acumulados en la fosa séptica cada 2-5 años, la inspección de la estructura y la revisión del sistema de ventilación para evitar obstrucciones (McCarty, 2018). En el filtro biológico, se debe limpiar la biomasa acumulada, verificar el estado del medio filtrante y asegurar que el flujo de efluente sea constante (EPA, 2020). Además, es importante monitorear la calidad del

efluente y la eficiencia del biogás si se captura, así como revisar los dispositivos de control de flujo (CONAGUA, 2018). El mantenimiento preventivo, como educar a los usuarios sobre el uso adecuado del sistema, también es clave para evitar sobrecargas y asegurar un rendimiento óptimo (MARENA, 2015).

Ubicación e Instalación

Se debe observar estrictamente la distancia mínima en metros entre el sistema y cualquier fuente de agua, conforme a la NTON 05-010-98. El pozo de absorción debe ubicarse en terrenos donde no haya riesgo de saturación hídrica durante la temporada lluviosa. En su construcción, se debe evitar el uso de selladores o aditivos impermeabilizantes en las paredes, ya que esto contraviene el principio de infiltración progresiva del efluente tratado.

Adaptabilidad y Sostenibilidad

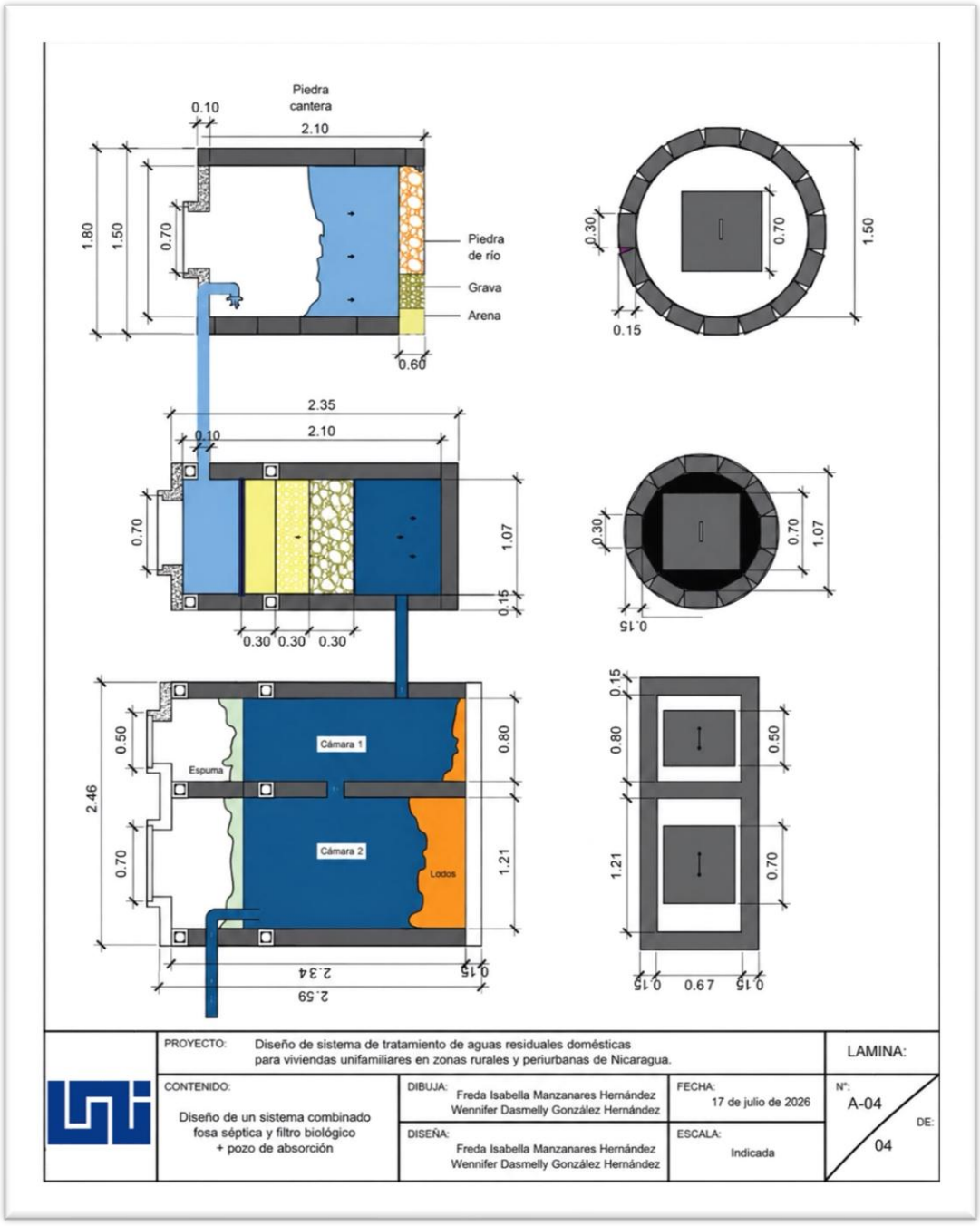
Este sistema se adapta bien a climas cálidos como el de Teustepe, ya que las altas temperaturas aceleran la actividad microbiológica, mejorando la eficiencia del tratamiento. No requiere energía eléctrica ni productos químicos, y su mantenimiento puede ser realizado por miembros de la comunidad con capacitación básica. Esto lo convierte en una opción sostenible, replicable y eficaz para mejorar el saneamiento en comunidades rurales y periurbanas.

La comunidad beneficiaria debe ser instruida en prácticas adecuadas para el uso del sistema, tales como no verter grasas, químicos ni aguas de lluvia al tanque, así como mantener controlado el ingreso de sólidos suspendidos, lo que prolongará la vida útil del sistema y reducirá la necesidad de intervenciones frecuentes.

Finalmente, el sistema fue diseñado con criterios de bajo costo, alta eficiencia y factibilidad comunitaria, permitiendo su construcción con mano de obra local capacitada y materiales disponibles en el entorno, facilitando su réplica en otras comunidades rurales del país.

Plano Técnico

Plano 3. Plano técnico del sistema combinado con pozo de absorción para vivienda unifamiliar.



***Nota*:** Elaboración propia con base a la NTON 05 027-05 y criterios de diseño hidráulico-sanitario.

Geometría Estructural

Fosa Séptica

La fosa séptica tiene forma prismática rectangular de planta alargada. Esta configuración responde a criterios hidráulicos fundamentales, garantizando un flujo horizontal laminar que favorece la sedimentación en la primera cámara y la estabilización anaerobia en la segunda.

Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

La geometría del sistema responde a un modelo cilíndrico vertical, optimizado para maximizar el tiempo de retención hidráulica (T_{RH}) y garantizar la depuración anaerobia del agua residual.

Distribución Funcional Interna

El diseño contempla una fosa séptica bicameral, donde la primera cámara ocupa 2/3 del volumen útil (zona de sedimentación) y la segunda 1/3 restante (zona de digestión). La separación interna se realiza mediante un tabique intermedio con paso hidráulico sumergido tipo “T”, con base en las recomendaciones de la norma NTON 05-010-98.

Cada cámara cuenta con una boca de inspección cuadrada de 0.70 m y de 0. 50 de diámetro, ubicada centrada sobre su eje longitudinal, para facilitar el mantenimiento y evacuación de lodos acumulados.

El filtro está diseñado en cinco secciones verticales funcionales como se explicó en la distribución del FAFA.

Relación con Criterios de Diseño

Este diseño permite mantener condiciones estrictamente anaerobias en el interior del sistema, y su configuración vertical facilita el transporte de biomasa, la reducción de sólidos suspendidos y la remoción parcial de nutrientes. Además, su estructura modular y su construcción en materiales disponibles localmente (como concreto o polietileno reforzado) facilitan su implementación en comunidades rurales.

Diseño del Sistema de Entrada y Salida

La entrada y salida de aguas residuales se realiza mediante una tubería de PVC de 4”, equipada con un codo invertido tipo “T” sumergido, cuya base se encuentra a 0.075m por encima del nivel del agua. Esta configuración minimiza la turbulencia superficial y mejora la eficiencia del proceso de sedimentación.

La salida está ubicada en la segunda cámara, también equipada con una T invertida, a una profundidad de 0.30m bajo el nivel del líquido, asegurando la retención de sólidos flotantes y evitando la salida de materiales suspendidos.

Geometría y Ubicación del Pozo de Absorción

El pozo de absorción se encuentra alineado en planta a la salida de la fosa séptica, minimizando la longitud de la conducción de interconexión y facilitando el flujo por gravedad. Según el plano, el diámetro del pozo corresponde a 1.50m, la altura total de 2.10m, el material constructivo es local (Bloque, cemento y hierro), con cama filtrante en el fondo. El fondo del pozo está relleno con grava y arena lavada.

5.2.4. Biodigestor Unifamiliar

Principio de Funcionamiento y Elementos Constitutivos

El proceso se da en la ausencia de aire, nitratos y oxígenos, en la degradación actúan un diverso grupo de microorganismo (principalmente bacterias) que logran la degradación de los compuestos complejos como las proteínas, carbohidratos, grasas en incluso intervienen en la generación de biogás. (Conagua, 2015)

En estos procesos se encuentra la hidrolisis con las bacterias acido génicas que convierten los azucares y aminoácidos en dióxido de carbono, hidrogeno, amonio y ácidos orgánicos, transforman las grandes partículas suspendidas y moléculas disueltas en moléculas pequeñas. Luego con las bacterias metanogénicas (metano génesis) estos compuestos son transformados a metano, anhídrido carbónico. (Conagua, 2015)

En los procesos anaerobios no es necesaria una purga constante, la remoción se realiza cuando ocupan un volumen mayor a un tercio de la capacidad del biodigestor. (Conagua, 2015)

Sus parámetros aceptables para operar se encuentran entre un rango de 15 y 25°C y a un rango relativamente alto de 30 a 40°C, por lo que los países con clima tropical son ideales para este sistema de tratamiento.

Extracción de Lodos

El biodigestor tiene una salida de lodos, al inicio saldrá agua que está en la parte superior del tubo, luego saldrá el lodo que ya está procesado por las bacterias lo que evita los malos olores, de haber un inconveniente al sacarlo puede ayudarse con una vara para terminar el proceso. (Vivamos mejor, s/f).

Se debe extraer solamente el 80% de su contenido, ya que el restante servirá como semilla de bacterias activas porque contiene el material biológico adaptado apropiadamente. (Menéndez Wither, 2021).

Criterios de Diseño Hidráulico y Sanitario Aplicados

Al igual que un filtro biológico este sistema está considerando en fundamentos de principio hidráulico, sanitario y microbiológico. El principal componente de este tratamiento son los microorganismos, según la etapa se forman distintos grupos microbianos por ejemplo los acetogénicos como la *Syntrophobacter* la cual vive de 1 a 5 días, también están las *Methanosarcina* que tienen de 1 a 9 días de vida, existe el grupo *Hidrogenitrophhic methanogens* que su tiempo de vida es de 1 a 4 días.

Tiene un porcentaje de remoción teórica calculada en la simulación de 77.86% lo cual ha sido integrado como criterio de eficiencia. Finalmente, se respetaron todas las distancias sanitarias y criterios de protección ambiental establecidos por la NTON 05 027-05 y la NTON 09-007-19, asegurando una separación mínima en metros respecto a fuentes de agua potable y evitando la exposición de la población a patógenos o contaminantes.

Implementación

Para la implementación de un biodigestor se toman en cuenta 4 factores

- Humanos: Materiales de construcción, mano de obra, disponibilidad de materia prima.

- Biológicos: Enfermedades y plagas
- Físicos: Localización, aspectos climáticos, vías de acceso y características del suelo.
- Funcionales: si el biodigestor es del tipo sanitario, energético, fertilizante o integral.

Una vez elegido el lugar de instalación, se procede a excavar tomando en consideración las dimensiones del biodigestor, se recomienda colocar una base de 10 cm de material fino y tener una pendiente del 1-2% hacia la descarga, además se debe tener en cuenta que el sitio sea de fácil acceso para los camiones recolectores o bien, que sea de fácil manejo para la disposición de lodos. (Menéndez Wither, 2021)

Es importante resaltar la disposición de un campo o bien un pozo de absorción para reutilizar el agua tratada ya sea en plantaciones o simplemente que se filtre en el suelo (Vivamos mejor, s/f).

Cálculos Técnicos y Parámetros de Dimensionamiento

Los cálculos aquí presentados fueron ejecutados con base en un algoritmo estructurado en Excel, que sistematiza la aplicación de fórmulas hidráulicas y sanitarias ajustadas a las condiciones técnicas locales. Este diseño responde a una población estimada de 8 personas por vivienda, considerando un periodo de diseño de 20 años y condiciones climáticas y edáficas específicas.

Tabla 7. Dimensionamiento hidráulico y geométrico para el sistema de Biodigestor unifamiliar con Pozo de Absorción

Parámetros	Nomenclatura	Resultados	Unidades
Dotación de Agua Potable	D_t	80	L/Personas/día
Caudal o flujo diario de Aguas Residuales	Q_{AR}	0.512	m3/día
Carga Orgánica	C_O	0.2048	Kg/día
Tiempo de Retención Hidráulica	t_{rh}	10	días
Volumen del Biodigestor	V_{bio}	6.826666667	m^3

Caja Registradora de Lodos			
Volumen Total de Lodos Producidos	Vtl	0.32	m^3
Volumen efectivo de la cámara de lodos	V	0.48	m^3
Pozo de Absorción			
Coeficiente de Infiltración	Ci	0.12	m/día
Entrada del caudal	Q_{SFS}	0.40	m^3/día
Área de Infiltración	A	3.32	m^2
Profundidad total del pozo	H_{Total}	2.03	m

Nota: Elaboración propia

Dimensionamiento del Biodigestor de Flujo Continuo

Se estimó una población futura de 8 habitantes, aplicando una tasa de crecimiento de 0.0156% anual durante el horizonte de diseño. Se consideró una dotación de 80L/hab·día, conforme la NTON 09-007-19, lo que implica un consumo de agua potable estimado para uso doméstico. Con un coeficiente de retorno del 80%, se obtiene un caudal diario de aguas residuales de 0.512m³/día, valor fundamental para el cálculo de tiempos de retención, volúmenes y dimensiones estructurales del sistema.

El tiempo de retención hidráulico (T_{RH}) se estimó basado en la bibliografía consultada, se obtuvo un tiempo de 10 días garantizando un periodo suficiente para el tratamiento. Con esto su eficiencia de remoción es de 77.86%.

El volumen total es de 6.83m^3 dividiéndose en volumen liquido (5.12m^3) y volumen gaseoso (1.71m^3), el volumen requerido para la digestión y almacenamiento de lodos es de 0.64 m^3. La altura útil es de 2.056 m, mientras que la profundidad requerida para la digestión y almacenamiento es de 0.058 y la profundidad de alimentación es de 0.47 m, lo que arroja una altura total de 2.36m.

Dimensionamiento de la Caja de Registro de Lodos

El volumen total de lodos producidos es de 0.32 m^3 por lo que el volumen efectivo de la cámara de lodos es de 0.48m^3, la altura de la caja es igual a 0.75m, la base corresponde a 0.8m y el largo de 0.8m.

Dimensionamiento del Pozo de Absorción

Dado un coeficiente de infiltración de 0.12m/día (para suelos franco-arcillosos, según Menéndez Wither, 2021), se calculó un área de infiltración de 3.32m^2, lo que se traduce en una altura útil de 0.70m para el pozo de absorción. Se dejó una altura de seguridad adicional de 0.50m y profundidad de lodos de 0.82m, alcanzando una profundidad total de 2.03m. Estos valores garantizan la capacidad de percolación y retención de lodos acumulados durante 5 años.

Consideraciones Constructivas y Operativas

Materiales de Digestión y Configuración Interna

Prefabricado de polietileno

Medio de Digestión y Configuración Interna

El compartimento favorece la retención y degradación anaerobia de sólidos, la distribución de sus tuberías favorece el flujo de alimentación y salida, su medio filtrante son anillos plásticos que remueven parte de los sólidos suspendidos.

Condiciones Hidráulicas y Control Operativo

El flujo hidráulico debe ser constante, sin variaciones bruscas que puedan alterar la digestión anaerobia, el diseño se configura a un sistema de desfogue de gases para evitar acumulación de presión, aunque en biodigestores este gas normalmente se libera al ambiente o se desvía a una trampa de olor. También la instalación de válvulas de limpieza o tubos de descarga en caso de mantenimiento se considera como elementos importantes.

Ubicación e Instalación

Se calcula la profundidad de excavación considerando la altura del equipo y la tubería de entrada. Se excava una sección cilíndrica 20cm más ancha que el biodigestor y se da forma cónica a la base para asegurar estabilidad.

El tamaño del depósito debe ajustarse a la cantidad de agua contaminada generada, asegurando su función como sedimentador y unidad de biodigestión. Se coloca el biodigestor en la excavación, se llena con agua y se instala la válvula de extracción de lodos.

El enterrado se realiza con una mezcla de arena y cemento seco en la base y una combinación de tierra y cemento en el resto. La cámara de extracción de lodos se construye con albañilería, anillos prefabricados o materiales plásticos. Finalmente, se conecta la tubería de la vivienda, la salida del agua al campo de infiltración y se mantiene cerrada la válvula de extracción de lodos.

Mantenimiento del Sistema

- Al subir la tapa del biodigestor se debe esperar 10 minutos antes de comenzar con la limpieza.
- Una vez al año se debe hacer un mantenimiento preventivo del biodigestor
- Mediante los registros a la entrada y salida se verifica el nivel de los lodos en el fondo, esto logra evitar la contaminación, además de verificar el nivel de las natas para tener un funcionamiento óptimo.
- Es fundamental la limpieza profunda de los biodigestores al final del periodo de diseño, para evitar que los lodos y las natas se vayan hacia la salida y no se cumpla el objetivo.

Recomendaciones

Es importante evitar arrojar desechos como papel, toallas sanitarias o restos de comida en el inodoro o desagües para prevenir obstrucciones en las tuberías. También se recomienda usar detergentes de manera moderada y evitar químicos fuertes, como cloro o sosa cáustica, que afectan el proceso de descomposición en el biodigestor.

El Biodigestor no debe verter sus desechos en ríos o pozos, sino ser canalizado hacia un sistema de tratamiento adecuado. Además, el biodigestor debe mantenerse lleno de agua, sin sobrepasar el nivel de salida, para asegurar su funcionamiento. No se deben quitar el material plástico o filtro dentro del biodigestor, ya que son esenciales para su operación.

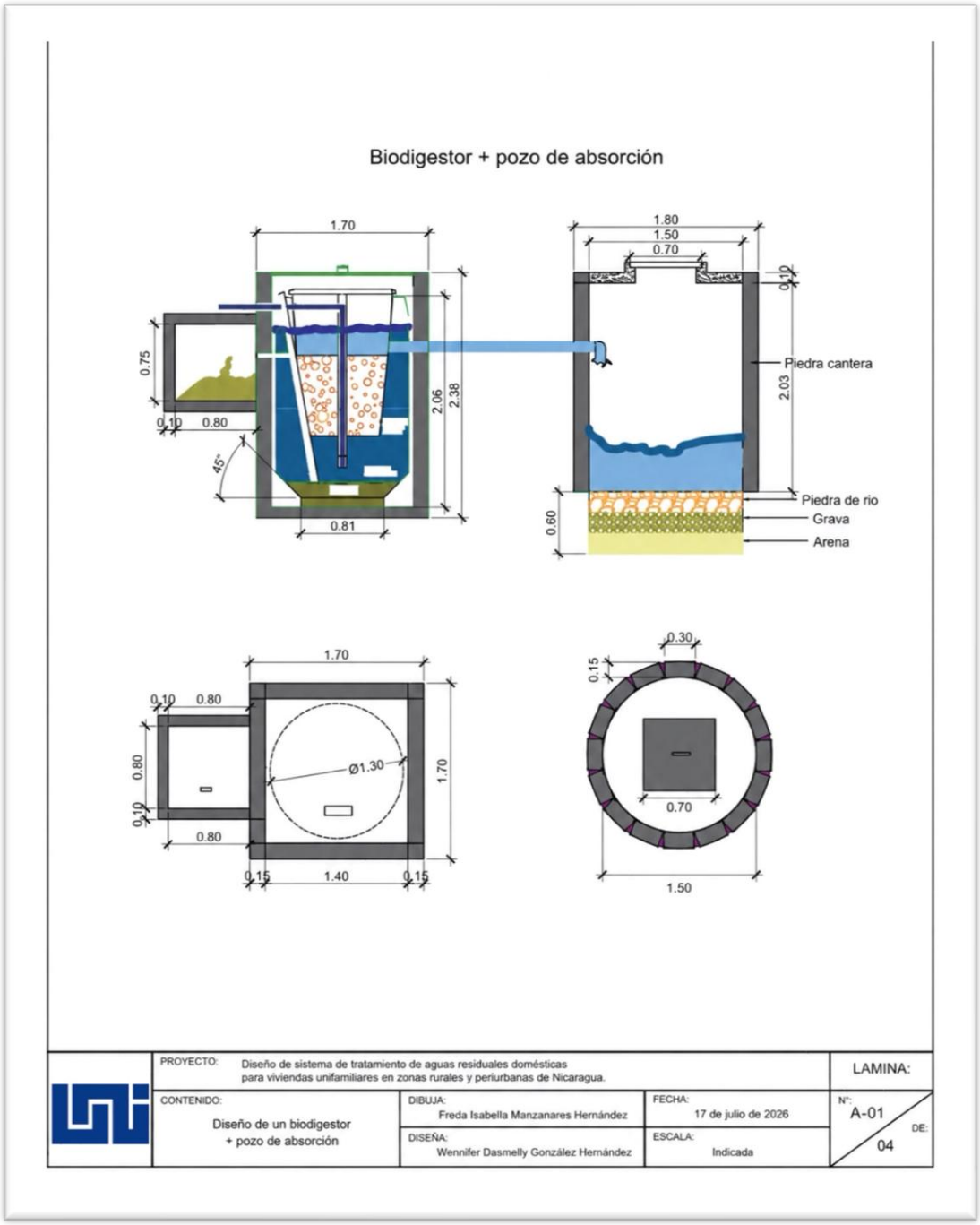
Se recomienda extraer los lodos cada 12-24 meses, con la primera extracción a los 12 meses de uso. La limpieza del filtro debe hacerse cada 3 o 4 extracciones o cuando haya obstrucciones. La válvula de salida de lodos debe permanecer cerrada, solo abriéndose cuando sea necesario para la limpieza. Tras la extracción, los lodos deben secarse antes de ser usados como abono. La caja de lodos debe mantenerse libre de agua.

Adaptabilidad y Sostenibilidad

Es una tecnología robusta, económica y sostenible, adecuada para zonas rurales sin acceso a sistemas convencionales, favorece la reducción de sólidos y materia orgánica, protegiendo el ambiente y la salud pública, no requiere energía eléctrica y tiene bajo costo de operación, además de que genera biogás en pequeña escala, su implementación fortalece la gestión comunitaria del saneamiento y puede adaptarse a futuras ampliaciones del hogar.

Plano Técnico

Plano 4. Plano técnico del biodigestor unifamiliar de flujo continuo con pozo de absorción para una vivienda unifamiliar.



Nota: Elaboración propia con base a la NTON 05 027-05 y criterios de diseño hidráulico-sanitario.

Geometría Estructural

La geometría estructural del sistema corresponde a un modelo cilíndrico vertical, lo que es provechoso para el espacio y la optimización del tiempo de retención hidráulico, el biodigestor presenta un diámetro de 1.50m, una altura de borde libre de 0.30 m, el área superficial del biodigestor es de 11m^2. La elección de esta geometría favorece la estabilidad estructural del dispositivo y su adaptabilidad a espacios reducidos, típicos en viviendas rurales y periurbanas.

Distribución Funcional Interna

La unidad de tratamiento está diseñada en las siguientes secciones:

- Entrada de desechos
- Salida de lodos a la cámara
- Filtro compuesto de anillos de plástico
- Fondo de separación de líquidos y sólidos
- Salida de agua tratada
- Borde libre

Relación con Criterios de Diseño

Este diseño permite mantener condiciones estrictamente anaerobias en el interior del sistema y su configuración vertical facilita el transporte de biomasa, la reducción de sólidos suspendidos y la remoción parcial de nutrientes. Además. Su estructura modular facilita su implementación en comunidades rurales.

Geometría y Ubicación del Pozo de Absorción

El pozo de absorción se encuentra alineado en planta a la salida del Biodigestor, minimizando la longitud de la conducción de interconexión y facilitando el flujo por gravedad. Según el plano, el diámetro del pozo corresponde a 1.50 m, la altura total de 2.03 m, el material constructivo es local (Bloque, cemento y hierro), con cama filtrante en el fondo. El fondo del pozo está relleno con grava y arena lavada.

5.3. Simulación en Excel

Todos los valores fueron generados utilizando un algoritmo en Excel que automatiza las fórmulas. El archivo permite replicar y ajustar el diseño para

diferentes contextos, modificando únicamente las condiciones iniciales (población, dotación, tipo de suelo).

5.4. Evaluación Funcional de Alternativas Tecnológicas para el Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales.

En este apartado se comparan las tecnologías evaluadas desde cinco parámetros claves de ingeniería y viabilidad en zonas rurales como la del sitio de estudio, con ayuda de los resultados se contrastan fortalezas, limitaciones y condiciones específicas para su implementación eficiente.

5.4.1. Capacidad de Remoción de Contaminantes

Uno de los parámetros más relevantes para evaluar la efectividad técnica de los sistemas de tratamiento descentralizados de aguas residuales es su capacidad de remoción de contaminantes clave, en particular la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y la concentración de coliformes fecales. Estos indicadores permiten valorar si el sistema diseñado cumple con los requerimientos establecidos por la normativa ambiental nacional específicamente el Decreto 21-2017 del MARENA y si resulta apto para su implementación en entornos rurales y periurbanos como el municipio de Teustepe.

La siguiente tabla resume los resultados obtenidos del diseño y simulación técnica de los cuatro sistemas analizados, los valores fueron extraídos de las simulaciones realizadas en hoja electrónica y validación funcional, tomando en cuenta las condiciones estándar antes mencionadas.

Tabla 8. Comparación de eficiencia de remoción de contaminantes por sistema de tratamiento.

Parámetro	Fosa Séptica (2 cámaras)	Fosa Séptica (2 cámaras) + FAFA	FAFA	Biodigestor Anaerobio de Flujo Continuo
Sólidos Totales (ST)	40-50%	60-70%	50-60%	70-80%
Sólidos Disueltos (SD)	20-30%	30-50%	40-50%	50-60%
Sólidos sedimentables	60-80%	80-90%	70-80%	90-95%
DBO5	30-50%	60-80%	50-70%	70-90%
COT (Carbono Orgánico Total)	20-40%	50-70%	40-60%	60-80%
DQO	25-45%	60-75%	50-70%	65-85%
Nitrógeno total (N)	10-30%	40-60%	30-50%	50-70%
Amoniaco Libre	10-20%	30-50%	20-40%	40-60%
Nitratos	0-10%	20-40%	20-30%	30-50%
Fósforo Total (P)	5-15%	20-40%	15-30%	30-50%
Cloruros	0-5%	5-15%	5-10%	10-20%
Alcalinidad (como CaCO3)	5-15%	10-30%	10-25%	30-50%
Grasas y aceites	20-40%	50-70%	40-60%	60-80%

Nota: Elaboración propia en Excel con datos de Metcalf & Eddy (2003), Tchobanoglous et al., (1998), Van Sperling (2055), Hernández, J & Chávez, C., (2012).

El Sistema Combinado y el Biodigestor son los tratamientos que más se acercan a los datos de valores permisibles del decreto, cuyos resultados se presentaran más adelante, sin embargo, el arto 26, dicta que se excluye del monitoreo los

sistemas de tratamientos de aguas residuales individuales de tipo doméstico de hasta treinta (30) personas.

5.4.2. Estabilización Operativa y Adaptabilidad Frente a Variaciones de Carga

La estabilidad operativa y la capacidad de los sistemas de tratamiento para soportar variaciones en la carga hidráulica y orgánica son aspectos fundamentales en entornos rurales y periurbanos, donde las condiciones de uso y la frecuencia de mantenimiento no siempre son constantes. En estas zonas, factores como la estacionalidad del consumo de agua, la intermitencia en el abastecimiento, la incorporación de visitantes o variaciones en la dotación diaria pueden alterar significativamente los caudales y concentraciones de contaminantes que ingresan a los sistemas de tratamiento.

En el caso de la fosa séptica de dos cámaras, su estabilidad operativa es moderada. Este sistema tolera cierto rango de sobrecargas hidráulicas debido a su función como unidad de sedimentación y decantación primaria. Sin embargo, su rendimiento se ve comprometido cuando se superan los tiempos mínimos de retención hidráulica (T_{RH}) de 24 a 48 horas. En situaciones de uso intensivo o caudales puntualmente elevados (por ejemplo, en días festivos o fines de semana con visitas familiares), puede haber arrastre de sólidos no sedimentados, generando sobrecarga en el efluente. Además, no cuenta con mecanismos activos de estabilización biológica, lo que la hace dependiente del mantenimiento regular y purga de lodos (Metcalf & Eddy, 2014).

El filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) presenta mayor robustez frente a variaciones de carga orgánica, gracias a la presencia de un medio soporte biológico en el que se desarrollan comunidades bacterianas anaerobias adheridas. Estas bacterias estabilizan la materia orgánica y confieren cierta resistencia a fluctuaciones, siempre que se mantenga un régimen hidráulico constante. Sin embargo, su eficiencia puede disminuir si se altera bruscamente el T_{RH} o si se introducen sustancias tóxicas que afecten la biomasa activa, como

detergentes en altas concentraciones o residuos clorados, frecuentes en hogares sin educación sanitaria previa (Tilley et al., 2014).

En cuanto al sistema combinado (fosa séptica + FAFA), se observa una sinergia operativa positiva. La fosa séptica actúa como tampón hidráulico, reduciendo las oscilaciones de caudal y protegiendo al FAFA de choques de carga. Esta configuración ha demostrado, tanto en este estudio como en experiencias reportadas por la GIZ (2020), una mayor resiliencia frente a variaciones de caudal y calidad del influente, asegurando una mayor continuidad en la eficiencia del sistema.

El biodigestor unifamiliar anaerobio, por su parte, presenta un comportamiento técnico destacable en condiciones mesofílicas estables, como las observadas en Teustepe (temperaturas promedio entre 27 y 35 °C). Su volumen y estructura interna le confieren una alta capacidad de amortiguamiento frente a fluctuaciones, tanto hidráulicas como de carga orgánica. No obstante, su sensibilidad aumenta ante ingresos repentinos de aguas con grasa, productos químicos o volúmenes excesivos que diluyen el proceso anaerobio. A diferencia de los otros sistemas, el biodigestor depende fuertemente de un arranque progresivo y un régimen de alimentación constante para mantener activa su microbiota metanogénicas (Speece, 2008; CONAGUA, 2015).

Desde el punto de vista práctico, todos los sistemas muestran algún grado de tolerancia ante variaciones operativas, pero los que integran más de una fase de tratamiento como el sistema combinado y el biodigestor son claramente más estables. La posibilidad de mantener eficiencia sin necesidad de intervención inmediata los convierte en opciones preferentes para comunidades con bajos niveles de asistencia técnica y limitadas capacidades de gestión.

Por lo tanto, el sistema combinado y el biodigestor unifamiliar son los más robustos frente a variaciones de carga, lo cual los hace especialmente aptos para entornos rurales donde las condiciones de uso no siempre son previsibles. Los sistemas más simples, como la fosa séptica sola o el FAFA como unidad única,

requieren mayor control, educación al usuario y planificación para mantener su efectividad a lo largo del tiempo.

5.4.3. Vulnerabilidades Técnicas e Impactos por Fallas de Operación

La implementación de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales conlleva un conjunto de desafíos inherentes, muchos de los cuales derivan de condiciones estructurales, ambientales y sociales que afectan directamente la operación y el mantenimiento de dichos sistemas. Este acápite examina las principales vulnerabilidades técnicas de cada una de las tecnologías evaluadas, así como los posibles impactos ambientales y sanitarios asociados a su mal funcionamiento.

En el caso de la fosa séptica de dos cámaras, una de las principales vulnerabilidades radica en su dependencia del mantenimiento periódico para evitar el colapso por acumulación de lodos. La falta de extracción de lodos reduce la capacidad útil del sistema y provoca arrastre de sólidos al efluente, incrementando la carga orgánica vertida al subsuelo. Otro riesgo frecuente es el uso de productos químicos o desinfectantes en altas concentraciones, que inhiben la flora bacteriana anaerobia natural del sistema. Asimismo, las conexiones hidráulicas mal selladas o tuberías obstruidas generan reboses que pueden poner en riesgo la salud pública y contaminar fuentes cercanas de agua (Metcalf & Eddy, 2014).

El FAFA, aunque más eficiente biológicamente, es vulnerable a la colmatación del medio filtrante debido a la acumulación progresiva de sólidos finos y biopelículas. Esta obstrucción, si no se detecta a tiempo, produce incremento en la pérdida de carga hidráulica y, en consecuencia, desbordamientos o fallas de funcionamiento. Adicionalmente, su correcta operación depende de una carga hidráulica uniforme y de la presencia de condiciones anaerobias estables, lo cual puede verse alterado en hogares con consumo intermitente o en épocas secas donde disminuye el caudal generado. En estudios previos realizados por la GIZ (2020), se ha observado que la falta de monitoreo de caudal y el mal diseño de las entradas provocan cortocircuitos hidráulicos que comprometen la eficiencia del

sistema. Además, existe el punto de partida de tratamiento, es decir, el filtro anaerobio tarda de 3 a 6 meses en comenzar a ser eficiente.

El sistema combinado presenta una mejora significativa al reducir las vulnerabilidades de cada componente individual. No obstante, su correcta operación requiere una adecuada integración hidráulica entre la fosa y el FAFA, especialmente en términos de cotas de entrada y salida, control de sobrecargas y prevención de la inestabilidad de suelo. Si esta configuración no es cuidadosamente diseñada y ejecutada, pueden presentarse fenómenos de recirculación o pérdida de eficiencia en la segunda etapa. A pesar de estas posibilidades, su diseño modular facilita la detección y corrección de fallas por separado, lo que representa una ventaja operativa importante.

En cuanto al biodigestor unifamiliar, sus vulnerabilidades son de mayor impacto potencial, especialmente cuando el sistema no cuenta con trampas de grasa adecuadas o se expone a aguas con altas concentraciones de detergentes o residuos orgánicos de difícil degradación. La sobrecarga orgánica repentina o la dilución excesiva por entradas de agua lluvia pueden inhibir el proceso metano génico, reduciendo significativamente la eficiencia y generando malos olores. Además, en ausencia de protocolos de arranque adecuados o de purga periódica de lodos, el sistema puede perder completamente su funcionalidad. A pesar de ello, cuando es bien diseñado y correctamente operado, el biodigestor puede mantenerse estable durante largos períodos, con producción continua de biogás y mínima intervención.

En todos los sistemas, una vulnerabilidad crítica transversal es la falta de capacitación del usuario final. La operación de estos sistemas no es intuitiva para muchas familias rurales, por lo que el éxito de la implementación depende de estrategias educativas previas y acompañamiento técnico durante los primeros meses de operación.

Desde una perspectiva ambiental, las fallas de operación no solo comprometen la eficiencia del tratamiento, sino que también representan un riesgo grave de contaminación del suelo, del agua subterránea y de transmisión de enfermedades

de origen hídrico. Esto es especialmente relevante en Teustepe, donde el nivel freático puede ser bajo en algunas zonas y las viviendas no cuentan con sistemas de contención secundaria.

5.4.4. Estudio Económico

El análisis económico de las tecnologías propuestas es un componente clave en la toma de decisiones para su implementación en entornos rurales. En este apartado se comparan los costos de inversión inicial (materiales, mano de obra y transporte), los costos operativos (mantenimiento, limpieza, extracción de lodos, sustitución de partes) y la viabilidad económica a mediano y largo plazo. Los valores presentados están basados en la simulación realizada en Excel utilizando los precios locales estimados durante una visita de campo.

Costos Iniciales

Los sistemas analizados presentan diferencias importantes en cuanto al costo inicial, El sistema FAFA representa la opción más accesible, con un costo promedio de instalación (inversión inicial) de USD 6,053.35 (C$ 220,947.21), considerando excavación manual, materiales de construcción y accesorios básicos.

La Fosa Séptica requiere un diseño más especializado, un sistema de distribución de caudal, lo que eleva su costo promedio a USD 7,864.52 (C$ 287,054.94), este incremento está justificado por su mayor eficaz trabajo, pero representa una barrera económica para algunas familias si se implementa de forma aislada.

El sistema combinado fosa séptica + FAFA implica una integración hidráulica, lo cual incrementa el volumen de obra y materiales. Su costo total promedio se estima en USD 11,140.01 (C$ 406,610.29), siendo más elevado, pero compensado por la mejora en la calidad del efluente. Esta configuración es recomendada para viviendas con mayor generación de aguas residuales o con riesgos ambientales significativos.

El biodigestor unifamiliar, pese a su valor agregado (producción de biogás), presenta el mayor costo inicial, estimado en USD 11,507.85 (C$ 420,036.43),

debido a su volumen mayor, trampa de grasas, cámara de acumulación de lodos y elementos de manejo de gas. Sin embargo, este sistema podría ser más rentable a largo plazo si se aprovecha adecuadamente el biogás.

En cuanto al pozo de absorción, este como complemento de todos los sistemas tiene un costo inicial estimado en USD 1,365.03 (C$49,823.70).

Costos de Operación y Mantenimiento

Las fosas sépticas requieren extracción de lodos cada año, con un costo promedio por servicio de US$ 40–50, dependiendo del acceso a camión cisterna o vaciado manual. No tienen partes móviles, lo que reduce el costo operativo.

El FAFA requiere limpieza del medio filtrante y control de obstrucciones al menos una vez al año. El costo operativo anual estimado es de USD$50-65, asociado a la revisión técnica, purga de sedimentos y posible reposición parcial del medio.

El sistema combinado eleva ligeramente los costos por tener dos componentes, con mantenimiento estimado entre USD$60-90 anuales, pero con menores intervenciones si opera bajo condiciones estables.

El biodigestor requiere mayor atención en la fase de arranque, control de temperatura, purga regular de lodos (cada 12 a 18 meses) y monitoreo del sistema de gas. Su costo operativo anual oscila entre USD$75-100, siendo mayor en comparación, aunque con retorno potencial si el biogás es utilizado para cocción o iluminación.

Por último, el pozo de absorción requiere limpieza y extracción de lodos por lo menos cada 3 años a pesar del dimensionamiento, lo cual se puede presupuestar en USD$100.

Evaluación Costo-Beneficio

Desde una perspectiva de costo-beneficio, el FAFA y el sistema combinado ofrecen mejor relación costo–eficiencia en términos de remoción de DBO, SST y coliformes, y presentan menores riesgos ambientales si son bien operados.

El biodigestor, si bien es más costoso, puede representar una solución integral en viviendas con suficiente espacio, alta carga orgánica y disposición a usar el biogás. En comunidades donde se implementen de forma agrupada o compartida, los costos pueden reducirse significativamente, mejorando su viabilidad económica.

Tabla 9. Resumen comparativo de costos y beneficios

Sistema	Costo Iniciales (USD)	Costo operativo anual (USD)	Frecuencia de mantenimiento	Valor agregado
Fosa séptica (2 cámaras)	7,864.52	40–50	Anual	Bajo
FAFA	6,053.35	50-65	Anual	Aceptable remoción biológica
Fosa + FAFA (combinado)	11,140.01	60–90	Anual	Eficiencia integrada Aceptable remoción biológica
Biodigestor unifamiliar	11,507.85	75-100	Anual	Biogás, mejor remoción Aceptable remoción biológica

Nota: Elaboración propia

El análisis económico demuestra que el diseño del sistema debe ajustarse no solo a criterios técnicos, sino también a las capacidades económicas de las familias rurales. Se recomienda explorar mecanismos de financiamiento, subsidios o implementación comunitaria para asegurar la viabilidad de tecnologías más eficientes, especialmente en el caso del FAFA y el biodigestor. En el Anexo IV se muestran los costos a detalle de cada sistema de tratamiento.

5.4.5. Requerimientos de Espacios, Materiales y Disponibilidad Local

Uno de los factores más determinantes en la selección e implementación de tecnologías de tratamiento descentralizado de aguas residuales en contextos rurales es la disponibilidad física del terreno, así como el acceso a materiales y capacidades constructivas locales. En este apartado se analiza la compatibilidad entre los requerimientos técnicos de cada sistema y las condiciones observadas en las viviendas rurales de Teustepe.

Requerimientos de Espacio

Los cuatro sistemas con su pozo de infiltración analizados requieren un área mínima de instalación en patio o solar, con variaciones en dimensiones, profundidad de excavación y acceso para mantenimiento.

- Fosa séptica de dos cámaras: Requiere un área mínima de 2.0 x 4.0 m con excavación de hasta 2.4 m de profundidad. Es adecuada para patios amplios y terrenos planos o de pendiente leve. Su forma rectangular facilita la construcción con materiales convencionales.
- FAFA: Presenta una huella similar a la de la fosa, aunque su profundidad puede ser ligeramente menor. No obstante, requiere espacio adicional para el medio filtrante y un sistema de distribución de caudal, así como pendiente hidráulica que asegure el flujo ascendente.
- Sistema Combinado: Al integrar fosa y FAFA, este sistema requiere un área total de al menos 3.0 x 3.5 m, y una excavación más extensa. Se vuelve más exigente en lotes reducidos o con alta compactación del suelo. Sin embargo, puede adaptarse modularmente si se dispone de espacio lateral o trasero.
- Biodigestor unifamiliar: Requiere un volumen mayor, con excavaciones de hasta 2.5 m de profundidad y un área superior a 3.0 x 3.5 m. Además, necesita espacio para el tanque de biogás y posibles canales de descarga. Solo es viable en solares con buena superficie disponible y condiciones físicas estables (sin riesgo de inundación).

Según los datos de 30 viviendas, el 73% de los hogares dispone de espacio suficiente para la instalación de una Fosa o FAFA, mientras que solo el 42% podría

albergar un sistema combinado o biodigestor, sin afectar zonas productivas o accesos.

Disponibilidad de Materiales de Construcción

Un diagnóstico determinó que en el municipio de Teustepe existe disponibilidad local de materiales básicos como bloques de concreto, cemento, varilla, arena, piedra bolón y grava. Además, se dispone de mano de obra calificada para obras de albañilería simple, lo que favorece la construcción de Fosas sépticas y FAFA.

El FAFA requiere medios filtrantes específicos (grava seleccionada, arena lavada, etc.) que, si bien se encuentran en ferreterías o distribuidores regionales, pueden encarecer el sistema si se deben transportar desde otros municipios.

El biodigestor implica materiales menos comunes, como tuberías de alta presión para gas, válvulas específicas y sistemas de almacenamiento de biogás. Aunque estos pueden adquirirse, no son de uso cotidiano en zonas rurales, lo que obliga a planificación y capacitación especial.

Las fosas sépticas utilizan exclusivamente materiales de fácil acceso y menor costo, lo que las hace más viables para autoconstrucción comunitaria o asistida.

Disponibilidad de Mano de Obra y Capacidades Locales

En las comunidades de Teustepe existen albañiles con experiencia en construcción de letrinas, pozos, lo cual permite aprovechar esta capacidad para construir fosas y filtros anaerobios bajo asesoría técnica mínima. Sin embargo, la construcción de biodigestores o sistemas combinados requiere asistencia especializada, al menos en la fase de instalación, conexión y pruebas iniciales, así como entrenamiento para su operación y mantenimiento.

Resumen Comparativo

Tabla 10. Comparación entre espacio requerido, materiales accesibles, profundidad estimada y capacitación adicional.

Sistema	Área mínima requerida	Profundidad estimada	Materiales accesibles localmente	Requiere capacitación adicional
Fosa séptica (2 cámaras)	2.0 x 4.0	2.4 m	Sí	No
FAFA	2.0 x 3.0 m	2.3 m	Parcialmente	Moderada
Fosa + FAFA (combinado)	3.0 x 3.5 m	2.2–2.5 m	Parcialmente	Sí
Biodigestor unifamiliar	3.0 x 3.5 m	2.5 m	No (requiere materiales externos)	Alta

Nota: Elaboración Propia

El análisis de requerimientos de espacio y materiales confirma que las fosas sépticas y FAFA son las opciones más compatibles con las condiciones físicas y logísticas de la mayoría de las viviendas rurales en Teustepe. Las tecnologías más avanzadas, como el biodigestor, son viables solo en casos específicos, donde el terreno, el interés del hogar y la capacidad técnica lo permitan. El diseño participativo, la capacitación comunitaria y la planificación por fases podrían mejorar la viabilidad de tecnologías más exigentes.

5.5. Priorización Tecnológica y Selección de Sistemas por Tipología de Vivienda

La priorización tecnológica constituye una etapa clave en el proceso de planificación e implementación de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales domésticas (TARD). En el contexto rural y periurbano del municipio de Teustepe, esta priorización debe responder a una diversidad de condiciones técnicas, sanitarias, ambientales y sociales identificadas mediante los instrumentos aplicados.

Este acápite tiene como objetivo ofrecer lineamientos técnicos para seleccionar la alternativa tecnológica más apropiada según la tipología habitacional observada, considerando el desempeño de cada sistema, los requerimientos operativos, los costos y la viabilidad contextual de implementación.

5.5.1. Tipología de Vivienda Identificadas

1. Viviendas dispersas con amplio patio y acceso a pozo privado.

- Materiales predominantes: bloque zinc.
- Presencia de letrina tradicional o baño conectado a tanque precario.
- Baja densidad poblacional, sin organización comunitaria.
- Bajo nivel educativo y limitada capacidad técnica.

2. Viviendas agrupadas en pendientes con escaso espacio disponible.

- Construcción mixta (bloque/madera), patios reducidos o inexistentes.
- Manejo deficiente de excretas (campo abierto o pozos improvisados).
- Cercanía a fuentes de agua y riesgo de escorrentía.
- Alta vulnerabilidad ambiental y sanitaria.

3. Viviendas cercanas a vías de acceso, con espacio moderado y participación comunitaria incipiente

- Piso de cemento o tierra, estructura aceptable.
- Disposición inadecuada de aguas grises y excretas.
- Interés en capacitación técnica y disposición para mantenimiento.

4. Viviendas en asentamientos organizados con acceso a tanque comunitario y liderazgo local

- Condiciones constructivas estables.
- Interés activo en mejorar el saneamiento y participar en proyectos colectivos.
- Presencia de juntas de agua y disposición al trabajo cooperativo.

5.5.2. Criterios de Selección de Tecnología

La elección tecnológica debe guiarse por los siguientes criterios, alineados con los hallazgos del acápite 5.3

- Eficiencia de remoción de DBO, SST y patógenos
- Requerimientos de espacio, materiales y mantenimiento.

- Costos de instalación y sostenibilidad económica.
- Robutez operativa frente a condiciones variables.
- Posibilidad de producción de biogás y uso energético.
- Compatibilidad con las capacidades sociales y organizativas locales.

Tabla 11. Selección de tratamiento según el acápite 5.3

Factores	**Variables**	**Fosa Séptica**	**FAFA**	**Sistema Combinado**	**Biodigestor**
Costos	Costos de Inversión	3	2	4	5
	Costos de Operación y Mantenimiento	3	2	4	5
	Expectativas de Calidad del Efluente	1	1	2	3
Objetivos del tratamiento	Productos aprovechables del sistema	2	1	2	3
	Disponibilidad de Recursos Locales	5	2	3	5
	Requerimiento de Energía	5	5	5	5
	Disponibilidad de Mano de Obra Local	5	5	5	5
Aspectos tecnológicos	Impacto Ambiental del Sistema de Tratamiento	3	2	1	4

	Eficiencia de la Tecnología	1	1	2	3
Normativas	Cumplimiento con las Normas Nacionales	1	1	2	3
Flexibilidad y Escalabilidad	Nivel del Tratamiento	1	2	4	4
	Gestión de Lodos	5	5	5	5
	Seguridad y Operabilidad	5	5	5	3
	Capacidad de Tratamiento	5	5	5	5
Totales		45	39	49	58

Nota: En la presente tabla se muestra la puntuación del 1 al 5, siendo 1 el menos adecuado y 5 el más adecuado, se eligió el de mayor puntuación considerando todos los factores antes mencionados. *Tabla tomada de la Clase FIA II para la elección de un tren tratamiento.*

El biodigestor presenta mayor puntaje por lo que es considerado el mejor tratamiento entre todos los presentados.

5.5.3. Tabla de Priorización Tecnológica por Tipología

En la tabla 12 se muestra los tratamientos adecuados según el tipo de vivienda tomando en cuenta la economía, lugar disponible y requerimientos externos.

Tabla 12. Priorización Tecnológica por Tipología de Vivienda

# Tipolg.	Tipología de Vivienda	Tecnología Sugerida	Justificación
1	Viviendas dispersas con patio amplio	Fosa séptica de 2 cámaras Biodigestor unifamiliar	Requiere bajo mantenimiento, fácil instalación y alta robustez. Viabilidad técnica y social alta, aprovechamiento energético, mayor eficiencia.
2	Viviendas en pendientes con escaso espacio y riesgo hídrico	FAFA o sistema combinado	Mayor eficiencia, menor impacto ambiental, adaptable a pendientes.
3	Viviendas cercanas a vías con interés técnico moderado	FAFA	Mantenimiento sencillo, alta eficiencia secundaria.
4	Viviendas organizadas con espacio amplio y participación local	Biodigestor unifamiliar	Viabilidad técnica y social alta, aprovechamiento energético, mayor eficiencia.

Nota: Elaboración Propia

Para tipología 1, la fosa séptica de dos cámaras representa una solución de bajo costo y fácil implementación, ideal para viviendas con baja densidad y sin requerimientos energéticos adicionales. Debe preverse una rutina básica de mantenimiento. En la tipología 2, el uso de un FAFA o sistema combinado (fosa + FAFA) es imprescindible, dado el riesgo ambiental y la cercanía a fuentes hídricas. La eficiencia en remoción y el diseño compacto permiten su adaptación al terreno.

Para la tipología 3, donde se observa un interés emergente por mejorar las condiciones sanitarias, se recomienda el FAFA, que combina buena eficiencia técnica con requerimientos operativos accesibles. Finalmente, en la tipología 4, el biodigestor unifamiliar se considera altamente viable, ya que la organización

comunitaria y la disposición al aprendizaje garantizan un manejo adecuado, y se genera valor agregado a través del biogás.

5.6. Validación Técnica Normativa y Contribución al Desarrollo Local

Los resultados obtenidos a partir del diseño y simulación de los sistemas unifamiliares descentralizados de tratamiento de aguas residuales permiten confirmar no solo su viabilidad técnica y operativa en las condiciones del municipio de Teustepe, sino también su cumplimiento con la normativa ambiental nacional vigente y su relevancia estratégica para avanzar en la mejora del saneamiento rural sostenible. En este apartado se discute cómo los sistemas propuestos cumplen con los parámetros del Decreto 21-2017, y se analiza su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así como los marcos de política pública y replicabilidad a nivel territorial.

5.6.1. Cumplimiento de los Parámetros del Decreto 21-2017 para Vertidos

El Decreto 21-2017, emitido por el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA), establece los límites máximos permisibles para vertidos de aguas residuales domésticas tratadas en suelos o cuerpos receptores. En el contexto rural de Teustepe, estos límites normativos representan una condición indispensable para la validación técnica de los sistemas propuestos.

A partir de los resultados de simulación y modelado hidráulico-sanitario, los sistemas evaluados muestran una remoción significativa de contaminantes, permitiendo alcanzar las siguientes condiciones de vertido:

Tabla 13. Resultados de vertidos de cada sistema de tratamiento en comparación con los valores permisibles del decreto 21-2017.

Parámetros en mg/L (menos Solidos Sedimentables)	**Valores del Afluente**	**Valores de Salida de cada Tratamiento**				**Valores Máximos Permisibles del Decreto 21 - 2017**
		Fosa Séptica	**FAFA**	**Sistema Combinado**	**Biodigestor**	
Sólidos Totales (ST)	1200	660	540	297	300	80
Sólidos Disueltos (SD)	850	637,5	467,5	350,625	382,5	-

Sólidos sedimentables	20	6	5	1,5	1,5	1
DBO_5	400	85,72	74,04	12,5868	80	110
COT (Carbono Orgánico Total)	290	203	145	101,5	87	-
DQO	1000	650	400	260	250	220
Nitrógeno total (N)	85	68	51	40,8	34	30
Amoniaco Libre	50	42,5	35	29,75	25	-
Nitratos	0	0	0	0	0	-
Fósforo Total (P)	15	13,5	11,625	10,4625	9	10
Cloruros	100	95	92,5	87,875	85	-
Alcalinidad (como CaCO3)	200	180	165	148,5	120	-
Grasas y aceites	150	105	75	52,5	45	15

Nota: Elaboración propia

5.6.2. Contribución a los ODS y a la Política Nacional de Saneamiento

Los sistemas evaluados se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con los siguientes:

- ODS 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.
- ODS 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
- ODS 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
- ODS 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

El diseño de sistemas unifamiliares que permiten el tratamiento efectivo del 100% del caudal generado por una vivienda rural promedio representa un aporte real al cierre de brechas en acceso a saneamiento básico, reduciendo la contaminación por vertidos sin tratar. Además, la producción de subproductos valorizables como biogás (hasta 0.25–0.30 m^3/día por vivienda) y biofertilizante líquido, refuerza el vínculo con prácticas sostenibles en energía y agricultura.

A nivel nacional, la propuesta se articula con la Política Nacional de Saneamiento impulsada por el Gobierno de Nicaragua, que establece como meta prioritaria el acceso universal al saneamiento adecuado para el año 2030, con especial atención a zonas rurales y periurbanas (PNSS, 2020). La incorporación de tecnologías apropiadas, de bajo costo y con alto grado de autonomía, fortalece la estrategia de cobertura universal rural mediante sistemas descentralizados.

5.6.3. Aportaciones Técnicas del Estudio a Procesos de Escalamiento y Replica.

Desde el punto de vista técnico, los aportes más relevantes de este trabajo se traducen en:

- Elaboración de algoritmos de diseño y hojas de cálculo automatizadas en Excel, que permiten dimensionar de forma precisa y replicable los sistemas según el número de habitantes, la dotación per cápita, la carga orgánica y los parámetros normativos. Estos algoritmos han sido sistematizados en los anexos del estudio.
- Validación funcional de prototipos digitales mediante modelación técnica con datos reales de campo, lo que otorga confiabilidad a los resultados y evidencia su adaptabilidad a condiciones similares en otros municipios del país.
- Formulación de una matriz comparativa de pertinencia tecnológica para contextos rurales, que permite priorizar la selección del sistema más adecuado según variables como tipo de suelo, acceso energético, capacidad de mantenimiento comunitario y presión demográfica.

Estos aportes permiten que el estudio no se limite a un ejercicio académico, sino que se proyecte como una herramienta concreta para la planificación, ejecución y evaluación de proyectos de saneamiento rural descentralizado en Nicaragua y Centroamérica.

5.7. Evaluación de Impactos Ambientales Potenciales de las Alternativas Tecnológicas

La implementación de tecnologías de tratamiento descentralizado de aguas residuales, aunque dirigida a mejorar las condiciones sanitarias y ambientales en zonas rurales y periurbanas, conlleva impactos ambientales potenciales que deben ser identificados, evaluados y gestionados. Esta sección presenta un análisis cualitativo y semicuantitativo de dichos impactos (Ver Anexo V), considerando el ciclo de vida de los sistemas propuestos (fosa séptica, filtro biológico, sistema combinado y biodigestor) y su interacción con los componentes físico-bióticos y socioeconómicos del entorno.

El análisis se sustenta en la normativa ambiental vigente en Nicaragua, en particular el Decreto 20-2017, que establece las disposiciones generales del Sistema Nacional de Evaluación Ambiental (SEIA). Bajo este marco, se clasifican los proyectos en distintas categorías de impacto ambiental y se establece la necesidad de implementar medidas de mitigación, seguimiento y control. En el caso de los sistemas de tratamiento unifamiliares, debido a su escala reducida, localización en zonas sensibles (con manto freático superficial) y potencial acumulativo.

5.7.1. Identificación de Impactos Ambientales Asociados al Ciclo de Vida del Sistema

Los impactos ambientales asociados a la instalación y operación de los sistemas pueden agruparse en tres etapas del ciclo de vida:

1. Etapa de construcción: se generan impactos menores y de corta duración, tales como remoción de vegetación, generación de escombros y alteración temporal del suelo. Estos impactos son comunes a todas las tecnologías propuestas, aunque el sistema combinado y el biodigestor requieren mayor excavación y uso de materiales.
2. Etapa de operación y mantenimiento: es la más relevante en términos de impactos. Aquí se evalúan aspectos como:

- Efluentes con carga contaminante residual si el sistema no es correctamente operado o mantenido.
- Riesgo de contaminación del subsuelo o cuerpos de agua por filtraciones.
- Emisión de olores (particularmente en el caso del biodigestor).
- Producción de lodos que deben ser gestionados adecuadamente.

3. Etapa de cierre o abandono: implica la disposición final del sistema, sellado de cámaras y manejo de residuos sólidos residuales. Este aspecto es poco documentado en Nicaragua, pero debe ser considerado en planes de sostenibilidad.

Tabla 14. Resumen de los principales impactos generales potenciales identificados junto a su evaluación correspondiente mediante en un matiz Leopold

		Excavación y preparación del terreno	Construccion del sistema	Instalación del sistema de cloración	Operación del sistema	Almacenamiento de productos	Cloración del efluente	Mantenimiento preventivo	Disposición de lodos	Abandono o cierre del sistema	Afectaciones +	Afectaciones -	Impacto del agregado
Suelos		-6 / 3	5 / 3	-1 / 3	8 / 3	2 / 3	-4 / 3	2 / 3	-4 / 1	-8 / 3	4	4	-10
Calidad de agua		1 / 1	1 / 1	7 / 6	5 / 6	-5 / 4	8 / 6	6 / 5	8 / 4	-9 / -6	7	2	218
Calidad del aire		-4 / 4	-4 / 4	-2 / 3	-2 / 3	-7 / 6	1 / 3	8 / 6	-10 / 5	3 / 6	3	5	-67
Flora		-7 / 6	-2 / 3	-3 / 6	1 / 3	1 / 3	-6 / 6	1 / 3	4 / 1	6 / 3	5	3	-71
Fauna		-7 / 6	-5 / 4	-3 / 6	5 / 6	1 / 3	2 / 6	1 / 3	4 / 1	6 / 6	6	2	8
Salud y seguridad		-6 / 4	-6 / 4	5 / 5	8 / 6	-2 / 1	7 / 6	6 / 6	-2 / 4	-9 / 6	4	4	39
Estilo de vida		1 / 1	1 / 1	6 / 6	8 / 3	-1 / 1	5 / 5	6 / 3	-2 / 1	-5 / 3	6	3	87
Empleo		5 / 7	5 / 7	5 / 7	1 / 1	1 / 1	1 / 1	3 / 7	1 / 7	-1 / 9	8	1	127
Infraestructura		-2 / 3	1 / 3	1 / 1	1 / 3	1 / 3	-6 / 3	9 / 3	5 / 2	-7 / 3	6	2	2
Paisaje		-8 / 4	-2 / 4	1 / 1	-3 / 3	1 / 3	1 / 3	1 / 3	-9 / 4	1 / 3	5	3	-72
Afectaciones	+	3	5	6	8	6	7	10	5	4			261
	-	7	5	4	2	4	3	0	5	6			
Impacto del agregado		-143	-19	95	148	-46	68	195	-43	6	261		

Nota: Elaboración Propia

5.7.2. Criterios para la Clasificación Ambiental según Decreto 20-2017

El Decreto 20-2017 establece la clasificación de proyectos en función del nivel de impacto ambiental proyectado, para efectos de determinar la modalidad de evaluación ambiental requerida (Diagnóstico Ambiental, Estudio de Impacto Ambiental, etc.).

Con base en los criterios del Artículo 16 y el Anexo I del Decreto, el proyecto de instalación de sistemas unifamiliares en Teustepe se clasifica en la Categoría III, por las siguientes razones:

- Escala reducida del sistema, con caudales menores a 1.5 m³/día.
- Localización en zona con manto freático superficial, lo que incrementa el riesgo ambiental si no se implementa adecuadamente.
- Potencial de acumulación de impactos en comunidades donde se implementen varios sistemas simultáneamente.

Dado lo anterior, el procedimiento requerido por MARENA corresponde a la presentación de un Diagnóstico Ambiental acompañado de un Plan de Gestión Ambiental Simplificado, orientado al seguimiento de la calidad del efluente, manejo de lodos y control de filtraciones.

5.7.3. Medidas de Mitigación y Gestión Ambiental Propuesta

Se han identificado un conjunto de medidas clave para prevenir, minimizar y controlar los impactos durante la instalación y operación de los sistemas:

- Ubicación adecuada del sistema, a una distancia reglamentaria en metros de fuentes de agua o pozos y fuera de zonas de inundación.
- Mantenimiento regular de los sistemas, incluyendo extracción de lodos cada 1 a 5 años.
- Capacitación comunitaria sobre el uso adecuado del sistema, separación de residuos sólidos y prevención de sobrecargas.
- Monitoreo del efluente tratado, especialmente si se usa para riego o infiltración en suelos agrícolas.

- Asegurar que el pozo de absorción se construya de acuerdo con las normativas locales de construcción y en un lugar adecuado para evitar la contaminación de fuentes de agua cercanas.
- Monitorear la capacidad de absorción y la salud del suelo regularmente para garantizar la efectividad del sistema a largo plazo.
- Manejo y disposición de lodos

5.7.4. Compatibilidad Ambiental y Viabilidad Territorial de los Sistemas

Los resultados del análisis ambiental permiten concluir que, con diseño adecuado y protocolos de mantenimiento definidos, los sistemas TARD propuestos son ambientalmente compatibles con el territorio del municipio de Teustepe. Su bajo consumo energético, el uso de materiales locales, la facilidad de operación y la posibilidad de recuperación de subproductos (biogás y lodos estabilizados) los convierten en soluciones de alta viabilidad técnica y ambiental.

El enfoque descentralizado también reduce la necesidad de grandes obras de infraestructura, minimiza la fragmentación del paisaje y se adapta mejor a la dispersión geográfica de las viviendas. Su implementación masiva podría contribuir al cumplimiento de metas nacionales de saneamiento y a la protección de recursos hídricos, siempre que se integren en planes territoriales y comunitarios de desarrollo sostenible.

VI. Conclusiones

El presente estudio permite diseñar y evaluar técnicamente cuatro sistemas unifamiliares de tratamiento de aguas residuales domesticas aplicables a viviendas en zonas rurales y periurbanas de Nicaragua, demostrando que es viable implementar soluciones descentralizadas eficientes, sostenibles y adaptadas a las condiciones geográficas, climáticas y socioeconómicas del contexto nacional.

A través del modelado hidráulico y cinético se comprobó que cada alternativa tecnológica presenta ventajas particulares en términos de eficiencia y remoción, adaptabilidad territorial y requerimientos operativos. No obstante, el sistema combinado y el biodigestor muestran mayor potencial de desempeño integral al ofrecer un tratamiento mas completo y en el caso del biodigestor un valor agregado energético mediante la producción de biogás.

La investigación confirma que el diseño ingenieril contextualizado acompañado de criterios de sostenibilidad y evaluación ambiental constituye una herramienta clave para reducir la brecha de saneamiento en Nicaragua.

6.1. Diagnóstico del Contexto Habitacional y Sanitario de Teustepe

El presente estudio ofrece una visión clara y detallada sobre las condiciones socioeconómicas, la infraestructura de saneamiento, la percepción comunitaria y el nivel de conocimiento técnico de la población evaluada. La información recolectada permite concluir que las comunidades rurales encuestadas enfrentan retos significativos en el manejo adecuado de las aguas residuales, pero también muestran una alta disposición al cambio, siempre que existan condiciones favorables.

Se identificaron condiciones técnicas, sanitarias, ambientales y sociales que justifican la implementación de sistemas descentralizados unifamiliares en Teustepe. La mayoría de los hogares rurales está compuesta por 4 a 6 personas y depende de actividades agropecuarias, lo que limita su capacidad económica para invertir en infraestructura sanitaria. Aunque el 79% dispone de algún sistema

de saneamiento, predominan las letrinas y solo el 5% cuenta con alcantarillado, mientras que el 50% de las aguas residuales se vierte directamente al suelo o cuerpos de agua, generando riesgos sanitarios y ambientales. La percepción sobre los sistemas actuales es mayormente negativa: el 51% de la población está insatisfecha y el 42% ha tenido problemas de salud posiblemente vinculados al mal manejo de aguas residuales. No obstante, el 88% reconoce la importancia de tratarlas adecuadamente, y aunque el 60% desconoce otras tecnologías, el 65% estaría dispuesto a adoptar una nueva si tuviera los recursos. Los principales factores considerados para implementar nuevas soluciones son el costo (85%), la facilidad de mantenimiento (60%) y la eficiencia del tratamiento (55%), seguidos por el impacto ambiental (40%) y otros aspectos como el espacio y la durabilidad (15%).

6.2. Diseño Técnico Funcional de Cuatro Alternativas Tecnológicas Adaptadas al Contexto Rural

Se realizó un modelado de diseño para cuatro tecnologías descentralizadas apropiadas cuales son Fosa Séptica bicameral, Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA), Sistema Combinado (Fosa + FAFA) y Biodigestor Unifamiliar. Todos los dispositivos fueron dimensionados para una carga estimada de 512 L/día, correspondiente a una familia de 8 personas, con una dotación individual de 80 L/hab/día y un 80 % de generación de aguas residuales. El tiempo de retención hidráulica (T_{RH}) se estableció 22.08 horas para FAFA, 10 días para el biodigestor, y 16.49 horas para la fosa séptica y para el sistema combinado 24 y 22.08 horas correspondientemente, según la literatura técnica y normativa nacional. Los sistemas diseñados cumplen con los requisitos funcionales de remoción de DBO, SST y coliformes, usando materiales disponibles localmente como ladrillos, PVC, concreto simple, etc.

6.3. Evaluación Comparativa del Desempeño Técnico de los Sistemas Propuestos

Los resultados de simulación técnica indican que el sistema combinado y el biodigestor unifamiliar presentan el mayor desempeño global. El sistema

combinado alcanzo una remoción estimada de 95% de DBO, 90% de SST y la literatura muestra que alcanza un porcentaje de remoción del 2.0 (log_{10}) de coliformes fecales, mientras que el biodigestor unifamiliar mostró eficiencia del 80% de DBO, 75% de SST y 2.0 (log_{10}) de coliformes fecales. Mientras que los otros dos sistemas tienen un porcentaje alto en algunos parámetros y otros bajos lo que no los hace apto para el cumplimiento. Se confirma que las condiciones térmicas de Teustepe favorecen la eficiencia de los procesos anaerobios, optimizando el rendimiento sin necesidad de fuentes externas de energía.

6.4. Impacto Ambiental y Conformidad Normativa de las Alternativas Evaluadas.

Los resultados de simulación técnica indican que el sistema combinado y el biodigestor unifamiliar presentan el mayor desempeño global. El sistema combinado alcanzo una remoción estimada de 95% de DBO, 90% de SST y la literatura muestra que alcanza un porcentaje de remoción del 2.0 (log_{10}) de coliformes fecales, mientras que el biodigestor unifamiliar mostró eficiencia del 80% de DBO, 75% de SST y 2.0 (log_{10}) de coliformes fecales. Mientras que los otros dos sistemas tienen un porcentaje alto en algunos parámetros y otros bajos lo que no los hace apto para el cumplimiento. Se confirma que las condiciones térmicas de Teustepe favorecen la eficiencia de los procesos anaerobios, optimizando el rendimiento sin necesidad de fuentes externas de energía.

6.5. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y Políticas Nacionales de Saneamiento.

Este trabajo aporta evidencia técnica, ambiental y social para ampliar soluciones de saneamiento básico en zonas rurales de Nicaragua. Además, contribuye al cumplimiento del ODS 6 y respalda las metas nacionales de saneamiento del INAA y MARENA. También presenta herramientas de diseño reproducibles, como un algoritmo paramétrico y una hoja de cálculo adaptada, que pueden ser replicadas por comunidades, gobiernos locales y programas de cooperación.

VII. Recomendaciones

A partir de los hallazgos obtenidos durante el desarrollo del estudio, se plantean las siguientes recomendaciones

- Se recomienda implementar soluciones de saneamiento adaptadas al contexto rural, que sean económicas, fáciles de mantener y eficientes en el tratamiento de aguas residuales.
- Estas tecnologías deben ser accesibles para familias, de operaciones sencillas y adecuadas a espacios reducidos. Es clave asegurar su eficacia sanitaria y ambiental, sin requerir conocimientos técnicos avanzados.
- Priorizar el sistema combinado o biodigestor en zonas ambientales sensibles.
- Para garantizar su sostenibilidad, estas soluciones deben ir acompañadas de programas de capacitación comunitaria que fortalezcan las capacidades locales, así como de mecanismos de apoyo económico como subsidios o financiamiento, que faciliten su adopción por parte de la población.
- Incorporar monitoreo básico de calidad del efluente en proyectos piloto.
- Diseñar adecuadamente sistemas de infiltración según estudios de suelo.
- Integrar estas soluciones en planes municipales de saneamiento rural.
- Impulsar proyectos demostrativos para validar replicabilidad nacional.

VIII. Bibliografía

Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación [COSUDE]. (2013). *Estudio sobre condiciones de saneamiento y agua en comunidades periurbanas de Nicaragua.*

Asamblea Nacional de la República de Nicaragua. (2017). *Decreto No 21-2017: Normativa Nacional de Vertido para Aguas Residuales.* Managua: Gaceta Oficial de Nicaragua.

Asamblea Nacional de la República de Nicaragua. (2017). *Ley N.º 217: Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales.* Managua: Gaceta.

Banco Mundial. (2012). *Proyecto de agua y saneamiento en comunidades rurales del Alto Wanky y Bocay.* Obtenido de https://documents.worldbank.org

Banco Mundial. (2013). *Proyecto de agua y saneamiento en comunidades rurales e indígenas de Nicaragua.* Obtenido de https://documents.worldbank.org

Comisión Nacional del Agua, Managua [CONAGUA]. (2015). *Normas para el diseño de sistemas de saneamiento en zonas rurales de Nicaragua.*

Córdova, P., Barrios, T., Córdova, I., & Navarrete, R. (Agosto de 2021). Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante reactor anaerobio para la reutilización del efluente en cultivos agrícolas. *SciELO, 5*(14). Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2664-09022021000200237

EDDY, M. &. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery.* Mc Graw Hill.

El HABITAR. (2009). *Construcción de biojardineras para el saneamiento de aguas grises en barrios de Managua. Hábitat para la Humanidad Nicaragua.*

Environmental Protection Agency [EPA]. (2002). *Onsite Wastewater Treatment Systems Manual.* UNITED STATES. Obtenido de https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-06/documents/epa_onsite_wastewater_treatment_manual.pdf

FCAS, F. d. (2019). *NICARAGUA.*

Fundación SNV. (2020). *Guía Técnica para Biodigestores Familiares en América Latina.*

Garache, A. (2022). *Gestión de las organizaciones locales para el abastecimiento de agua potable en tres comunidades de Santa Teresa, Carazo.* Universidad Nacional Agraria.

George Tchobanoglous; Franklin Burton; David Stensel. (2003). *Wasterwater Engineering.*

George Tchobanoglous; Franklin Burton; David Stensel. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (Cuarta ed.). McGraw-Hill Education.

Gonzalez, V. (2010). *Diagnóstico ambiental del municipio de Teustepe, Boaco. .* Alcaldía Municipal de Teustepe.

Henry - Instituto del Agua. (2024). *Importancia del Tratamiento de Aguas Residuales: Clave para un Futuro Sostenible.*

Henry - Instituto del Agua. (s.f.). *Aguas Residuales: Clasificación y Tipos Esenciales.* Recuperado el 2025, de https://institutodelagua.es/aguas-residuales/clasificacion-de-las-aguas-residualesaguas-residuales/

Hernandez, J., & Chavez, C. (2012). Evaluación del desempeño de fosas sépticas y biodigestores en zonas rurales. *Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental* , 45 - 56.

Instituto Nacional de Información de Desarrollo [INIDE]. (2022). *Encuesta Nacional de Hogares con Propósitos Múltiples 2021.* Obtenido de https://www.inide.gob.ni

Instituto Nacional de Información de Desarrollo [INIDE]. (2023). *Boletín de estadísticas territoriales de Nicaragua: Departamento de Boaco.*

Instituto Nicaraguense de Acueductos y Alcantarillados [INAA]. (2021). *Normativa técnica para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales y periurbanas.*

Instituto Nicaraguense de Acueductos y Alcantarillados [INAA]. (2015). *Normas técnicas para diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales.*

Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales [INETER]. (2020). *Atlas climático de Nicaragua .*

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales [INETER]. (2022). *Estudios geográficos y edafológicos del centro de Nicaragua.*

López, M. R. (2015). Diseño y operación de pozos de absorción en sistemas unifamiliares de tratamiento de aguas residuales en Nicaragua. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 35-48.

Lozano, L. &. (2024). *Instalaciones hidráulicas y sanitarias: Qué son y en qué se diferencian?*

Lucho Constantino C. A. (2015). Diseño de fosas sépticas rectangulares mediante el uso de la herramienta FOSEP. *SCielo*, 757 - 765. Obtenido de

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382015000300018&script=sci_abstract

McCarty, P. L. (2018). *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals.* McGraw-Hill Education.

Menéndez Wither, E. (2021). Aplicación de biodigestores como solución energética y sanitaria en zonas rurales de Centroamérica. *Revista Centroamericana de Ingeniería*, 55-68.

METCALF & EDDY . (1995). *Ingenieria de Aguas Residuales, Tratameinto, vertido y reutilización.* Madrid: McGRAW-HILL.

Metcalf & Eddy. (2014). *Wasterwater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (Quinta ed.). McGraw-Hill Education.

Ministerio de Salud de Nicaragua [MINSA]. (2015). *Normas higiénico-sanitarias para la disposición de excretas en zonas rurales.*

Ministerio de Salud de Nicaragua [MINSA]. (2023). *Estadísticas sanitarias del municipio de Teustepe.*

Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales [MARENA]. (2011). *Norma Técnica Obligatoria NTON 09 006-11: Manejo y disposición de aguas residuales domésticas y su impacto ambiental.* Managua.

Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales [MARENA]. (2015). *Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental en proyectos menores.*

Norma Técnica Obligatoria Nicaraguense [NTON]. (1998). *NTON 05 010-98: NORMA DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS DOMESTICOS Y PARTICULARES PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES.*

Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.* Obtenido de https://sdgs.un.org/es/2030agenda

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2011). *Wastewater treatment and use in agriculture.*

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2019). *Fact sheet: Drinking-water.* Obtenido de https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2020). *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs. WHO and UNICEF Joint Monitoring Programme.* Obtenido de https://www.who.int/publications/i/item/9789240030848

Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (2017). *Situación del agua y saneamiento en zonas periurbanas de América Latina.* Recuperado el 2025, de https://www.paho.org

Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (2020). *Datos de saneamiento básico en America Central: Informe regional.* Obtenido de https://www.paho.org

Osorio, M., Carrillo, W., Loor, X., Negrete, J., & Riera, E. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del Conocimiento, 6*(3). doi:10.23857

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2021). *Informe sobre desarrollo humano en Nicaragua: Desigualdad multidimensional y pobreza .*

Proyecto Regional de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental [PREVDA]. (s.f.). *Evaluación de recursos naturales y amenazas ambientales en la subcuenca del río Malacatoya.*

Salas, J. J. (s.f.). *iagua*. Obtenido de https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/humilde-fosa-septica-fundamentos-tipos-y-diseno

SICA, S. d. (2013). *Gestión de las Excretas y Aguas Residuales: NICARAGUA.*

Speece, R. E. (2008). *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters.* Archae Press.

Sperling, M. V. (2005). *Introducción a la calidad del agua y tratamiento de aguas residuales.* Publicaciones IWA.

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies* (Segunda ed.). Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Obtenido de https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/s

Umaña, A. (2016). *Fortalecimiento a la gestión de los Comités de Agua Potable y Saneamiento en comunidades rurales del municipio de Estelí.* Universidad Nacional Autonoma de Nicaragua.

UNICEF. (2018). *WASH in the Community: Rural Water, Sanitation and HYGIENE Programming.* Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia.

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2002). *Environmental Impact Assessment Training Resource Manual* (Segunda ed.).

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication.*

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA [UNI]. (2010). INSTRUCTIVO PARA LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO DE DIPLOMA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA. Managua.

IX. Anexos

Anexo I

Cuestionario para pobladores de comunidades rurales y periurbanas: análisis de características y necesidades en la gestión de aguas residuales domésticas

Datos Generales: Nombre (opcional): _____

Edad: _____

Género: [ ] Masculino [ ] Femenino [ ] Otro

Comunidad:_____ Departamento/Región: _____

Sección A: Información Demográfica y Socioeconómica

¿Cuántas personas viven en su hogar?

[ ] 1-3 [ ] 7-9

[ ] 4-6 [ ] Más de 9

¿Cuál es la principal fuente de ingresos de su hogar?

[ ] Agricultura [ ] Ganadería [ ] Pesca

Otro trabajo (especificar): _____

Sección B: Infraestructura y Saneamiento en el Hogar

¿Su vivienda cuenta con un sistema de saneamiento?

[ ] Sí [ ] No

Si la respuesta anterior fue "Sí", ¿qué tipo de sistema tiene?

[ ] Baño conectado a un sistema de alcantarillado

[ ] Letrina [ ] Fosa séptica

[ ] Otro (especificar): _____

¿Dónde se desechan las aguas residuales de su vivienda?

[ ] Directamente al suelo [ ] En una fosa o pozo

[ ] Ríos o cuerpos de agua cercanos Otro (especificar): _____

Sección C: Gestión de Aguas Residuales Domésticas

¿Está satisfecho/a con el sistema de tratamiento de aguas residuales de su vivienda?

[ ] Sí [ ] No [ ] No tiene sistema

¿Ha notado problemas de salud en su familia relacionados con la gestión de aguas residuales?

[ ] Sí [ ] No [ ] No está seguro/a

¿Considera importante tratar adecuadamente las aguas residuales domésticas?

[ ] Sí [ ] No

[ ] No sabe/No está seguro/a

Sección D: Conocimiento y Percepción sobre Sistemas de Tratamiento

¿Conoce algún sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas diferente al que tiene en su hogar?

[ ] Sí (especificar): _____ [ ] No

¿Estaría dispuesto/a a cambiar o mejorar el sistema de tratamiento de aguas residuales de su vivienda si tuviera los recursos?

[ ] Sí [ ] No [ ] Tal vez

¿Qué factores consideraría para implementar un nuevo sistema de tratamiento en su hogar? (Puede seleccionar más de uno)

[ ] Costo [ ] Facilidad de mantenimiento

[ ] Eficiencia en el tratamiento [ ] Impacto ambiental

[ ] Otros (especificar): _____

Sección E: Participación y Capacitación

¿Ha participado en capacitaciones o talleres sobre saneamiento y tratamiento de aguas residuales?

[ ] Sí [ ] No

Si la respuesta anterior fue "Sí", ¿quién organizó estas capacitaciones?

Organizaciones no gubernamentales [ ] Gobierno local o nacional

[ ] Otros (especificar): _____

¿Estaría interesado/a en recibir capacitación sobre mejores prácticas en la gestión y tratamiento de aguas residuales domésticas?

[ ] Sí [ ] No [ ] Tal vez

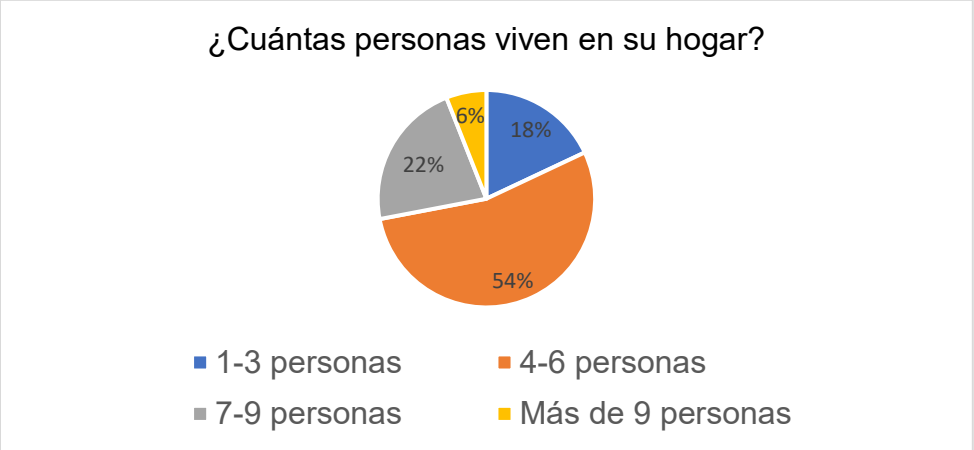
Comentarios adicionales:

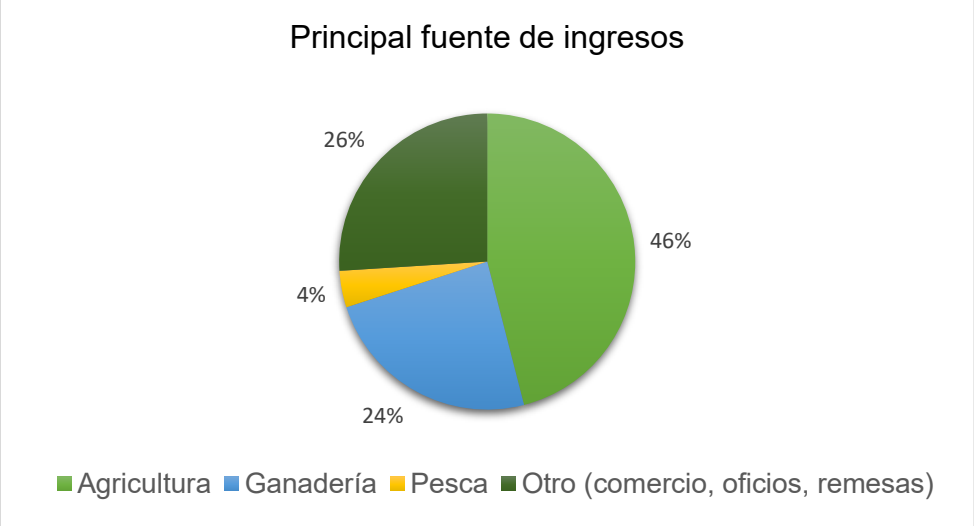
Este cuestionario está diseñado para obtener una comprensión detallada de las prácticas, percepciones y necesidades de los pobladores en relación con la gestión de aguas residuales domésticas en comunidades rurales y periurbanas de Nicaragua. La información recopilada será esencial para diseñar intervenciones y soluciones adecuadas a las realidades y necesidades de estas comunidades.

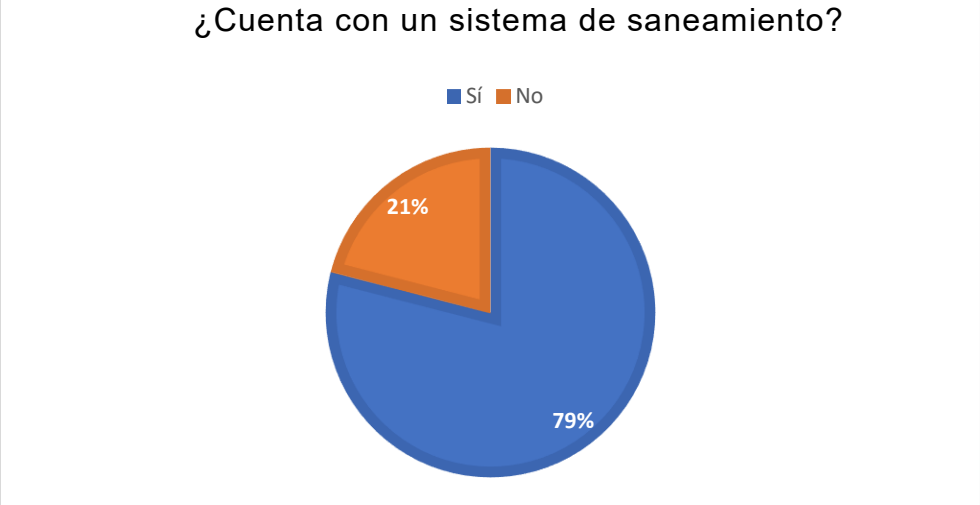
Anexo II

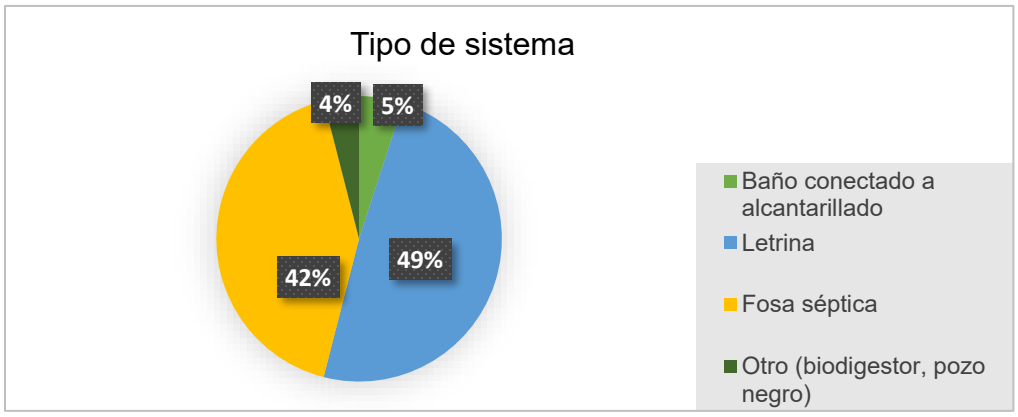
Resultados de encuesta sobre gestión de aguas residuales en Teustepe

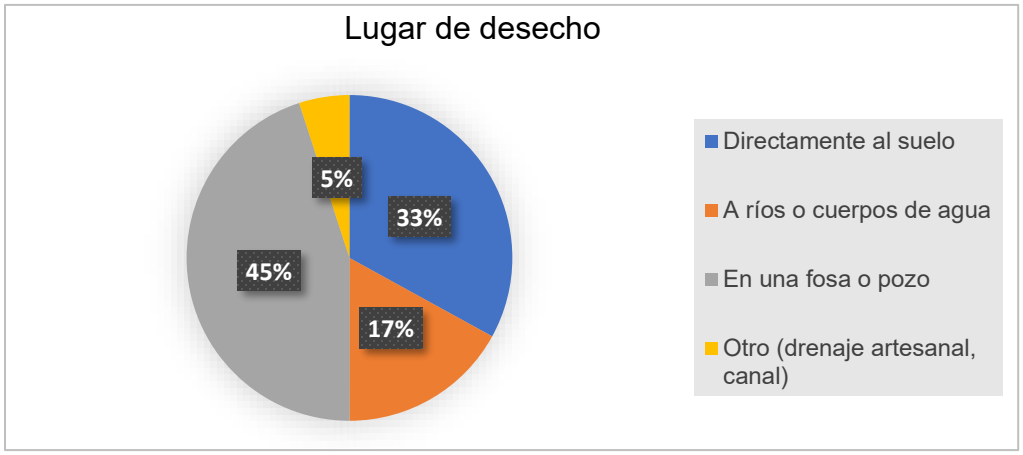
Muestra: 381 personas

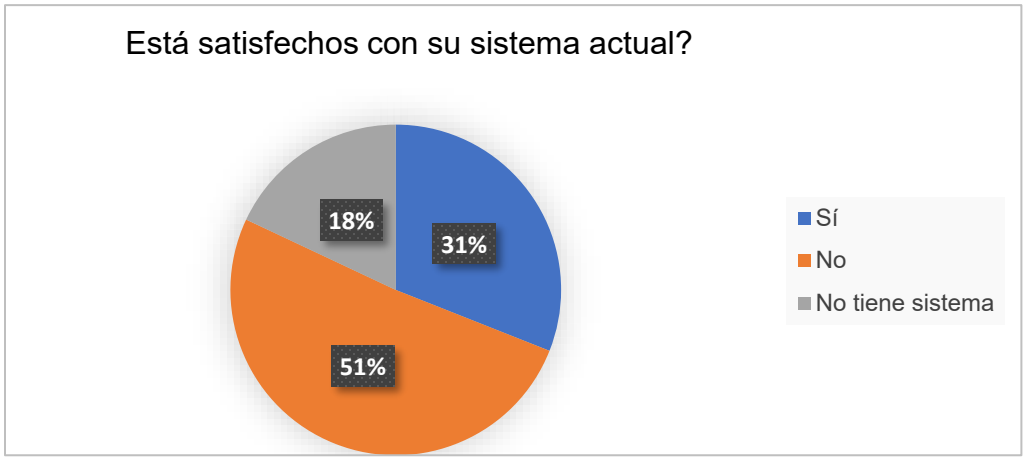


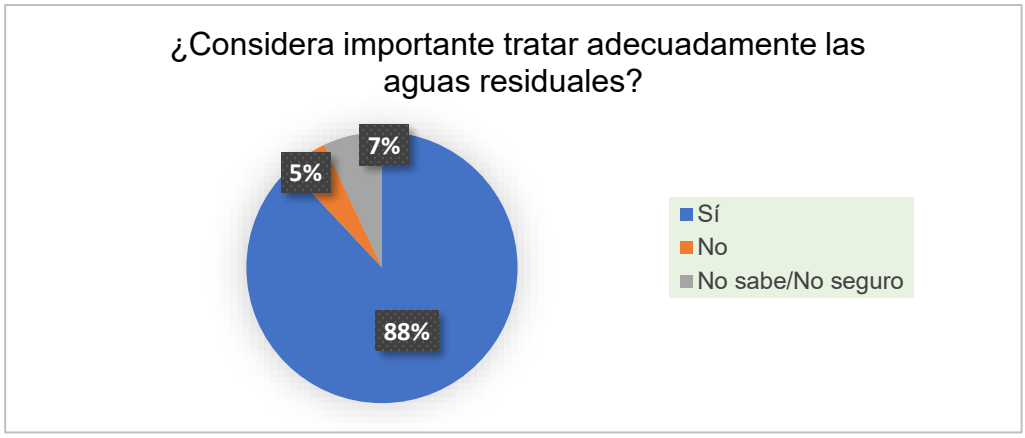


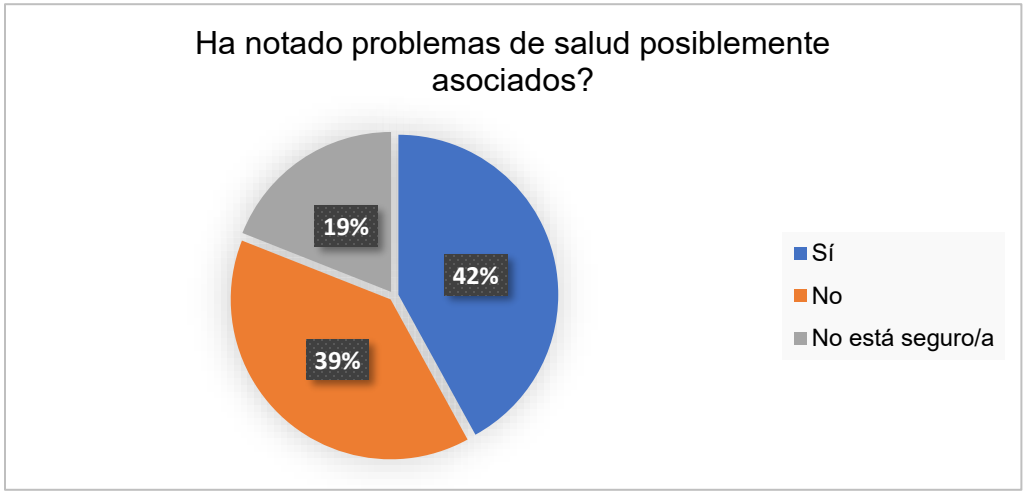


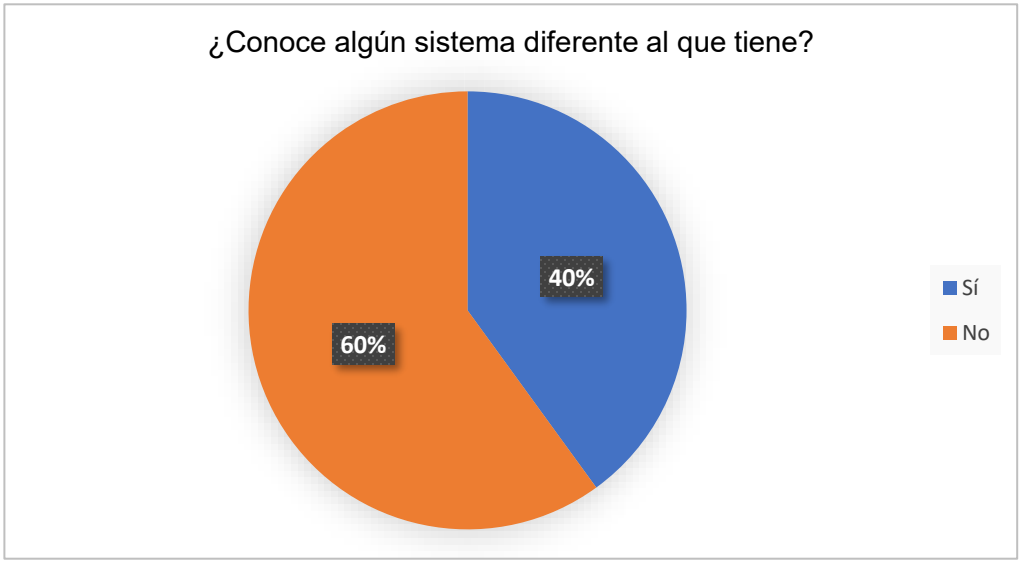

Tipo de sistema
4%
5%
49%
42%
Baño conectado a alcantarillado
Letrina
Fosa séptica
Otro (biodigestor, pozo negro)


Lugar de desecho
5%
33%
45%
17%
Directamente al suelo
A ríos o cuerpos de agua
En una fosa o pozo
Otro (drenaje artesanal, canal)

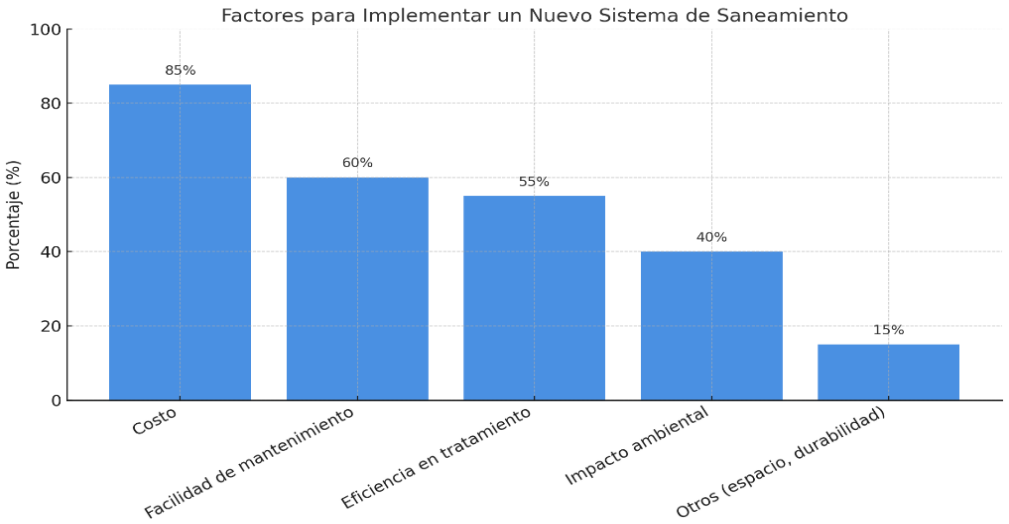

Está satisfechos con su sistema actual?
18%
31%
51%
Sí
No
No tiene sistema

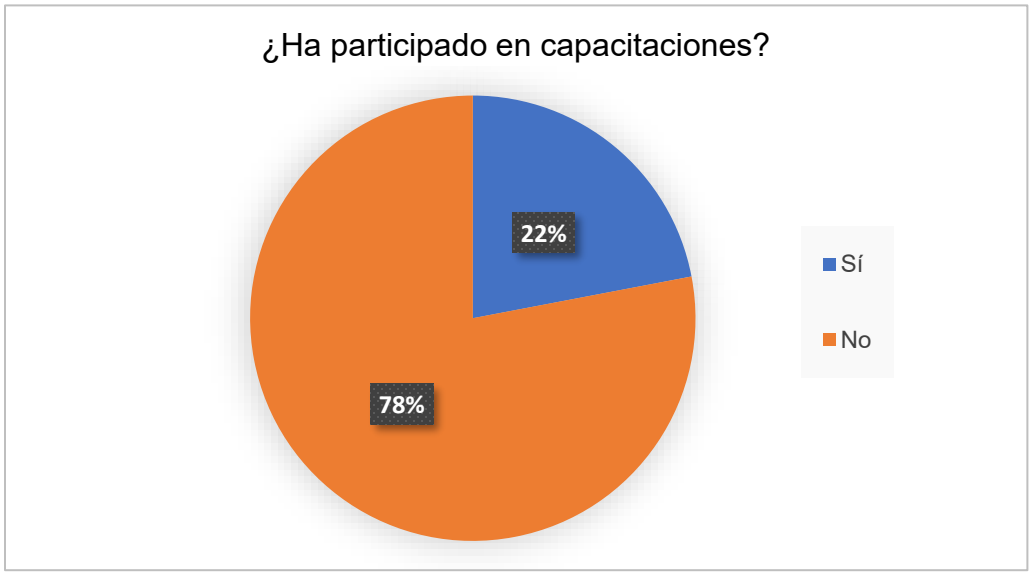

¿Considera importante tratar adecuadamente las aguas residuales?
7%
5%
88%
Sí
No
No sabe/No seguro

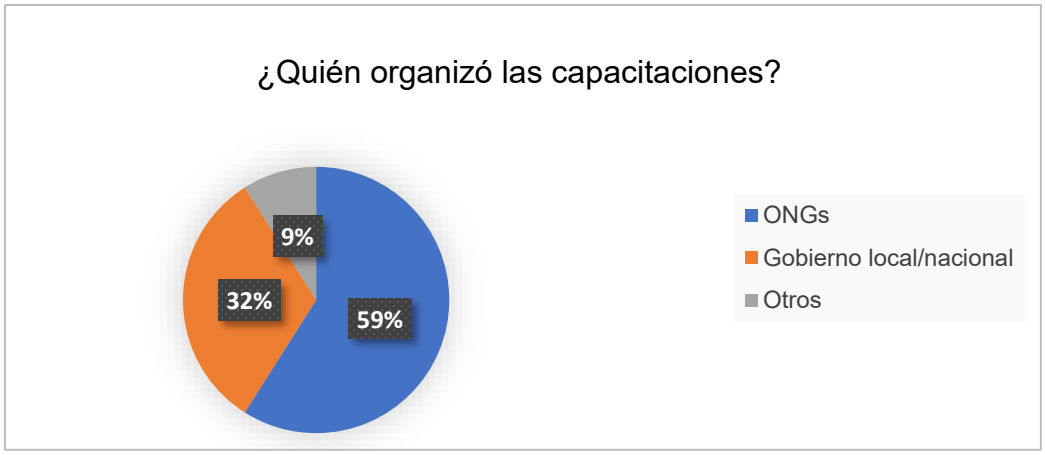

Ha notado problemas de salud posiblemente asociados?
19%
42%
39%
Sí
No
No está seguro/a

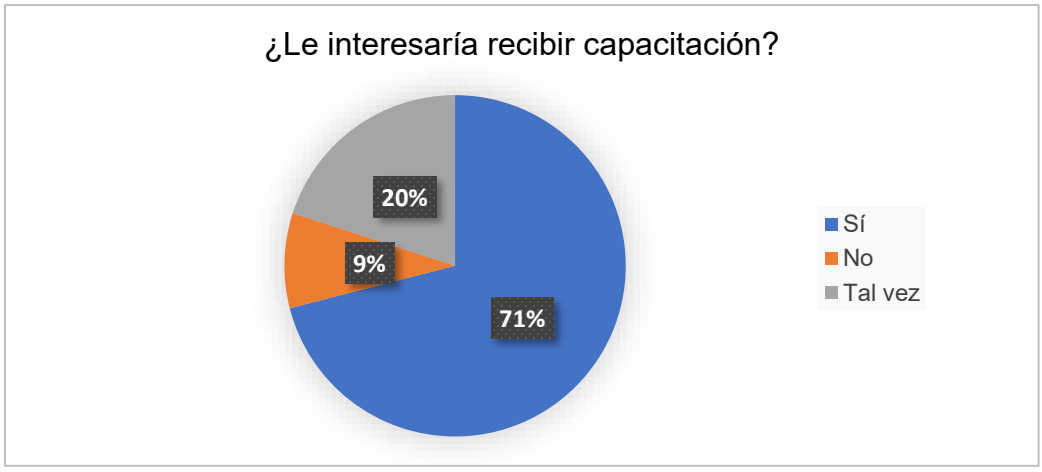

¿Conoce algún sistema diferente al que tiene?
40%
60%
Sí
No


¿Estaría dispuesto/a a mejorar su sistema si tuviera los recursos?
20%
15%
65%
Sí
No
Tal vez


Factores para Implementar un Nuevo Sistema de Saneamiento
Porcentaje (%)
100
80
60
40
20
0
85%
60%
55%
40%
15%
Costo
Facilidad de mantenimiento
Eficiencia en tratamiento
Impacto ambiental
Otros (espacio, durabilidad)


¿Ha participado en capacitaciones?
22%
78%
Sí
No


¿Quién organizó las capacitaciones?
9%
32%
59%
ONGs
Gobierno local/nacional
Otros


¿Le interesaría recibir capacitación?
20%
9%
71%
Sí
No
Tal vez

Anexo III.

Tabla 15. Valores típicos de la composición de aguas residuales domésticas y porcentajes de remoción

Todas las unidades en mg/L menos los sólidos sedimentales.

	CONCENTRACION		
CONSTITUYENTE	**FUERTE**	**MEDIA**	**DEBIL**
SÓLIDOS TOTALES	1200	720	350
Disueltos SD	850	500	250
SD fijos SDF	525	300	145
SD volátiles SDV	325	200	105
En suspensión SS	350	220	100
SS fijos SSF	75	55	20
SS volátiles SSV	275	165	80
SÓLIDOS SEDIMENTABLES ml/L	20	10	5
DBO5	400	220	110
COT	290	160	80
DQO	1000	500	250
NITROGENO (Total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
FOSFORO (Total como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
CLORUROS	100	50	30
ALCALINIDAD (como Co3Ca)	200	100	50
GRASA	150	100	50

Anexo IV

Costos de implementación, operación y mantenimiento

Tabla 16. Costos totales de la fosa séptica

FOSA SEPTICA DE DOS CAMARAS				
Descripción	**U/M**	**Cantidad**	**C. Unidad**	**C. Total**
PRELIMINARES				
Trazo y Nivelación	M²	4.80	100	480.42
MOVIMIENTO DE TIERRA				
Excavación estructural para fosa séptica y tubería de infiltración	M³	8.06	450	3,627.27
Relleno y Compactación de Material excavado in situ, incluye compactación, con compactadora manual (Brinquina).	M³	1.88	250	470.09
Desalojo de material sobrante.	M³	6.18	450	2,781.12
ACERO ESTRUCTURAL				
Suministro de Material y Mano de Obra de Acero # 3 Estándar (varilla 3/8")	KG	140.00	100	14,000.00
Suministro de Material y Mano de Obra de Acero # 2 Estándar (varilla 1/4")	KG	3.37	71.34	240.20
Suministro de Material y Mano de Obra de Alambre de amarre #18	KG	14.00	130	1,820.00
CONCRETO ESTRUCTURAL				
Suministro de material y mano de obra para Encofrado y Desencofrado	M²	24.14	1200	28,966.56
Suministro de material para elaboración de concreto de 3,000 PSI para fundir plataforma inferior, rellenar huecos de bloques con refuerzo de acero # 3, llena de tapa y viga corona.	M³	4.14	10,500.00	43,470.00
MAMPOSTERIA DE BLOQUES				
Suministro de Material y Mano de Obra para Elaboración de Paredes de Mampostería de Bloque hueco de 6" x 8" x 16"	M²	20.28	1300	26,363.61
ACAVADOS INTERNO EN FOSA				
Acabado interno de repello y fino pizarra	M²	20.28	500	10,139.85
Agregado grueso y mediano (Piedra Bolón) Suministro y Colocaciòn.	M³	0.48	800	381.79
Agregado GRAVA DE 1/2 (Piedrin) suministro y colocaciòn	M³	0.48	300	144.00
Suministro de arena y colocación	M³	0.83	800	662.40
MATERIALES CONDUCTORES				
Tubería de Infiltración de Ø 4" sdr 41 Incluye excavación e instalación.	ML	3.00	400	1,200.00
Tubería sanitaria de 4" sdr 41 incluye excavacion e instalacion	ML	4.00	400	1,600.00
Tubería sanitaria de 2"sdr 41 Incluye excavación e instalación.	ML	2.00	200	400.00
Respiradero de Ø 2" con su tee en la parte superior	ML	1.50	150	225.00
COMPLEMENTO DE FILTRACION				
Pozo de absorcion de 1.50*2.17 Incluye excavación, construccion e instalación.	UNIDAD	1.00	49,823.70	49,823.70
LIMPIEZA FINAL Y ENTREGA				
Limpieza Final y Entrega Final	Global	1.00	6,000.00	6,000.00
a.- TOTAL COSTO DIRECTO				**C$ 192,796.01**
b.- TOTAL COSTO INDIRECTO (7 % sobre a)				**C$ 13,495.72**
c.- ADMINISTRACION (10% sobre a+b)				**C$ 20,629.17**
d.- UTILIDADES (10% sobre a+b+c)				**C$ 22,692.09**
e.- SUB-TOTAL (a+b+c+d)				**C$ 249,612.99**
f.- I.V.A. (15 % sobre e) NO TENGO LA OBLIGACION DEL IVA				**C$ 37,441.95**
PRECIO TOTAL DE LA OFERTA (e+f)				**C$ 287,054.94**
PRESIO TOTAL EN DOLARES				**$ 7,864.52**

Tabla 17. Costos totales del FAFA

Filtro Biologico				
Descripción	**U/M**	**Cantidad**	**C. Unidad**	**C. Total**
PRELIMINARES				
Trazo y Nivelación	M²	3.41	100	341.00
MOVIMIENTO DE TIERRA				
Excavación estructural para fosa séptica y tubería de infiltración	M³	4.42	450	1,989.00
Relleno y Compactación de Material excavado in situ, incluye compactación, con compactadora manual (Brinquina).	M³	1.03	250	257.50
Desalojo de material sobrante.	M³	3.39	450	1,525.50
ACERO ESTRUCTURAL				
Suministro de Material y Mano de Obra de Acero # 3 Estándar (varilla 3/8")	KG	51.64	100	5,164.00
Suministro de Material y Mano de Obra de Acero # 2 Estándar (varilla 1/4")	KG	13.57	71.34	968.08
Suministro de Material y Mano de Obra de Alambre de amarre #18	KG	10.00	130	1,300.00
CONCRETO ESTRUCTURAL				
Suministro de material y mano de obra para Encofrado y Desencofrado	M²	10.04	1200	12,048.64
Suministro de material para elaboración de concreto de 3,000 PSI para fundir plataforma inferior, rellenar huecos de bloques con refuerzo de acero # 3, llena de tapa y viga corona.	M³	4.20	10,500.00	44,100.00
MAMPOSTERIA DE BLOQUES				
Suministro de Material y Mano de Obra para Elaboración de Paredes de Mampostería de Bloque hueco de 6" x 8" x 16"	M²	10.03	1300	13,039.00
ACAVADOS INTERNO EN FOSA				
Acabado interno de repello y fino pizarra	M²	10.03	500	5,015.00
MATERIALES FILTRANTES				
Suministro y colocación de Parilla de 3/8´´ para mantener filtro al centro.	kg	6.68	520	3473.60
Agregado grueso y mediano (Piedra Bolón) Suministro y Colocaciòn.	M³	0.27	800	216.00
Suministro y Colocaciòn de Grava 3 1/4"	M³	0.03	650	17.70
Suministro y Colocaciòn de Piedra de río	M³	0.03	600	16.34
Suministro y Colocaciòn de Grava 1"	M³	0.03	650	17.70
Suministro de arenon y colocación	M³	0.27	400	108.00
Pozo de absorcion de 1.50*2.17 Incluye excavación, construccion e instalación.	UNIDAD	1.00	49,823.70	49,823.70
MATERIALES CONDUCTORES				
Tubería de Infiltración de Ø 4" sdr 41 Incluye excavación e instalación.	ML	3.00	400	1,200.00
Tubería sanitaria de 4" sdr 41 incluye excavacion e instalacion	ML	2.00	400	800.00
Tubería sanitaria de 2"sdr 41 Incluye excavación e instalación.	ML	3.00	200	600.00
Respiradero de Ø 2" con su tee en la parte superior	ML	2.50	150	375.00
LIMPIEZA FINAL Y ENTREGA				
Limpieza Final y Entrega Final	Global	1.00	6,000.00	6,000.00
a.- TOTAL COSTO DIRECTO				**C$ 148,395.78**
b.- TOTAL COSTO INDIRECTO (7 % sobre a)				**C$ 10,387.70**
c.- ADMINISTRACION (10% sobre a+b)				**C$ 15,878.35**
d.- UTILIDADES (10% sobre a+b+c)				**C$ 17,466.18**
e.- SUB-TOTAL (a+b+c+d)				**C$ 192,128.01**
f.- I.V.A. (15 % sobre e)				**C$ 28,819.20**
PRECIO TOTAL DE LA OFERTA (e+f)				**C$ 220,947.21**
PRESIO TOTAL EN DOLARES				**$ 6,053.35**

Tabla 18. Costos totales del biodigestor

Biodigestor				
Descripción	**U/M**	**Cantidad**	**C. Unidad**	**C. Total**
PRELIMINARES				
Trazo y Nivelación	M²	5.29	100	529.00
MOVIMIENTO DE TIERRA				
Excavación estructural para fosa séptica y tubería de infiltración	M³	8.59	450	3,866.31
Relleno y Compactación de Material excavado in situ, incluye compactación, con compactadora manual (Bringuina).	M³	1.71	250	428.40
Desalojo de material sobrante.	M³	6.88	450	3,095.19
ACERO ESTRUCTURAL				
Suministro de Material y Mano de Obra de Acero # 3 Estándar (varilla 3/8")	KG	22.66	100	2,265.76
Suministro de Material y Mano de Obra de Acero # 2 Estándar (varilla 1/4")	KG	9.52	71.34	679.16
Suministro de Material y Mano de Obra de Alambre de amarre #18	KG	0.48	130	62.75
CONCRETO ESTRUCTURAL				
Suministro de material y mano de obra para Encofrado y Desencofrado	M²	19.07	1200	22,888.80
Suministro de material para elaboración de concreto de 3,000 PSI para fundir plataforma inferior, rellenar huecos de bloques con refuerzo de acero # 3, llena de tapa y viga corona.	M³	0.39	10,500.00	4,084.50
MAMPOSTERIA DE BLOQUES				
Suministro de Material y Mano de Obra para Elaboración de Paredes de Mampostería de Bloque hueco de 6" x 8" x 16"	M²	16.18	1300	21,039.20
ACAVADOS INTERNO EN FOSA				
Acabado interno de repello y fino pizarra	M²	16.18	500	8,092.00
Suministro de arenon y colocación	M³	0.58	400	231.20
UNIDAD DE TRATAMIENTO				
Biodigestor RP-7000LT	UNIDAD	1.00	153050	153050.00
COMPLEMENTO DE FILTRACION				
cajas de registro de lodos	UNIDAD	1.00	3,000	3,000
Pozo de absorcion de 1.50*2.17 Incluye excavación, construccion e instalación.	UNIDAD	1.00	49,823.70	49,823.70
MATERIALES CONDUCTORES				
Tubería de Infiltración de Ø 4" sdr 41 Incluye excavación e instalación.	ML	3.00	400	1,200.00
Tubería sanitaria de 4" sdr 41 incluye excavacion e instalacion	ML	2.00	400	800.00
Tubería sanitaria de 2"sdr 41 Incluye excavación e instalación.	ML	3.00	200	600.00
Respiradero de Ø 2" con su tee en la parte superior	ML	2.50	150	375.00
LIMPIEZA FINAL Y ENTREGA				
Limpieza Final y Entrega Final	Global	1.00	6,000.00	6,000.00
a.- TOTAL COSTO DIRECTO				**C$ 282,110.97**
b.- TOTAL COSTO INDIRECTO (7 % sobre a)				**C$ 19,747.77**
c.- ADMINISTRACION (10% sobre a+b)				**C$ 30,185.87**
d.- UTILIDADES (10% sobre a+b+c)				**C$ 33,204.46**
e.- SUB-TOTAL (a+b+c+d)				**C$ 365,249.07**
f.- I.V.A. (15 % sobre e)				**C$ 54,787.36**
PRECIO TOTAL DE LA OFERTA (e+f)				**C$ 420,036.43**
PRESIO TOTAL EN DOLARES				**$ 11,507.85**

Tabla 19. Costos totales del sistema combinado

Sist. Combinado			
Dimensiones de la Septica			
Ancho	B		0.97
Largo	L		2.46
Profundidad neta	Ht		2.59
Precio total		**C$**	**143,000.30**
Geometría del Filtro			
Diámetro del Filtro	D		1.37
Altura Total	H		2.35
Precio total		**C$**	**98,572.07**
Pozo de absorcion			
Diámetro del Pozo	D		1.50
Profundidad total	H_{Total}		2.20
Precio total		**C$**	**49,823.70**
a.- TOTAL COSTO DIRECTO		**C$**	**291,396.07**
b.- TOTAL COSTO INDIRECTO (7 % sobre a)		**C$**	**20,397.73**
c.- ADMINISTRACION (5% sobre a+b)		**C$**	**15,589.69**
d.- UTILIDADES (8% sobre a+b+c)		**C$**	**26,190.68**
e.- SUB-TOTAL (a+b+c+d)		**C$**	**353,574.17**
f.- I.V.A. (15 % sobre e)		**C$**	**53,036.13**
PRECIO TOTAL DE LA OFERTA (e+f)		**C$**	**406,610.29**
Precio total de la obra en dolares		**$**	**11,140.01**

Los datos correspondientes a los precios desglosados pueden ser corroborados en hojas separadas, donde se especifica detalladamente cada uno de los componentes y costos asociados. Esta organización permite una presentación clara del total.

Anexo V.

Evaluación del impacto ambiental

5.1. Línea base del área de estudio

El proyecto se llevará a cabo en Teustepe, Boaco. Es una zona caracterizada por sus altitudes que oscilan entre los 150 y 600 metros sobre el nivel del mar, uno de su sistema de drenaje incluye el rio Malacatoya.

El clima es Sabana Tropical Seca con una estación lluviosa entre los meses de mayo a octubre y una estación seca que abarca de noviembre a abril, estas estaciones marcadas influyen en la capacidad de infiltración del suelo, la temperatura media anual esta entre los 25 C y 28 C, con una precipitación promedio anual ubicada entre los 1200 y 1500 mm. Sus suelos son clasificados como arcillosos, franco arcillosos y arenosos en su mayoría lo que también influye en la capacidad de infiltración del mismo.

Se identifican pozos artesanales que abastecen de agua a las comunidades para consumo humano y uso agrícola, este recurso puede verse contaminado por las construcciones de letrinas ya que el 80% de la población rural lo usan. Otros recursos que se usan como abastecimiento de agua son ríos y manantiales.

La población local se dedica fundamentalmente a la agricultura de subsistencia, producción pecuaria y en menor medida al comercio. Las comunidades rurales presentan acceso limitado a servicios básicos como agua potable, energía eléctrica, salud y educación. La infraestructura es básica, y las condiciones de vida están influenciadas por factores climáticos y económicos.

5.2. Descripción del proyecto

El proyecto abarca el diseño de 4 sistemas de tratamiento de aguas residuales domesticas para viviendas unifamiliares de 8 personas en zonas rurales y periurbanas que no cuentan con conexión a servicios de aguas negras y optan por construcciones de sumideros y/o letrinas lo que perjudican al medio ambiente y la salud de los habitantes cercanos.

En común estos sistemas de tratamiento tienen un proceso de desinfección con hipoclorito de sodio y un pozo de absorción, diseñados con capacidad suficiente para que funcione óptimamente.

Fosa séptica + Pozo de Absorción

Objetivo: Tratamiento de aguas residuales domesticas a través de procesos físicos (sedimentación), químicos (rompimiento de compuestos orgánicos) y microbiológico (descomposición anaerobia).

Capacidad: Comprende un volumen de 1.61 m^3 con un periodo de retención de 16.5 horas (0.69 día).

Funcionamiento: Se lleva a cabo en tres etapas: física, química y biológica. Primero, los residuos líquidos y sólidos llegan a la primera cámara, donde los sólidos pesados se sedimentan y las grasas flotan en la superficie. El agua parcialmente tratada pasa a la segunda cámara, donde continúan la sedimentación y los procesos de digestión anaerobia, reduciendo la carga orgánica.

Filtro anaerobio de flujo ascendente + Pozo de absorción

El sistema consta de la construcción de un filtro anaerobio de flujo ascendente o mejor conocido como FAFA, seguido de una etapa de desinfección por cloración y una última etapa que abarca la construcción de un pozo de absorción para el tratamiento de aguas residuales domesticas (aguas negras y grises) generadas por una vivienda rural o periurbana de 8 habitantes.

Objetivo: Tratamiento de aguas residuales domesticas a través de procesos físicos, químicos y microbiológicos.

Capacidad: Comprende un volumen de 1.90 m^3 con un periodo de retención de 22 horas (0.92 día).

Funcionamiento: El agua ingresa desde abajo del filtro y pasa por materiales filtrantes como piedra de rio, grava y arena, dejando los sólidos por los poros del

filtro, mientras que las grasas flotan en la superficie, por último, el efluente sale de la parte superior del sistema hacia la segunda etapa.

Sistema combinado (fosa séptica + filtro anaerobio de flujo ascendente) + Pozo de absorción

Fosa Séptica

Objetivo: Tratamiento de aguas residuales domesticas a través de procesos físicos (sedimentación), químicos (rompimiento de compuestos orgánicos) y microbiológico (descomposición anaerobia).

Capacidad: Comprende un volumen de 1.87 m^3 con un periodo de retención de 24 horas (1 día).

Funcionamiento**:** Se lleva a cabo en tres etapas: física, química y biológica. Primero, los residuos líquidos y sólidos llegan a la primera cámara, donde los sólidos pesados se sedimentan y las grasas flotan en la superficie. El agua parcialmente tratada pasa a la segunda cámara, donde continúan la sedimentación y los procesos de digestión anaerobia, reduciendo la carga orgánica.

Filtro anaerobio de flujo ascendente

Objetivo: Tratamiento de aguas residuales domesticas a través de procesos físicos, químicos y microbiológicos.

Capacidad: Comprende un volumen de 1.90 m^3 con un periodo de retención de 22 horas (0.92 día).

Funcionamiento: El agua ingresa desde abajo del filtro y pasa por materiales filtrantes como piedra de rio, grava y arena, dejando los sólidos por los poros del filtro, mientras que las grasas flotan en la superficie, por último, el efluente sale de la parte superior del sistema hacia la segunda etapa.

Biodigestor anaerobio de flujo continuo + Pozo de absorción

Objetivo: Tratamiento de aguas residuales domesticas a través de procesos físicos, químicos y microbiológicos.

Capacidad: Comprende un volumen de 1.90 m^3 con un periodo de retención de 22 horas (0.92 día).

Funcionamiento: El agua ingresa desde abajo del filtro y pasa por materiales filtrantes como piedra de rio, grava y arena, dejando los sólidos por los poros del filtro, mientras que las grasas flotan en la superficie, por último, el efluente sale de la parte superior del sistema hacia la segunda etapa.

Pozo de Absorción

Objetivo: Disponer del efluente tratado por medio de infiltración en el suelo.

Capacidad: El suelo tiene una capacidad de infiltración de 0.12 m/día, en un área de 3.41 m^2.

Características: Se construirá con las especificaciones técnicas adecuadas siguiendo las normativas del país, asegurando que la infiltración se realice de forma segura, evitando contaminar los recursos hídricos cercanos.

5.3. Identificación de Impactos

Tabla 20. Impactos positivos y negativos

Factores	Impactos Positivos	Impactos Negativos
Fase de construcción	- Generación de empleos - Vegetación de otras áreas	- Al realizar la excavación y compactación del suelo al momento de la construcción se puede generar alteraciones de la biodiversidad del área. - Contaminación de ruido. - Emisión de polvo.
Fase de operación	- Se reduce la contaminación del suelo y las fuentes	- Generación de lodos, emisiones de gases.

	de aguas cercanas, obteniendo un ambiente más saludable. - Eliminar patógenos a través de la desinfección reduce el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua y cultivos. - Depuración parcial de aguas residuales y reducción de contaminantes directos. - Conciencia ambiental - Recuperación de recursos	- Si el pozo de absorción no tiene la capacidad adecuada o el suelo la infiltración necesaria podría haber riesgo de contaminación de aguas subterráneas. - Riesgo de escorrentía con sedimentos - Impactos relacionados con el manejo de productos químicos (Desinfección): Puede resultar en la liberación de sustancias toxicas al medio ambiente de no manejar correctamente el uso de cloro.
Fase de cierre		- Abandono de estructuras - Contaminación de aguas subterráneas - Enfermedades

5.4. Medidas de mitigación

- Evitar filtraciones al suelo sellando la fosa séptica correctamente, además, asegurar una adecuada capacidad de sedimentación y tratamiento.
- Realizar mantenimiento regular para prevenir obstrucciones y garantizar el funcionamiento eficiente del sistema.
- Uso controlado y monitoreado de cloro en la desinfección.
- Asegurar que el pozo de absorción se construya de acuerdo con las normativas locales de construcción y en un lugar adecuado para evitar la contaminación de fuentes de agua cercanas.
- Monitorear la capacidad de absorción y la salud del suelo regularmente para garantizar la efectividad del sistema a largo plazo.
- Manejo y disposición de lodos

5.5. Plan de Monitoreo

Tabla 21. Plan de monitoreo

Plan	Frecuencia	Responsable	Método
Volumen y acumulación de lodos	Cada 4 meses por un año para calcular el intervalo de remoción de lodos	Usuario	Inspección visual
Olores y presencia de plagas	Cada 4 meses	Usuario y comunidad	Evaluación visual y olfativa
Calidad del efluente	Anual	Autoridad de salud, usuario	Muestra de agua
Remoción de lodos	Anual	Personal capacitado	Inspección visual

Nota: Elaboración Propia

5.6. Plan de emergencia

- Fugas: Sellado inmediato con mezcla de cemento o tierra compactada

- Obstrucción: Uso de destapador,
- Desbordamiento: Suspensión temporal del uso y revisión de infiltración

5.7. Beneficios potenciales

Tabla 22. Beneficios potenciales

Beneficios Sociales	**Beneficios económicos**
- Mejora en la salud pública: Reducción de riesgos asociados con aguas residuales sin tratar, se reduce la propagación de enfermedades. - Educación ambiental: Los habitantes de la vivienda y la comunidad local serán informados sobre los beneficios del tratamiento adecuado de aguas residuales y las prácticas sostenibles.	- Ahorros en costos de salud al reducir la exposición a enfermedades, se disminuyen los costos médicos relacionados con el tratamiento de enfermedades transmitidas por el agua. - Aumento del valor de la propiedad: La implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales adecuado puede mejorar la calidad de vida y en consecuencia el valor de la propiedad.

Nota: Elaboración Propia

5.8. Normativas y Estándares

- Ley General de Salud Ambiental (Ley No. 217)
- Normas del Ministerio de Salud (MINSA)
- Ley de Aguas Nacionales (Ley No. 620)
- Organización Mundial de la Salud (OMS)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)
- Normas de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)