



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**Evaluación de un biofiltro anaeróbico como tratamiento secundario de aguas
residuales urbanas para una planta de tratamiento ubicada en Monteverde**

Informe de Proyecto Final de Graduación presentado a la Facultad de Ingeniería como
requisito para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Agrícola y de
Biosistemas.

Junior Enrique Jiménez Quesada

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2021

Sometido a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica como requisito para optar por el grado académico de:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS.



Junior Enrique Jiménez Quesada
Postulante



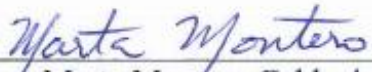
Ing. Mauricio Bustamante Román, Ph.D.
Director Proyecto Final de Graduación



Ing. Juan Pablo Rojas Sossa, M.Sc.
Comité asesor



Ing. Ronald Aguilar Álvarez, Ph.D.
Comité Asesor



Ing. Marta Montero Calderón, Ph.D.
Miembro Tribunal Examinador



Ing. Juan Benavides Valverde, Dr.
Miembro Tribunal Examinador

DEDICATORIA

A mi familia.

En especial a mi madre por trabajar tan fuerte.

Me dieron el apoyo que necesité durante toda la carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios por darme un espacio en la Universidad de Costa Rica y ayudarme a alcanzar esta meta personal.

A la Escuela de Ingeniería de Biosistemas por facilitarme los materiales y laboratorios para las pruebas del proyecto.

A Mauricio Bustamante Román, director del proyecto, por el seguimiento continuo del avance y consejos oportunos.

A Ronald Aguilar Álvarez y Juan Pablo Rojas, lectores del proyecto.

A Ensio Pérez, técnico del taller de Ingeniería de Biosistemas por capacitarme en el uso de los equipos.

A Mainor Jesús Quirós Sandí, vecino y amigo que me colaboró con el acarreo de las aguas residuales durante varios meses.

A cada una de las personas especiales que conocí en este camino de preparación profesional.

Al sistema de becas de la Universidad de Costa Rica, por darme las herramientas necesarias para mantenerme estudiando desde el día 1.

RESUMEN

En Costa Rica, para el año 2019, solo el 15% de las aguas residuales ordinarias fueron captadas por un sistema de alcantarillado sanitario para un debido tratamiento. Si bien la mayor parte del porcentaje restante utiliza algún tipo de tratamiento local, estos no siempre son suficientes. Dado el crecimiento poblacional de zonas rurales debido al desarrollo de localidades turísticas; en los últimos años se tiene un aumento en los volúmenes de aguas residuales generados. Ante esto, es importante el estudio de la adaptación de tecnologías no convencionales de operación y mantenimiento sencillo que faciliten su integración en la ciudadanía para enfrentar la problemática mencionada.

Los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) son sistemas compactos de tratamiento biológico de aguas residuales con bajo consumo energético y alta eficiencia de remoción de materia orgánica, por esto, darlo a conocer es importante y se convierte en el tema central de la presente investigación. El presente proyecto consta del diseño de un FAFA para el tratamiento secundario de las aguas residuales generadas en una serie de poblados del cantón de Monteverde de Puntarenas, para un periodo de operación de 25 años. Para la toma de decisiones operativas y detalles de componentes del FAFA, se ensambló un prototipo a escala en el que se compararon los rendimientos bajo escenarios controlados con variaciones en los tiempos de retención hidráulicos (TRH) y en los materiales de soporte de capa fija con el fin de determinar las combinaciones que ofrezcan mayor eficiencia en la depuración de las aguas residuales.

Se obtiene que el TRH es el parámetro de diseño más influyente en el rendimiento del filtro, al mantenerlo en el rango de 0,5 a 1 día con un material de capa fija plástica el FAFA ofrece reducciones del 88% en la demanda biológica de oxígeno (DBO), 89% en la demanda química de oxígeno (DQO) y superiores al 70% en sólidos volátiles. Se concluye que, para la generación de aguas residuales de la zona de estudio es necesaria la construcción de un filtro de 1665 m³ compuesto de 4 cámaras independientes de 5 m de alto, iniciando sus operaciones al 75% de la capacidad durante los primeros 10 años de acuerdo con el periodo de arranque establecido.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación.....	4
1.2. Alcance del proyecto.....	5
1.3. Objetivos del proyecto	7
1.3.1. Objetivo General	7
1.3.2. Objetivos Específicos	7
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Composición de las aguas residuales	8
2.1.1. Características físicas de las aguas residuales	9
2.1.2. Características químicas	10
2.1.3. Características biológicas	13
2.2. Categorías de origen de aguas residuales en el cantón de Monteverde	14
2.3. Niveles de tratamiento de las aguas residuales	16
2.3.1. Etapa de pretratamiento	17
2.3.2. Tratamiento primario	17
2.3.3. Tratamiento secundario.....	18
2.3.4. Tratamiento terciario.....	18
2.4. Tratamiento secundario: Sistemas biológicos de tratamiento.....	18
2.4.1. Tratamientos aerobios.....	19
2.4.2. Tratamientos anaerobios	20
2.4.2.1. Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)	21

2.5.	Indicadores de contaminación de Costa Rica.....	27
2.6.	Avances de Costa Rica en temas de cobertura de saneamiento	29
3.	METODOLOGÍA.....	30
3.1.	Determinación de la variabilidad de generación de aguas residuales en la zona de estudio	30
3.2.	Diseño de un filtro anaeróbico a escala de laboratorio para el estudio de la variación de los tiempos de retención hidráulica para los caudales máximos y mínimos.....	32
3.3.	Estudio de medios filtrantes para la adhesión de comunidades microbianas.....	35
3.3.1.	Diseño experimental	36
3.4.	Estimación del potencial de bioquímico de metano de los sólidos generados.....	41
3.5.	Diseño del sistema FAFA para la zona de impacto en Monteverde	42
3.6.	Análisis de datos	43
4.	RESULTADOS	44
4.1.	Determinación de la variabilidad de generación de aguas residuales en la zona de estudio	44
4.1.1.	Delimitación de la zona de estudio	44
4.1.2.	Estimación del caudal de diseño	45
4.2.	Diseño de un filtro anaeróbico a escala de laboratorio para el estudio de la variación de los tiempos de retención hidráulica para los caudales máximos y mínimos.....	51
4.3.	Estudio de medios filtrantes para la adhesión de comunidades microbianas.....	53
4.3.1.	Caracterización del agua residual de entrada.....	55
4.3.2.	Sólidos volátiles como criterio de selección.....	56
4.3.3.	Calidad de las aguas de efluente	60
4.4.	Estimación del potencial de bioquímico de metano de los sólidos generados.....	65

4.4.1.	Potencial bioquímico de metano (BMP).....	65
4.5.	Diseño del sistema FAFA para la zona de impacto en Monteverde	67
4.5.1.	Cálculo de capacidad del filtro	67
4.5.2.	Estructuras de entrada y salida.....	69
4.5.3.	Desempeño del FAFA propuesto.....	72
4.5.4.	Plan de operación.....	72
4.5.5.	Plan de mantenimiento.....	73
5.	CONCLUSIONES.....	75
5.1.	Determinación de la variabilidad de generación de aguas residuales en la zona de estudio	75
5.2.	Diseño de un filtro anaeróbico a escala de laboratorio para el estudio de la variación de los tiempos de retención hidráulica para los caudales máximos y mínimos.....	75
5.3.	Estudio de medios filtrantes para la adhesión de comunidades microbianas.....	75
5.4.	Estimación del potencial de bioquímico de metano de los sólidos generados.....	76
5.5.	Diseño del sistema FAFA para la zona de impacto en Monteverde	76
6.	RECOMENDACIONES	77
7.	BIBLIOGRAFÍA	78
8.	ANEXOS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Promedio de consumo anual de agua potable por categoría para los años del 2016 al 2020 de la ASADA de Santa Elena de Monteverde, Puntarenas.....	14
Figura 2. Etapas del tratamiento de las aguas residuales.....	17
Figura 3. Diagrama de proceso biológico aerobio.....	19
Figura 4. Equivalencia de biogás con otras fuentes de energía.....	26
Figura 5. Esquema de funcionamiento del filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)...	33
Figura 6. Concepto preliminar del modelo a escala para la construcción del prototipo.....	34
Figura 7. Esquema general de funcionamiento de contador de biogás utilizado en el modelo a escala.....	35
Figura 8. Material de lecho fijo del interior de los filtros: a) soportes plásticos y b) piedra pómez.....	36
Figura 9. Esquema de operación de los filtros a escala de laboratorio para la sección experimental.....	38
Figura 10. Ensamble de ensayo BMP con incubadora, a) almacenaje de las muestras, b) control de temperatura en baño maría.....	42
Figura 11. Delimitación del área de influencia del acueducto del Cantón de Monteverde (DM), incluyendo los límites del Cantón Municipal y los límites de la Zona de Estudio...	44
Figura 12. Distribución anual relativa de la población turística en Monteverde basado en datos de visitación de la Reserva de Monteverde entre el 2014 y 2016 y datos de consumo de agua potable del sector comercial para el año 2016.....	46
Figura 13. Ajuste de línea de tendencia logarítmica en datos de consumo del sector comercial.....	48
Figura 14. Prototipo construido para el diseño experimental. En a) vista general del sistema y b) acercamiento que visualiza tubería del efluente.....	52
Figura 15. Contador de biogás por desplazamiento en su máxima capacidad de lectura (500 mL).....	53

Figura 16. Sostén del material de capa fija en el interior de cada filtro. A la izquierda mezcla plástica de filtro 1, a la derecha piedra pómez de filtro 2.....	54
Figura 17. Comparación visual de material de capa fija al inicio y fin de la sección experimental.....	59
Figura 18. Producción de biogás acumulada en mezcla de lodos con inóculo y muestra de control	66
Figura 19. Fluctuaciones en los tiempos de retención hidráulico sobre diseño con capacidad volumétrica aumentada.....	68
Figura 20. Vista general de propuesta de FAFA para la ASADA de Santa Elena de Monteverde	69
Figura 21. Distribución de entrada de afluente por ramal de tuberías ubicadas en la parte inferior del filtro.....	71
Figura 22. Prueba formal de normalidad Shapiro-Wilks para las muestras de afluente de las aguas residuales.	87
Figura 23. Histograma de los residuos para determinar si los datos son asimétricos en una muestra de afluente de las aguas residuales.....	87
Figura 24. Distribución de los residuos de la media de afluente de las aguas residuales....	88
Figura 25. Vista de planta de las cámaras del FAFA propuesto.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Consumo promedio de agua potable (m^3 /mes) por categoría de usuario para los años del 2016 al 2020 con el valor de lectura máximo y mínimo reportado por la ASADA ^a	16
Tabla 2. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor ^a	28
Tabla 3. Caudales de aguas residuales generadas para el año de toma de datos (2018) y los esperados para el 2043 contemplando el aumento de población	45
Tabla 4. Cálculo de caudales de consumo y de generación de aguas residuales del sector comercial durante el 2018 y su proyección al 2043.....	48
Tabla 5. Caudal de consumo promedio y máximo de las categorías Preferencial y de Gobierno para el cálculo de aguas residuales esperadas para el periodo de diseño	49
Tabla 6. Resumen de caudales promedio diarios de aguas residuales generados por categoría para el 2018 y 2043 en la zona de Monteverde de Puntarenas	50
Tabla 7. Caudal de trabajo en función de los cambios en los tiempos de retención hidráulicos utilizados en los filtros de 6,08 L de capacidad	51
Tabla 8. Características físicas de los medios de soporte de capa fija.....	55
Tabla 9. Caracterización del afluente de origen animal utilizado en la sección experimental y afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la facultad de odontología ^a .56	56
Tabla 10. Reducción de sólidos volátiles en el proceso de depuración ^a	57
Tabla 11. Pruebas de calidad de aguas para de experimento 1	61
Tabla 12. Características fisicoquímicas de las aguas residuales de entrada y salida para el TRH de 0,5 d del experimento 2.....	63
Tabla 13. Volumen mínimo requerido del FAFA propuesto para el caso de estudio.....	67
Tabla 14. Condiciones de operación proyectada para el 2028 con el uso del 75 y 100% de capacidad del FAFA diseñado	73

1. INTRODUCCIÓN

Una de las situaciones que ha aumentado la problemática con el manejo de las aguas residuales a nivel mundial; es el rápido incremento de la población, misma que será uno de los principales impulsores de la gestión de los recursos hídricos durante los próximos años. Por mucho tiempo, el impacto de este crecimiento poblacional se ha considerado como uno de los más grandes desafíos para la coexistencia tanto de las metas ambientales, económicas y sociales, como para la creación de un futuro sostenible, modificando la forma en que se administran los recursos naturales y se invierte en proyectos ambientalmente amigables (1).

Desde la industrialización ha existido un incremento en la contaminación y el desperdicio del agua; en lugares donde el recurso es abundante no se percibe la necesidad, pero en lugares donde el agua es escasa, la supervivencia depende del manejo que se le dé a este recurso. Estas diferencias tan radicales marcan la importancia y función del agua en la sociedad de un lugar a otro (2).

En cuanto a las aguas residuales de origen doméstico, estas consisten de aguas con sólidos disueltos y sólidos en suspensión; que de acuerdo con su procedencia y composición pueden clasificarse como aguas negras o aguas grises (2). Las primeras son aquellas que han sido generadas en inodoros y orinales, cuentan con altos niveles de materia orgánica y potencial de transmisión de parásitos (1), las segundas; las aguas grises, tienen origen en actividades de preparación de alimentos, limpieza de utensilios, ropa e higiene personal. Las aguas grises pueden ser usadas directamente en riego de plantas o reciclada en el uso de inodoros, donde se transforma en aguas negras (3). La composición de las aguas negras incluye sólidos que son la fracción más pequeña (menos del 0,1% en peso), pero representan el mayor problema a nivel de tratamiento (4).

Existen técnicas para el tratamiento de las aguas residuales que buscan mitigar, en la medida de lo posible, la contaminación que ha sufrido este recurso después de ser utilizado en las diferentes actividades. Estas técnicas dan como resultado la eliminación de

microorganismos patógenos, evitando así que estos microorganismos lleguen a ríos u otras fuentes de abastecimiento.

El tratamiento biológico de las aguas residuales (TBAR) es una técnica que consiste en la eliminación de contaminantes mediante la actividad de microorganismos seleccionados para consumir la materia orgánica presente en el agua residual. De esta manera se removerán sustancias orgánicas biodegradables, partículas coloidales y contaminantes disueltos, entre otros, convirtiéndolos en gases y en biomasa (nuevas células), separable por sedimentación y que generalmente se conocen como lodos. En las plantas de tratamiento, estos fenómenos se dan en reactores que mantienen los microorganismos bajo condiciones controladas, acelerando así el proceso de descomposición y la neutralización de la materia orgánica presente en el agua residual. En estos procesos se presentan múltiples reacciones de tipo bioquímico que transforman la materia orgánica, los nutrientes y otros compuestos en elementos más simples y de mayor estabilidad; conocido como oxidación biológica (5).

Costa Rica, en temas ambientales, ha logrado el reconocimiento internacional por ser un país comprometido con la implementación de tecnologías de generación de energía renovable. Alcanza a formalizar políticas nacionales con las que se declara el acceso al agua potable como un derecho básico e irrenunciable (6), convirtiéndose en una oportunidad para mantener la cobertura del país de manera equitativa y accesible en todo el territorio (rural y urbano) consiguiendo coberturas mayores al 92% de la población con acceso a agua de calidad potable (7). Estos valores fortalecen el concepto de sostenibilidad de recursos, lo cual es de resaltar, sin embargo, como país ha presentado rezago en el tratamiento efectivo de las aguas residuales, donde la gran mayoría de la población cuenta con sistemas convencionales de tratamiento ineficiente o incluso vertidas a los ríos o mares con nulo tratamiento. La buena participación que ha tenido el país en algunos temas ambientales; le concede la necesidad de enfocarse en nuevas metas de beneficio ambiental, como lo es el manejo adecuado de las aguas residuales.

Ante este panorama, Costa Rica incorpora los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, que plantean, entre otras cosas, garantizar que las aguas residuales no afecten el medio ambiente gracias al uso de sistemas de tratamiento individuales o colectivos apropiados. Esta política busca ir más allá de considerar que un tanque séptico con drenaje es un sistema de manejo seguro, pues se pretende incrementar las coberturas de alcantarillado sanitario de las zonas urbanas y definir soluciones apropiadas en las zonas rurales, donde no siempre es viable utilizar tanques sépticos (8).

Para el año 2019, según uno de los informes de saneamiento de aguas residuales de la V Conferencia Latinoamericana de Saneamiento, solo el 15% de las aguas residuales ordinarias son captadas por un sistema de alcantarillado sanitario y tratado en una planta de tratamiento a nivel nacional, mientras que el 70% de la población continúa utilizando tanques sépticos; tecnología inapropiada para ciudades densas, zonas costeras o localidades sin el respectivo estudio de suelos que aseguren su funcionamiento sin dañar cuerpos de agua naturales, esto evidencia que en comparación con otros países, Costa Rica tiene una baja cobertura (9).

La implementación de variados proyectos de tratamiento de aguas residuales, que permitan mejorar los índices de saneamiento nacional, obliga a desarrollar nuevas tecnologías más eficientes, de fácil construcción y aceptación, que se ajusten más fácilmente a las capacidades económicas de las distintas instituciones involucradas en este campo. Entre estos, se deben incluir sistemas capaces de amortiguar cambios en los volúmenes de generación de aguas residuales de modo que se ajuste a localidades de variables concentraciones poblacionales, como lo son las zonas rurales con altos atractivos turísticos y en general, comunal residencial.

Desde la academia, la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica ha incursionado en la implementación de nuevas soluciones en temas ambientales, relacionados con el aprovechamiento energético de residuos biomásicos, producción de biogás a partir de residuos, evaluación de microorganismos como indicadores ambientales, entre otras, dando un claro ejemplo de compromiso e iniciativa

por incluir nuevas tecnologías con impacto positivo en el medio ambiente. Aunado a este esfuerzo, el presente proyecto busca favorecer dos líneas principales de acción que con su desarrollo busca impactar positivamente:

- a) Huella ambiental: Para reducir el impacto de la carga contaminante en las aguas de los ríos, referido a los beneficios ambientales que se lograrían realizando la intervención en aguas contaminadas que actualmente son depositadas en ríos y quebradas.
- b) Población beneficiada: Prácticas de manejo de aguas que aseguren un saneamiento del recurso hídrico para disminuir la posibilidad de contraer enfermedades por esta vía.

1.1. Justificación

La generación de mayor y más contaminada cantidad de aguas residuales, junto con un inadecuado manejo, está generando condiciones de total desequilibrio en cuerpos receptores naturales, generalmente quebradas y ríos. Esto conlleva a la generación en cadena de afectaciones ambientales, como agotamiento de recursos naturales disponibles, inestabilidad de desarrollo de fauna acuática, deterioro de paisajes, desbalance nutricional en cauces, malos olores y otros problemas que comprometen la salud de los ciudadanos.

Los países en desarrollo, en general se ubican en regiones de clima tropical y subtropical y son los que presentan las más bajas coberturas en recolección y tratamiento adecuado de aguas residuales domésticas, siendo las principales causas aspectos financieros, poca planificación y desconocimiento de tecnologías alternativas de bajo costo (10). Paralelo a esto, las zonas tropicales son atractivas para el turismo debido a la variedad de flora y fauna. Estas condiciones generan tasas variables de visitantes que han impulsado la construcción de proyectos habitacionales importantes que traen implícita la evolución de nuevos retos a tratar, como el aumento en la generación de desechos, aumento de la densidad de la población (11), aumento en la demanda de productos frescos en contraparte con una disminución del área efectiva destinada a su producción, y en conjunto son

algunas de las situaciones que de no manejarse estructuradamente llevará a un desequilibrio acelerado del ecosistema.

En consecuencia, durante los últimos años surgen iniciativas individuales y colectivas orientadas al beneficio ambiental, en el que se presentan soluciones de mejora ante estas problemáticas.

Esta investigación busca visibilizar el aporte de tecnologías de tratamiento biológico mediante el uso de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) adaptado a una zona en crecimiento turístico para la depuración de las aguas residuales urbanas a través de la propuesta de diseño de un sistema funcional ante un periodo de diseño de 25 años.

1.2. Alcance del proyecto

El uso de una tecnología de tratamiento anaerobia utilizando un reactor de tipo FAFA se debe a que se ha demostrado a través de distintas investigaciones, que los tratamientos biológicos de aguas residuales en general presentan mayores rendimientos con menores costos económicos de inversión, operación y mantenimiento. Los costos de inversión de los procesos biológicos son del orden de 5 a 20 veces menores que los procesos químicos, y los costos de operación son de 3 a 10 veces menores, convirtiéndolos en los más adecuados siempre que sea posible su aplicación (12). Dentro de las principales ventajas de selección de una tecnología de tratamiento biológico se pueden mencionar estabilidad en los rendimientos de depuración frente a rangos variables de concentraciones de carga orgánica que van desde 5 hasta 15 kg DQO m³/d¹ y cortos periodos de retención hidráulicos que reducen el área efectiva de construcción. Conocer y experimentar tecnologías de saneamiento que permitan ajustarse a las capacidades adquisitivas del público en general (residencia, municipios o industria) es fundamental para lograr solventar las necesidades futuras de responsabilidad.

¹ DQO: demanda química de oxígeno

El proceso de diseño del presente proyecto consistió en el estudio del comportamiento de generación de aguas residuales de la zona de interés, a través del análisis de tasas variables de visitación turística y proyecciones de población hacia el futuro, en el que el sistema propuesto mantenga un adecuado funcionamiento, sin afectación por el aumento de caudal de entrada, percibido como producto del eventual crecimiento poblacional.

Otra de las consideraciones para el diseño, fue la toma de parámetros cuantitativos obtenidos de un modelo a escala construido para validar los criterios de dimensionamiento del sistema secundario de tratamiento de aguas residuales propuesto, basado en el análisis de resultados de calidad de aguas según los parámetros que exige la Ley de Vertidos y Reúso de Aguas Residuales reflejado por el cambio en los tiempos de retención hidráulicos (TRH) puestos a prueba para determinar su efecto sobre las condiciones reales de operación.

Aunado a esto, procurando un manejo integral de los subproductos generados, se analiza la capacidad de generación de biogás de la fracción sólida con la metodología de Potencial Bioquímico de Metano (BMP por sus siglas en inglés) para determinar un adecuado uso de los lodos generados. Finalmente, se realiza el diseño preliminar de la alternativa de tratamiento propuesta, teniendo en cuenta parámetros técnicos de construcción, operación y mantenimiento. La información recolectada en el proyecto fue en beneficio de la ASADA de Santa Elena de Monteverde, con el objetivo de ser considerada como una herramienta que facilite la toma de decisiones en temas de manejo de las aguas residuales generadas en la zona de estudio.

1.3. Objetivos del proyecto

1.3.1. Objetivo General

- Analizar la capacidad de tratamiento de agua residual residencial y comercial de un biofiltro anaeróbico, para la determinación de la eficiencia de remoción orgánica debido a la variabilidad estacional en la generación de aguas residuales.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la variabilidad de generación de aguas residuales de la comunidad de Monteverde para la estimación de caudales máximos y mínimos esperados.
- Diseñar un filtro anaeróbico a escala de laboratorio para el estudio de la variación de los tiempos de retención hidráulica para los caudales máximos y mínimos.
- Estudiar el comportamiento de dos medios filtrantes para la determinación del material más eficiente para la adhesión de las comunidades microbianas y paso de agua residual a través del material poroso.
- Estimar el potencial de biometano de los sólidos sedimentables y biomasa generada en los filtros con la combinación de residuos agrícolas orgánicos para la utilización de una fuente renovable de energía.
- Diseñar un filtro anaeróbico para un sistema que pueda ser instalado en la comunidad de Monteverde basados en los resultados a escala de laboratorio para su consideración como herramienta de toma de decisión en la ASADA Santa Elena.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Composición de las aguas residuales

Generalmente, el nivel de contaminación de las aguas residuales convencionales no se mide a partir de la concentración de los distintos componentes que pueden ser considerados contaminantes, sino determinando los niveles de parámetros globales que definen el impacto que podrían generar estas aguas en cuerpos receptores, a través del estudio de sus características físicas, químicas, biológicas y en ocasiones, cuando se trabaja con aguas residuales industriales, se requiere conocer componentes específicos como metales pesados, tensoactivos, fenoles, etc. (12).

El conocimiento de los componentes y la naturaleza del agua residual es esencial para el diseño del alcantarillado que se encargará del trasiego. Seleccionar el o los procesos de tratamiento, evacuación y gestión, que garanticen remover los componentes en cantidades tales que minimicen el impacto que van a generar sobre los cuerpos receptores (13). Es común clasificar a las aguas residuales en aguas residuales domésticas (conocidas también como municipales) y aguas residuales industriales.

Las aguas residuales domésticas son aquellas procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas (14). El agua residual doméstica fresca y recién generada presenta un color gris y olor a queroseno, pero al pasar el tiempo de ser generada se vuelve séptica y pestífera con un olor a sulfhídrico y un característico color negro (15).

El agua residual producto del uso en la industria, en muchas ocasiones deben ser tratadas por las mismas empresas que las generan antes de poder ser descargadas al alcantarillado municipal. Esto debido a la posible presencia de metales pesados o compuestos tóxicos y peligrosos, como fenoles, contaminantes emergentes y compuestos orgánicos tóxicos que no pueden ser removidos mediante los tratamientos convencionales de aguas residuales domésticas; sin embargo, en algunos casos donde las aguas industriales tienen características compatibles con las municipales es posible descargarlas directamente

al alcantarillado y tratarlas con los mismos procesos que a las aguas domésticas (15). El cambio en la composición de las aguas residuales urbanas debido al aporte de las aguas industriales depende principalmente del grado de industrialización del sector y de las características de los vertidos realizados a la red de colectores municipales (14). La caracterización de las aguas residuales y su clasificación se presenta en las secciones 0, 2.1.2 y 2.1.3.

2.1.1. Características físicas de las aguas residuales

Existen cuatro categorías en la clasificación de las características físicas de las aguas residuales, las propiedades de cada categoría son necesarias de entender para la toma de decisiones cuando se busca minimizar el impacto de las aguas residuales generadas, estas características son mostradas a continuación:

- **Concentración de sólidos**

El porcentaje de sólidos es de los parámetros físicos que se considera más importante, pues este grupo incluye la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta (16). Algunos de los efectos negativos de los sólidos sobre los cuerpos hídricos son: la disminución en la fotosíntesis por el aumento de la turbidez del agua, aumento de la salinidad, incrementos de la presión osmótica, afectación de fauna por obstrucción de branquias en peces, sedimentación de material en el fondo de los cuerpos receptores, favoreciendo la aparición de condiciones anaerobias que generan gases y olores indeseados (14).

- **Olor**

La generación de olores normalmente se debe al proceso de descomposición de la materia orgánica. Los olores generados por aguas residuales ordinarias recientes es más tolerable, sin embargo, con el tiempo tiende a un olor séptico debido a la liberación de sulfuro de hidrógeno generado en la reducción de sulfatos a sulfitos por la acción de

microorganismos anaerobios (17). En este sentido, la problemática con los malos olores representa una de las principales causas de rechazo por parte de la población cuando se planea la construcción de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales cercano a sus domicilios.

- **Color**

Analizar el color de las aguas residuales funciona como indicador para aproximar el tiempo desde que fueron generadas, variando desde un beis claro típico de aguas recientes, hasta un color negro profundo a medida que pasa el tiempo, como respuesta a la implantación de condiciones de anaerobiosis por descomposición bacteriana de la materia orgánica (14); además, en algunos casos, cumple la función de indicador de contaminación con agentes químicos y otros.

- **Temperatura**

Este parámetro tiene efecto directo en los procesos biológicos, debido a que todas las velocidades de reacción enzimáticas involucradas en el metabolismo de las células de las bacterias dependen de la temperatura dentro de ciertos intervalos, con el siguiente patrón de comportamiento: temperaturas bajas, la actividad se reduce, a temperaturas altas la actividad se incrementa (17). En cuanto a las aguas residuales, la temperatura de estas varía en función de la estación del año y de la posición geográfica. En regiones frías la temperatura varía de 7 a 18°C mientras que en regiones cálidas se encuentra entre 13 y 30°C (15).

2.1.2. Características químicas

Es de suma importancia estudiar detalladamente la composición de los compuestos químicos presentes en las aguas residuales, ya que la presencia de algunos agentes en particular ha ocasionado alteraciones importantes en los procesos de depuración retardando principalmente la descomposición biológica de los sistemas de tratamiento (13). La

clasificación de las características químicas de las aguas residuales comprende tres grupos que subdividen su estudio en los apartados mostrados a continuación:

- **Componentes principales**

Su existencia en las aguas residuales se debe a la presencia de sólidos provenientes de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos y a la presencia de material de desecho animal y vegetal. Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia en determinados casos de nitrógeno (13). También pueden estar presentes otros elementos como el azufre, fósforo o hierro. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas, hidratos de carbono, grasas y aceites (13).

La técnica de medición del contenido orgánico de las muestras varía según el rango de concentración que precise encontrar, así, para concentraciones en el intervalo de 0,001 mg/L a 1 mg/L se emplean métodos instrumentales que incluyen la cromatografía de gases y la espectroscopía de masa, capaces de detallar con mayor precisión la composición orgánica de la muestra (13). Para aguas con mayores concentraciones se utilizan técnicas que se basan en la aproximación del contenido de oxígeno en el agua y utilizarlo, como las siguientes:

- ❖ Demanda teórica de oxígeno (DTeO): Determina la cantidad de oxígeno que utilizan los microorganismos para oxidar materia orgánica carbónica o nitrogenada, suponiendo que toda la materia orgánica es susceptible de una descomposición microbiana, por ejemplo, que es biodegradable (1).
- ❖ Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): Su análisis representa el oxígeno utilizado por los microorganismos para realizar la oxidación de la materia orgánica presente en el agua (18). Cuando un desperdicio altamente demandante de oxígeno (medido como DBO) se añade al agua, la velocidad a la que el oxígeno es consumido al oxidar dicho desperdicio (desoxigenación) puede exceder la

velocidad a la que el oxígeno se vuelve a suplir desde la atmósfera (reaireación) (1).

- ❖ Demanda química de oxígeno (DQO): Cantidad de oxidante químico, expresado en equivalente de oxígeno, que se requiere para oxidar por completo una fuente de materia orgánica. Este parámetro no puede ser menor que la DBO, ya que es mayor la cantidad de sustancias oxidables por vía química que por vía biológica (18).
- ❖ Fósforo total: El fosforo en exceso tiene la capacidad de reducir la calidad del agua, generando la proliferación descontrolada de algas; fenómeno conocido como eutroficación, reducen la cantidad de oxígeno disuelto en el agua provocando reducciones de vida acuática y usos adicionales que se le pueda dar al cuerpo de agua (19).
- ❖ Nitrógeno total: La fuente de nitrógeno en el agua residual es producto de nuestros hábitos alimenticios y preparación de alimentos, exudados corporales de lavados en la bañera o en la ducha y productos utilizados para el lavado de la ropa (20). Este puede ser eliminado por métodos físicos, químicos y biológicos, el método biológico tiene un costo relativamente bajo en relación a los métodos físico-químicos y elimina los compuestos nitrogenados del agua mediante la conversión a nitrógeno gaseoso inofensivo (18).
- ❖ Potencial de Hidrógeno (pH): El equilibrio químico del agua es influenciado fuertemente por el pH. El nivel de pH del agua afecta directamente a ciertos procesos unitarios. Los valores del pH demasiado altos o bajos pueda inhibir el crecimiento de microorganismos (21).

- **Materia inorgánica**

Las aguas residuales, salvo en caso de determinados residuos industriales, no se suelen tratar con el objetivo específico de eliminar los constituyentes inorgánicos que se incorporan durante el ciclo del uso. Las concentraciones de constituyentes inorgánicos aumentan, igualmente, debido al proceso natural de evaporación que elimina parte del agua superficial y deja las sustancias inorgánicas en el agua. Puesto que las concentraciones de

los diferentes constituyentes inorgánicos pueden afectar mucho a los usos del agua, conviene examinar la naturaleza de algunos de ellos, especialmente aquellos que han sido incorporados al agua superficial durante su ciclo de uso (13).

- **Gases presentes en el agua**

Los gases que con mayor frecuencia se encuentran en aguas residuales brutas son el nitrógeno, el oxígeno, el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco y el metano. Los tres primeros son gases de común presencia en la atmósfera, y se encuentran en todas las aguas en contacto con la misma. Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales (13).

2.1.3. Características biológicas

Las bacterias desempeñan un papel fundamental en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, por esto, conocer su comportamiento, metabolismo y condiciones del medio bajo las que se desenvuelven óptimamente, conviene para ser utilizados en beneficio de ciertos procesos, por ejemplo en sistemas de tratamiento de aguas residuales (12); para esto es fundamental mantener niveles equilibrados entre los distintos grupos de microorganismos presentes en las aguas, y muchas veces se logra naturalmente a través de la cadena alimenticia entre especies (22).

La presencia y ausencia de patógenos específicos son indicadores para evaluar la calidad del agua, esta información permite seleccionar, monitorear y evaluar procesos de tratamiento y desinfección de aguas de consumo o aguas residuales (12); además, la presencia o ausencia de plantas y animales en cuerpos naturales de agua son una señal de aguas sin contaminación o bien funcionan como herramienta para determinar el grado de contaminación (23).

2.2. Categorías de origen de aguas residuales en el cantón de Monteverde

En el planteamiento inicial de un sistema de tratamiento de las aguas residuales en un nuevo proyecto, los datos necesarios para su diseño deben basarse en información histórica de consumo de agua potable y mediciones periódicas (24). El volumen de las aguas residuales aportadas a un sistema de recolección depende de factores como la cantidad de habitantes, consumo de agua potable, coeficiente de retorno sanitario y caudales aportados por los comercios, instituciones e industrias (5).

Dividir el consumo de agua potable en categorías es importante para analizar por separado el cambio que podría presentarse en cada una de ellas conforme se avanza hacia el periodo de diseño límite propuesto para la operación del sistema. De acuerdo con datos facilitados por la ASADA de Santa Elena de Monteverde, el consumo promedio de agua potable mensual calculado para los años que van del 2016 al 2020 es de 45592 m³, dividido en cuatro categorías de consumo de acuerdo con su función. Las categorías son: domiciliar, comercial, preferencial y de gobierno (Figura 1).

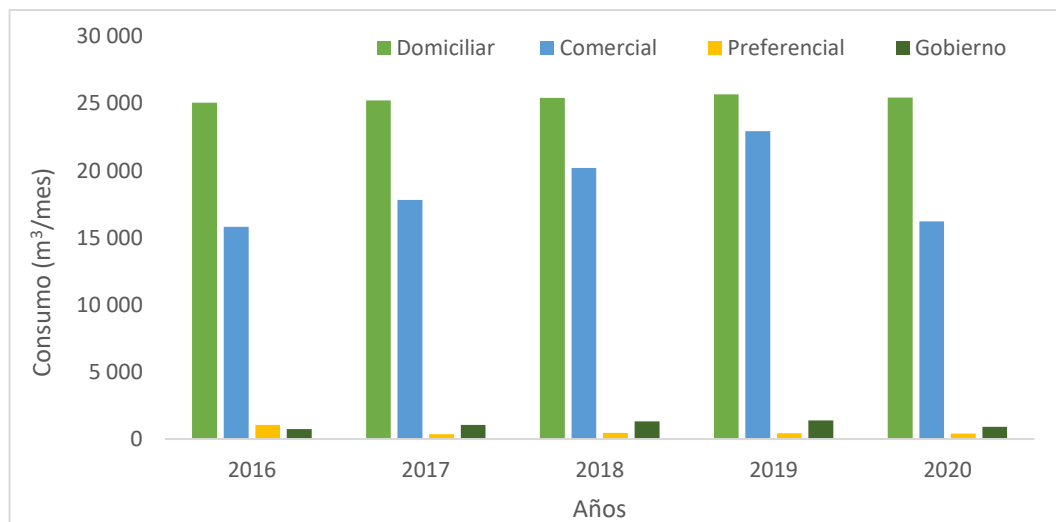


Figura 1. Promedio de consumo anual de agua potable por categoría para los años del 2016 al 2020 de la ASADA de Santa Elena de Monteverde, Puntarenas

Fuente: (25)

El cálculo de caudales de aguas residuales domiciliarias (Q_{dom}) se deriva del consumo promedio de agua potable diario por persona (dotación), considerando que un porcentaje de este consumo se convierte en aguas residuales (Ecuación 1). Esta fracción de consumo se conoce como coeficiente de retorno sanitario, Blanco y Leon (24) recomiendan utilizar un valor entre 70 y 85%.

$$Q_{dom} = P \cdot D \cdot C_r \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Q_{dom} = Aporte de aguas residuales domésticas (L/d).

P = Número de habitantes del periodo de diseño asignado (Hab).

D = Dotación por habitante (L/hab·d).

C_r = Coeficiente de retorno sanitario.

El número de habitantes (P) que aportan agua residual al sistema de alcantarillado sanitario depende del número de unidades habitacionales (domicilios) que reúne la zona de estudio. Considerando el factor de hacinamiento correspondiente al último censo poblacional del cantón y su proyección al periodo de diseño requerido. Para el caso del cantón de Monteverde el número promedio de habitantes por casa (hacinamiento) corresponde a 3,2 según datos del INEC (26) mientras que el total de abonados correspondientes al año 2018 por la ASADA de Santa Elena de Monteverde es de 1244, para un total aproximado de 3981 habitantes. Para el cálculo de proyección futura de población domiciliar en Monteverde el INEC (26) recomienda que la tasa anual de crecimiento poblacional utilizada sea del 1,7%.

Información referente al consumo mensual máximo y mínimo de agua potable es utilizada para contemplar la variabilidad de los caudales de aguas residuales generados en un mismo año y que puede tener repercusiones en la estabilidad del sistema por los cambios repentinos que podrían presentarse en las concentraciones de las aguas de recibo (Tabla 1).

Tabla 1. Consumo promedio de agua potable (m³/mes) por categoría de usuario para los años del 2016 al 2020 con el valor de lectura máximo y mínimo reportado por la ASADA ^a

Categoría	Promedio mensual (m ³)	Intervalo mensual (m ³)		Número de abonados	Promedio mensual (m ³ /abonado)
		Min	Max		
Domiciliar	25 366	20 967	31 814	1 244	20,4
Preferencial	543	229	3 546	21	25,8
Comercial	18 599	9 463	27 383	338	55,0
Gobierno	1 085	482	2 082	27	40,2
TOTAL	45 592	31 141	64 825	1 630	141,4

^a: Fuente: (25)

2.3. Niveles de tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales utiliza un conjunto de procesos unitarios que llevados a cabo de manera eficiente permiten obtener efluentes con porcentajes de contaminantes menores a los parámetros establecidos por el reglamento de vertidos (50). La secuencia de tratamientos tiene como objetivo eliminar un tamaño de partícula determinado, decreciente a medida que se avanza en las operaciones, esto implica que las técnicas de depuración sean cada vez más complejas al final del tratamiento completo.

Para el tratamiento del agua residual generalmente se utilizan cuatro etapas de tratamiento básico que comprenden procesos físicos, químicos y biológicos. Los tratamientos son pretratamiento, primario, secundario y terciario (4) (Figura 2).

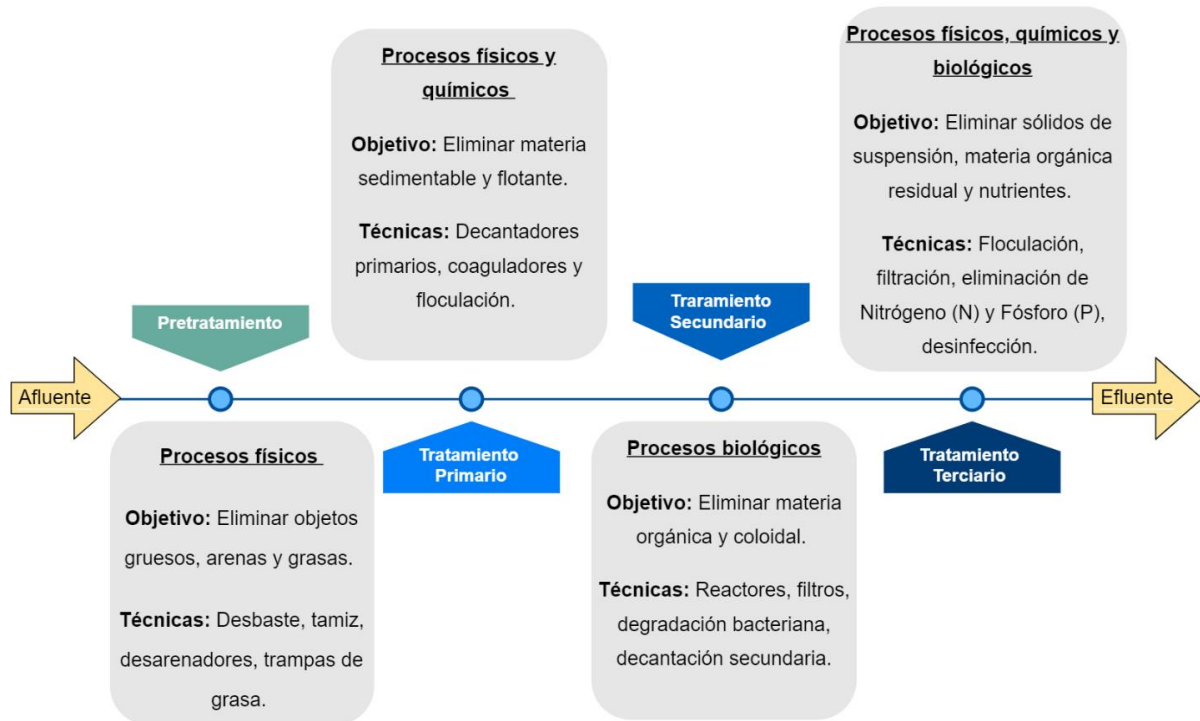


Figura 2. Etapas del tratamiento de las aguas residuales

Modificado de (27)

2.3.1. Etapa de pretratamiento

Esta etapa consiste en la remoción de las partículas sólidas más grandes como pañales, toallas sanitarias, preservativos, etc. que pueden ser separadas fácilmente por medio de sistemas de rejas, que generalmente son la primera unidad de las plantas de tratamiento. Si no se remueven al principio estos sólidos, pueden provocar obstrucciones en tuberías, bombas, válvulas y demás componentes de las unidades siguientes en la planta, comprometiendo el correcto funcionamiento del sistema (28).

2.3.2. Tratamiento primario

El tratamiento primario es un proceso mecánico, a veces complementado con procesos químicos que consisten en la remoción de una fracción de sólidos en suspensión, sólidos insolubles como arena, materia orgánica y materiales como grasas, aceites y

espumas. Algunas de las acciones que se realizan en esta fase son: la sedimentación, la floculación y la flotación (12). Se busca la disminución de la carga de contaminación antes de entrar al tratamiento biológico (28).

2.3.3. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario incluye una serie de procesos que utilizan microorganismos (entre los que se destacan las bacterias) para realizar la eliminación de contaminantes, aprovechando la actividad metabólica sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal. Es uno de los tratamientos más habituales, no solo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en un alto porcentaje de las aguas industriales (29).

Para esta fase, se busca la construcción de un ambiente donde la materia orgánica pueda ser consumida por microorganismos que contribuyan a mejorar la calidad del agua y eliminar aquellos sólidos que no pudieron ser removidos en las fases previas (30).

Diferentes tipos de tratamiento se ampliarán en la sección 2.4 con la explicación de sistemas de tratamiento biológico.

2.3.4. Tratamiento terciario

Esta etapa del tratamiento abarca procesos que eliminan sustancias adicionales como contaminantes químicos específicos y metales pesados (28). También puede ser utilizada donde el tratamiento secundario fue insuficiente (30).

2.4. Tratamiento secundario: Sistemas biológicos de tratamiento

Los sistemas biológicos de tratamiento de desechos líquidos se han implementado como resultado de la observación de ciertas combinaciones de microorganismos que utilizan las sustancias contaminantes como nutrientes y fuente de energía, disminuyendo la carga orgánica del efluente (11). El principio de tratamiento de estos sistemas consiste en acelerar el proceso natural induciendo condiciones óptimas de funcionamiento y

crecimiento microbiano. Para esto es necesario hacer fluir el agua residual a través de comunidades microbianas específicas durante periodos de tiempo suficientes que permitan eliminar, reducir o transformar las concentraciones de contaminantes que mejoren la calidad del agua de salida (efluente). Los tratamientos secundarios o terciarios pueden ser de tipo biológico y de acuerdo con la dependencia de oxígeno de los microorganismos pueden clasificarse según se detalla en las secciones 2.4.1 y 2.4.2.

2.4.1. Tratamientos aerobios

Los tratamientos aerobios son los que funcionan con microorganismos que degradan la materia orgánica por medio de un proceso de oxidación que consume oxígeno. El carbono se oxida y el oxígeno se reduce (5). Este proceso se lleva a cabo por medio de lagunas o tanques de aireación con presencia de microorganismos o bacterias aerobias, generalmente después de los procesos primarios.

Algunos de los principales mecanismos utilizados son los aireadores superficiales. Estos son básicamente aspersores que giran y rocían agua sobre la superficie del agua residual, y los difusores de oxígeno que consisten en boquillas que liberan burbujas de aire colocadas en el fondo del tanque para que las burbujas atraviesen y se mezclen con el agua residual y los microorganismos (28) (Figura 3).

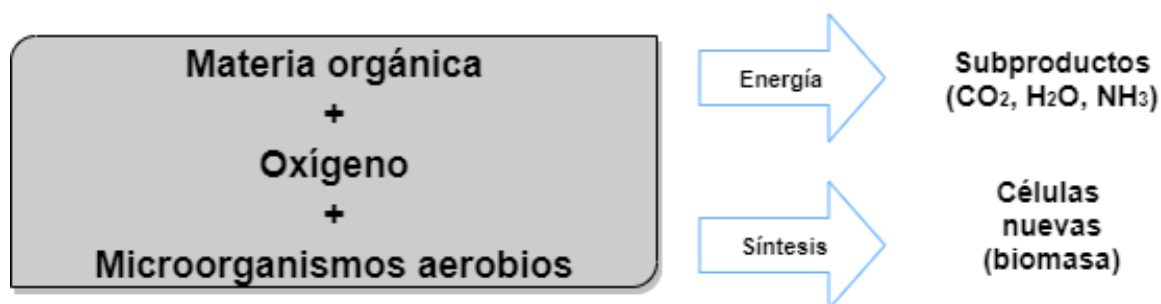


Figura 3. Diagrama de proceso biológico aerobio

Fuente: Modificado de (31)

2.4.2. Tratamientos anaerobios

La biodegradación anaerobia consiste en la transformación, por medio de microorganismos, de la materia orgánica de las aguas residuales en compuestos gaseosos reducidos como el metano, dióxido de carbono, amoníaco, ácido sulfúrico y otros compuestos orgánicos (32). Esta descomposición es una reacción de cuatro etapas; (i) la hidrólisis; en la que los compuestos de alto peso molecular son descompuestos en sustancias solubles de bajo peso molecular como los aminoácidos y los azúcares, (ii) acidogénesis representa el proceso a través del cual bacterias anaerobias producen acetato a partir de diversas fuentes de energía (por ejemplo, hidrógeno) y de carbono (por ejemplo, dióxido de carbono), (iii) acetogénesis, o conversión de los solubles orgánicos en ácidos grasos volátiles y (iv) metanogénesis o conversión de los ácidos volátiles en gas metano, anhídrido carbónico y una pequeña cantidad de hidrógeno (27). A diferencia de los procesos aerobios, la tasa a la que se puede llevar a cabo el tratamiento no está limitada por la tasa a la que se pueda suministrar oxígeno. Las aguas residuales de alta concentración pueden ser tratadas directamente, esto hace innecesaria la dilución para mantener el equilibrio entre la demanda de oxígeno y el suministro del mismo, y se pueden tratar materias como celulosa, que no es posible tratar en procesos aerobios. Estas condiciones hacen atractiva esta vía en aguas residuales de la agroindustria, además, los lodos estabilizados por procesos anaerobios son adecuados para su disposición directa sobre tierras de cultivo (11).

Según Chernicharo (33), los procesos anaerobios tienen algunas ventajas en comparación con los procesos aerobios como la baja producción de sólidos (casi 20 veces menor según datos de Lozano (5)), costos de operación más bajos con elevados tiempos de retención de sólidos que los convierte en sistemas más compactos, bajo consumo de energía por la reducción de mecanismos, características que le otorgan un gran potencial de uso en el tratamiento de aguas residuales concentradas y diluidas.

Una alternativa dentro de esta categoría **son los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA)**. Su uso en la actualidad destaca por la simplicidad de diseño y su

capacidad de tratar variedad de afluentes provenientes de actividades comerciales y residenciales, sistema que se presenta en detalle en la sección 2.4.2.1.

2.4.2.1. Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)

Esta es una de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales que pertenecen al tratamiento secundario. Realiza su función como depurador de aguas residuales a través del mecanismo anaerobio expuestos en la sección 2.4.2. Análogo al funcionamiento de un reactor anaerobio de flujo ascendente a través de manto de lodos (UASB, por sus siglas en inglés), en los FAFA el afluente (agua residual de entrada) ingresa por la parte baja del filtro y fluye de forma ascendente a través de su volumen de trabajo. El FAFA cuenta con una columna de contacto de capa fija que busca aumentar el área superficial en su interior; favoreciendo la formación de una biopelícula también conocida como *zooglea*, constituida por microorganismos capaces de tomar como fuente de energía la materia biodegradable presente en las aguas residuales para satisfacer sus procesos metabólicos y de este modo, realizar el proceso de depuración (11).

Como sucede con todos los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales, los tipos y proporciones de las diferentes especies de microorganismos presentes en la población microbiana dependen de las condiciones de operación del sistema, especialmente de la carga (concentración de contaminante) y la composición del agua residual. Desde una perspectiva general, por muy contaminadas que se encuentren las aguas residuales, de forma natural operan sobre ellas fuerzas físicas, químicas y biológicas que tienden a limpiarlas. Lo único que hacen los sistemas de tratamiento es ajustar las condiciones idóneas para acelerar estos procesos y obtener un efluente con una calidad determinada (34). Provocar estos procesos genera tasas de producción de subproductos más elevadas que las naturales, y uno de estos subproductos es el lodo.

En el filtro anaerobio usualmente se presenta una fracción de biomasa que no se adhiere al medio de soporte, sino que permanece atrapada en los espacios libres del mismo, colmatándose al fondo (35). La biomasa en el reactor también puede estar en suspensión en

el líquido como un lodo granular (36). El control del material en suspensión está directamente relacionado con la velocidad del flujo, misma que debe ser menor que la velocidad de sedimentación de las partículas. La acumulación de esta materia reduce la porosidad del medio al ocupar los espacios vacíos, a tal punto que el flujo dentro del sistema puede verse interrumpido, por esto, la selección del material de capa fija debe contener alta porosidad y rugosidad y debe estar acompañada de un control de limpiezas periódicas para mantener libre el paso del fluido (37).

Las cantidades y características de los lodos generados dependen de los tiempos de retención de lodos o tiempos de retención celular (TRC) y de las condiciones de operación que se asocian al sistema de depuración diseñado (38). Hacer un balance de sólidos permite determinar la eficiencia de operación del proceso de manera práctica. El cálculo de acumulación de lodos es recomendado por Hazel Serrano (37) haciendo uso de la ecuación 2.

$$A = \frac{V}{T \cdot P} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

A = Tasa de acumulación de lodos (L/hab·año).

V = Volumen estimado de lodos (L) (calculado a partir de la profundidad y del área del tanque, $\text{m}^3 \cdot 10^{-3}$).

T = Tiempo transcurrido desde la última lectura de lodos (años).

P = Número de usuarios (hab).

Al conocer la tasa de acumulación real de lodos producidos se puede determinar el periodo de limpieza despejando T de la ecuación 2. El procedimiento para hacerlo es evaluar el rendimiento del FFAFA ante distintos volúmenes de ocupación de lodos (V) para un promedio dado de acumulación de lodos (A). Al conocer el límite permisible de volumen ocupado por lodos, se calcula el tiempo en que será necesario realizar el retrolavado para así bajar los niveles.

Los materiales que se utilizan en el interior de los FAFA para soporte de los microorganismos son muy variados, entre estos Ruiz (39) menciona cantos rodados, piedra caliza, trozos de ladrillo, conchas, gran variedad de anillos plásticos, entre otros. Poner a prueba distintos materiales de soporte ha sido tema de experimentación en distintos proyectos. Según Viquez (11) el material seleccionado también debe cumplir ciertas características como: alta superficie específica, resistencia a la erosión, química y biológicamente inerte y de bajo costo.

Distintos tipos de piedra son utilizados en sistemas FAFA para la depuración de las aguas residuales y ofrecen buenos resultados, Ruiz (39) en su estudio sobre el potencial de la digestión anaerobia en sistemas de tratamiento de aguas residuales propone el uso de medios filtrantes por capas de piedra cuarta y cuartilla con porosidades de 45% y 43% y un peso volumétrico de 1461 kg/m³ y 1446 kg/m³ respectivamente, debido a los buenos rendimientos que obtiene en su investigación.

En términos prácticos, el FAFA es un tanque cerrado, en el cual las bacterias encargadas de la biodegradación se benefician del material de apoyo en el interior del dispositivo al contar con mayor área de contacto sobre la cual aferrarse, entonces, el agua residual fluye a través de una masa de sólidos biológicos de manera ascendente donde se lleva a cabo el proceso de depuración por parte de los microorganismos.

Uno de los parámetros de diseño a tomar en cuenta en la construcción de un sistema de filtrado anaerobio de flujo ascendente es el tiempo de retención hidráulico (TRH). Este parámetro se puede definir como la duración que le toma a una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir del filtro; este se calcula dividiendo el volumen del filtro entre el caudal de ingreso al mismo y es expresado en días (ecuación 3).

$$TRH (d) = \frac{V (m^3)}{Q (m^3/d)} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

TRH = Tiempo de Retención Hidráulico (días).

V = Volumen efectivo (m^3).

Q = Caudal de ingreso ($m^3/día$).

Distintos estudios han demostrado que el TRH es el parámetro de diseño más influyente en el desempeño del filtro (40), si este es muy corto; los microorganismos no pueden cumplir su función de degradación correcta de las partículas ni se logra una adecuada sedimentación, además de correr riesgo de arrastre no deseado de los microorganismos depuradores debido a la velocidad del flujo, se suspenden las partículas ya sedimentadas y se dan contaminaciones cruzadas, mientras que, si el tiempo por el contrario es demasiado largo, se da una inundación de superficie y demanda estructuras de mayor tamaño (41). Se recomiendan TRH entre 0,5 días y 1,5 días (12 h a 36 h) (40). Debido a que en este sistema los microorganismos se encuentran adheridos al medio de soporte, su tiempo de retención celular es mayor al tiempo de retención hidráulica.

Este sistema puede aplicarse en el tratamiento de aguas residuales de casas de habitación debido a su alta resistencia a la fluctuación en caudales. La eficiencia de remoción para DQO está alrededor del 65% para aguas residuales de tipo doméstico (17) .

Otra labor donde se ha registrado el uso de FAFA puede encontrarse en la investigación de López *et al* (42) quienes obtuvieron rendimientos de remoción de DQO entre 50% y 80% en la depuración de aguas residuales de mataderos animales municipales con concentraciones de carga orgánica en intervalos de 3,7 a 16,5 $kg_{DQO} \cdot m^3/d$. Por otro lado, Ruiz y colaboradores (43) reportan rendimientos del 81% para aguas residuales del mismo origen pero con concentraciones de carga orgánica de 1 a 6,5 $kg_{DQO} \cdot m^3/d$ bajo tiempos de retención hidráulicos de 0,5 días.

El uso de esta tecnología ha llegado también al proceso de depuración de aguas residuales con colorantes textiles, Kapdan (44) obtuvo eficiencia de decoloración de alrededor de 90% y de remoción de DQO entre 15 y 35% para cargas aplicadas que variaron desde 1 a 8 kg por m³/d. Otro ejemplo de aplicación de filtros anaerobios presentan Feng *et al* (45) quienes sugieren un prototipo a escala para tratar el subproducto de la extracción de proteína de la hierba en una biorrefinería verde. El estudio demostró que el filtro anaerobio es factible para el tratamiento de este afluente, reduciendo las concentraciones de DQO hasta en un 80%.

Un aspecto a considerar en la selección de esta tecnología es el uso que se le dará al lodo generado en el proceso de depuración, ya que este tiene tres características que hacen de su desecho directo algo difícil: 1) presenta olores desagradables, 2) es potencialmente dañino debido a la presencia de patógenos y, 3) contiene un alto contenido de humedad (hasta 97% según (46)), lo que hace difícil su procesamiento. Los primeros dos problemas se suelen resolver mediante la estabilización del lodo, y la tercera por la deshidratación (1).

La función de la estabilización del lodo es reducir los problemas asociados con el olor y la presencia de patógenos. Uno de los métodos para la estabilización del lodo es la técnica de digestión anaerobia. Esta técnica es más utilizada que la digestión aerobia (otro método de estabilización de lodos) ya que no requiere aireación, por lo tanto, requiere menor consumo energético. La digestión anaerobia es una vía para el aprovechamiento energético asociado al subproducto del proceso del tratamiento de las aguas residuales, ya que el proceso de descomposición de esta materia genera biogás con presencia de metano (65 a 70% de Metano (CH₄) y 30 a 35% de Dióxido de Carbono (CO₂), aunque también puede contener pequeñas porciones de Hidrógeno (H₂), Nitrógeno (N₂), Oxígeno (O₂) y Ácido Sulfhídrico (H₂S) (1)). El gas metano puede ser convertido a electricidad mediante la combustión de motores generadores o ser utilizado en el calentamiento para mantener constantes las condiciones térmicas de operación, pero su contenido dependerá específicamente de la calidad del lodo generado. Arhoun (47) expresa el valor energético

equivalente del biogás comparándolo con otras fuentes de energía, estos valores se muestran en la Figura 4.

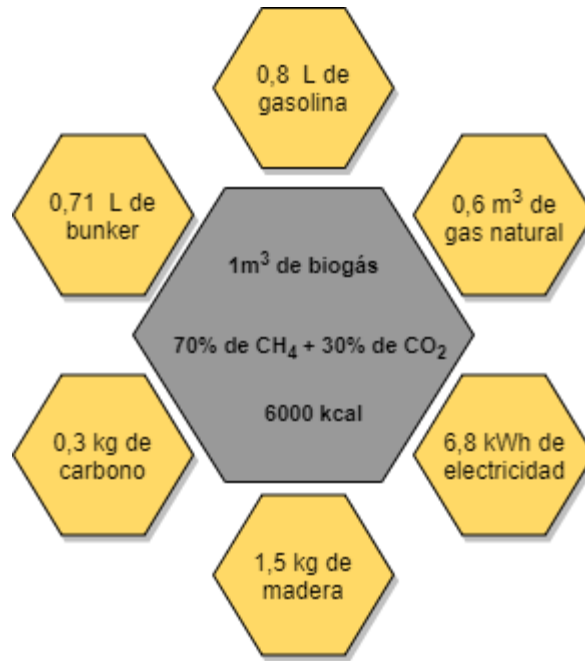


Figura 4. Equivalencia de biogás con otras fuentes de energía

Fuente: Modificado de Arhoun (47)

La deshidratación es generalmente el método final de la reducción de volumen antes del desecho final. Si se dispone del espacio adecuado, el método de deshidratación más simple y económico es el de utilizar camas de secado. Las camas de secado consisten en drenajes de baldosa en grava cubiertos con un anillo perimetral de arena. El líquido se pierde por la filtración hacia la arena y por evaporación y deja como resultado el material sólido del lodo en secado continuo (48). Esta técnica por lo general requiere más tiempo, cuando el proceso demanda acelerar las etapas es común la deshidratación de los lodos mediante equipos mecánicos centrífugos que comprimen los lodos para separar una gran parte de la fase líquida de la sólida.

2.5. Indicadores de contaminación de Costa Rica

Al revisar la estructura de actores del sector saneamiento en el país y los roles que desempeñan en la gestión ambiental de las aguas residuales, se identifican cuatro funciones principales: 1) dirección y política, a cargo del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) como órgano encargado de la rectoría técnica de los servicios de abastecimiento de agua potable y saneamiento, 2) regulación, donde participa el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) relacionado con la gestión y protección del recurso hídrico, el Ministerio de Salud (MS) encargado de asegurar la salud pública y la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP) como regulador económico, 3) control y vigilancia, sumada a las tres anteriores se encuentra la contraloría que ejerce el control y fiscalización del uso de los fondos públicos y por último 4) operación, se encuentra el AyA, Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH), Municipalidades y las Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales (ASADAS) (8).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben obedecer a la necesidad de depuración de las aguas a tratar, teniendo en cuenta los diferentes tipos de contaminantes que pueden estar presentes en dichas aguas. Es muy difícil conocer todos y cada uno de los compuestos que podrían afectar al ser humano o al ecosistema, por esto, existen indicadores dados en la normativa técnica que deben cumplirse cuando se realicen vertimientos a cuerpos receptores (49). Ante este panorama, se han creado una serie de leyes y reglamentos, cuyo fin es vigilar la salud pública y del ambiente.

Para establecer de manera clara los límites máximos permitidos de contaminantes en las aguas residuales, Costa Rica estableció el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (Decreto No.33601 MINAE-S), mismo que tiene un rango de aplicación obligatoria en todo el ámbito nacional en relación con el manejo de las aguas residuales, que independientemente de su origen sean vertidas o reutilizadas (50). Los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas son los mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor ^a

Parámetro	Límite cuerpo receptor
DBO ^(5,20)	50 mg/L
DQO	150 mg/L
Sólidos Suspendidos	50 mg/L
Grasas y aceites	30 mg/L
pH	5 a 9
Temperatura	15 °C ≤ T ≤ 40 °C
Sólidos sedimentables	1 mg/L
Sustancias Activas al azul de metileno	5 mg/L

^a: Datos tomados de (50).

La normativa mencionada para el caso de Costa Rica detalla las condiciones en las que se permite el reúso basado en lo establecido en el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales vigente, dejando muy claro que en ninguno de los casos a estas aguas se les podrá dar un uso de consumo humano. Siempre y cuando, las aguas cumplan con los requisitos, se clasifican los reúsos según los siguientes tipos (50):

- 1) Reúso urbano: Para el riego de zonas donde haya acceso del público, por ejemplo, zonas verdes, campos de golf, parques, plazas deportivas, cementerios, o actividades como control de incendios y lavados de automóviles.
- 2) Riego con acceso restringido: Cultivo de césped o silvicultura.
- 3) Reúso agrícola en cultivos de alimentos que no se procesan previo a su venta: Aplicación de riego de productos que incluso se comen crudos.
- 4) Reúso agrícola en cultivos de alimentos que se procesan previo a su venta: Aplicación de riego en productos que son procesados química o físicamente para la destrucción de organismos patógenos que pudieran contener.
- 5) Reúso agrícola en cultivos no alimenticios: Riego de forrajes y otros cultivos no alimenticios.

- 6) Reúso recreativo: Cuerpos de agua artificiales donde podría existir contacto ocasional como en pesca o navegación.
- 7) Reúso paisajístico: Aprovechamiento estético donde el contacto con el público no es permitido.
- 8) Reúso en la construcción: Funciones de compactación de suelos, control de polvo, lavado de materiales o mezcla con concreto.

2.6. Avances de Costa Rica en temas de cobertura de saneamiento

Como parte de los principales logros recientemente alcanzados a nivel nacional en materia de saneamiento de aguas residuales pueden mencionarse (8):

- a) Plan Nacional de Inversiones.
- b) Creación de la comisión nacional de saneamiento (CONASAN).
- c) Elaboración de la política nacional de saneamiento en aguas residuales, esto asegura su continuidad sin importar el gobierno que se encuentre en curso.
- d) Elaboración del plan de inversión 2017-2045 para la elaboración del sistema de captación y tratamiento de aguas negras.
- e) Creación del programa de saneamiento en zonas prioritarias.
- f) Proyecto de capacitación en saneamiento para ASADAS, AyA y MINAE.
- g) Creación de la unidad de diseño para proyectos de saneamiento en AyA.
- h) Diseño del centro de investigación y formación en Tecnologías de saneamiento (CIFTES).

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de los objetivos específicos inicia con el análisis de información de estudios previos realizados en la zona de interés para determinar los volúmenes de aguas residuales producidos actualmente y su proyección hacia el futuro en un lapso de 25 años considerando su variabilidad mensual y anual. Para validar la propuesta y seleccionar los criterios de diseño se construyó un prototipo a escala que compara materiales de capa fija dentro de dos filtros bajo las mismas condiciones de operación a los que se aplicaron distintos escenarios de tiempos de retención hidráulico. Además, se evalúa el potencial energético de los residuos sólidos del filtro para generar una guía integral de funcionamiento y operación del sistema propuesto en el último de los objetivos específicos. En las siguientes secciones se presenta en detalle los pasos metodológicos para la realización de los objetivos específicos.

3.1. Determinación de la variabilidad de generación de aguas residuales en la zona de estudio

La comunidad de Santa Elena de Monteverde, ubicada en la provincia de Puntarenas ($10^{\circ}17'23''$ N, $84^{\circ}49'30''$ O), ha sido seleccionada por la representatividad de un lugar turístico, con alta variabilidad de visitación anual y la necesidad de atención de nuevas problemáticas asociadas al crecimiento de proyectos habitacionales relacionados con el turismo. La zona de estudio se ubica al norte de la provincia de Puntarenas, sobre la cordillera de Tilarán, el estudio comprende específicamente los sectores y barrios de Santa Elena, Bajo Rodríguez, Cañitas, Cerro Plano, Los Llanos, Perro Negro y Valle Bonito.

La delimitación de la zona de trabajo se realizó con acompañamiento de la ASADA Santa Elena, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y el Instituto de Monteverde. Estos sectores comprenden las comunidades que serán cubiertas por el sistema de alcantarillado sanitario encargado de trasegar el agua residual hasta la planta de tratamiento. Conociendo la sectorización de la zona de estudio aptas para conectarse al

sistema de recolección; se levanta un inventario y se determina el número total de entes generadores.

Dado el atractivo turístico que representa la zona para nacionales y extranjeros, se consultan historiales de visitación del Instituto Costarricense de Turismo para conocer el comportamiento anual. Se identifican periodos de alta y baja ocupación en Monteverde, con el fin de cuantificar los caudales máximos, mínimos y promedio de recibo.

Se selecciona un periodo de proyección para el diseño de 25 años basado en el acompañamiento de parte del AyA a la ASADA Santa Elena en el diseño del sistema de alcantarillado sanitario y estudio de prefactibilidad de construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales para la comunidad.

El cálculo de la variabilidad de volúmenes de trabajo del sector domiciliario se basó en información histórica de consumos facilitados por la ASADA, mientras que las estimaciones de caudal medio diario domiciliario de los años próximos se realizó mediante proyecciones de población futura con datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos de la sección 2.2, haciendo uso de la ecuación 4 (2).

$$P_f = P_o \cdot (1 + t)^n \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

P_f = Población futura.

P_o = Población actual.

t = Tasa de crecimiento.

n = Años de la proyección.

La variabilidad mensual de las aguas residuales (máximos y mínimos dentro de un mismo año) de la categoría comercial se estudió en relación con los cambios en las tasas de visitación anual de la zona para determinar un patrón que considere ambos comportamientos, mientras que del historial de consumo de esta categoría se realizó un ajuste de crecimiento lento para estimar el incremento en los caudales de aguas residuales

provocados por un sector turismo en desarrollo durante los próximos años para la zona de estudio.

La sumatoria de los aportes de las distintas categorías de consumo para el periodo establecido determinan el volumen de diseño con el caudal medio diario total de recibo en la planta de tratamiento (Q_{md}), calculado mediante la ecuación 5.

$$Q_{md} = Q_{dom} + Q_{com} + Q_{ins} + Q_{ind} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

Q_{dom} = Caudal de aguas residuales de origen doméstico (m^3/d).

Q_{com} = Caudal de origen comercial (m^3/d).

Q_{ins} = Caudal institucional (m^3/d).

Q_{ind} = Caudal industrial (m^3/d).

3.2. Diseño de un filtro anaeróbico a escala de laboratorio para el estudio de la variación de los tiempos de retención hidráulica para los caudales máximos y mínimos

Se construyeron dos filtros de PVC para replicar un sistema FAFA a escala, en este se compararon dos sustratos de capa fija comúnmente utilizados de acuerdo con las revisiones de literatura, esto permite determinar cuál ofrece mayor adhesión de las comunidades microbianas, de modo que se realizan comparaciones entre filtros para probar el efecto del sustrato de capa fija sobre el proceso de depuración. La Figura 5 muestra un esquema del funcionamiento del FAFA construido. El principio de alimentación es por gravedad, evitando el uso de equipo mecánico.

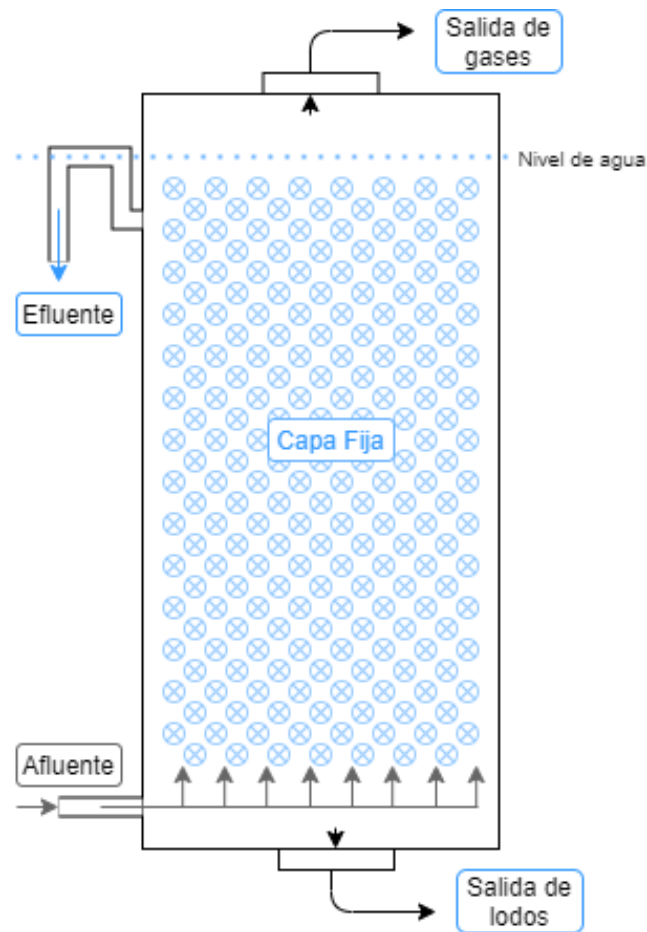


Figura 5. Esquema de funcionamiento del filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)

El diseño preliminar del modelo a escala se construyó con la herramienta computacional Autodesk Inventor Professional. En el diseño, el agua residual se recibe en el recipiente “A” (Figura 6). Posteriormente, la apertura de válvulas permite que fluya de manera ascendente a través de los filtros, con salida de efluente en la parte superior de cada filtro. Finalmente, el efluente es colectado en los recipientes “X” y “Y” por separado, para los filtros 1 y 2 respectivamente, donde se toman muestras para análisis de calidad de aguas posteriores.

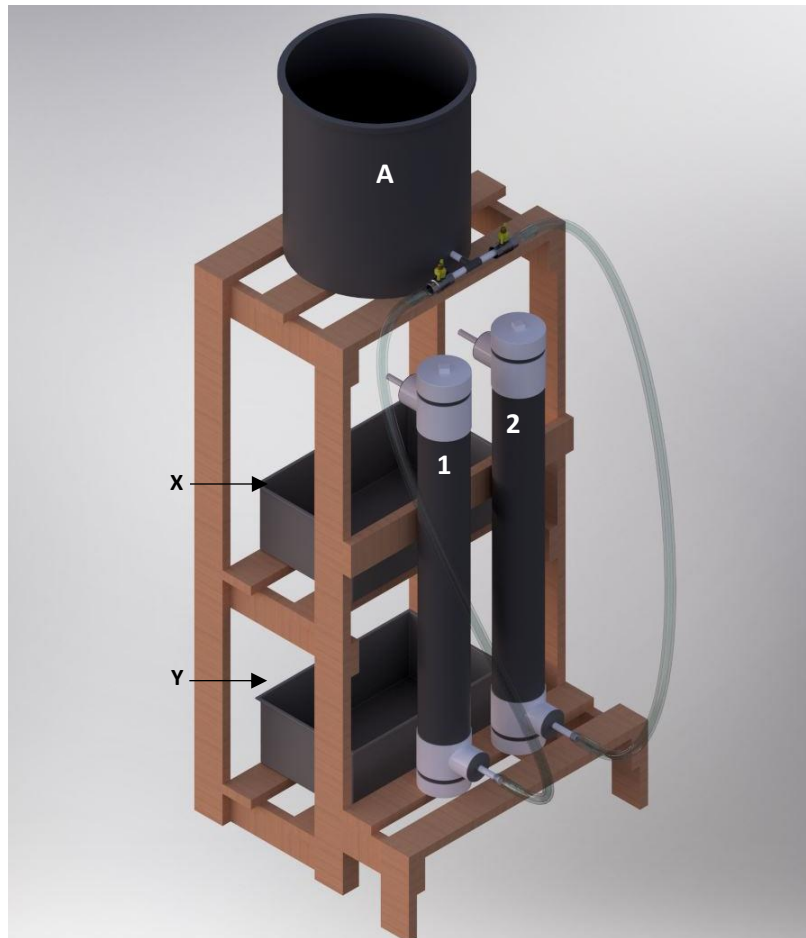


Figura 6. Concepto preliminar del modelo a escala para la construcción del prototipo

Para la medición de biogás generado en los filtros 1 y 2; se utiliza el principio de desplazamiento de líquido (Figura 7). La presión del gas que entra en botella #1; desplaza el fluido líquido hacia la botella #2 en donde se cuantifica el volumen de agua recibido equivalente al gas colectado.

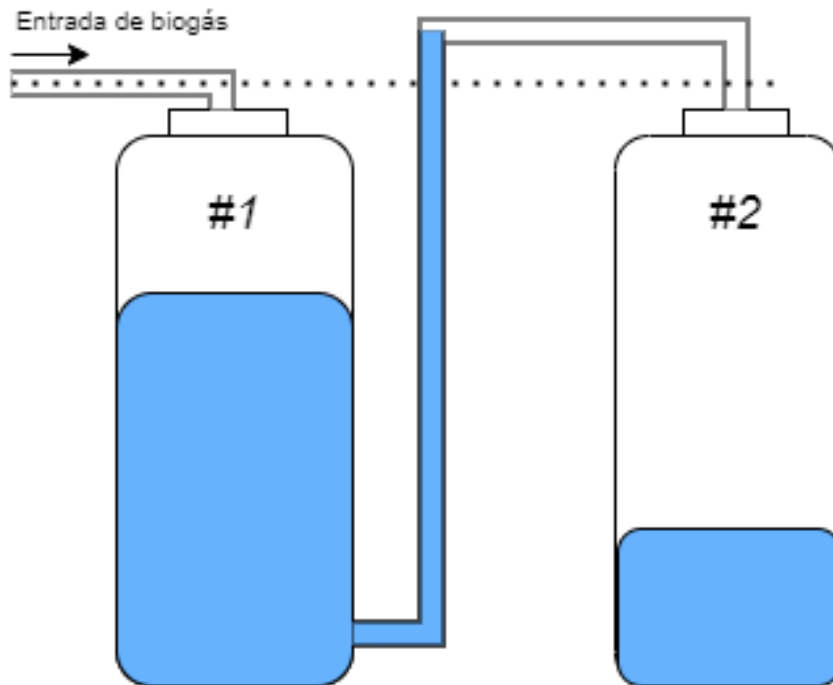


Figura 7. Esquema general de funcionamiento de contador de biogás utilizado en el modelo a escala

3.3. Estudio de medios filtrantes para la adhesión de comunidades microbianas

El modelo construido consta de dos filtros que difieren únicamente del material de capa fija en su interior, esto conlleva diferencias en las tasas de flujo por los cambios en la porosidad de los materiales (diferencia en volumen de trabajo en los filtros).

Los materiales utilizados para este proyecto son una mezcla de esferas y cubos plásticos para filtro 1 (Figura 8a) y piedra pómez para filtro 2 (Figura 8b). El criterio de selección de los materiales en uso para este proyecto se basó en 3 condiciones: accesibilidad, densidad y porosidad.



a)

b)

Figura 8. Material de lecho fijo del interior de los filtros: a) soportes plásticos y b) piedra pómez

El primer material seleccionado es una mezcla de geometrías plásticas. La configuración de los plásticos utilizados ofrece mayor porosidad con menor densidad. Las esferas tienen un diámetro de 1,4 cm y cuentan con esponja en su interior, mientras que los cubos tienen dimensiones de 1,3 cm por lado, son comúnmente utilizados en sistemas de tratamiento de aguas residuales y fueron facilitados para su uso en el proyecto por parte de la PTAR del Roble de Puntarenas administrada por el AyA.

El segundo material seleccionado es la piedra pómez; su origen volcánico le da propiedades físicas que benefician la rugosidad de su superficie. El diámetro de partícula promedio utilizado es de 3,5 cm.

3.3.1. Diseño experimental

Aclaración del autor: Durante la realización del presente proyecto, la pandemia ocasionada por el virus SARSCoV-2 tuvo un impacto en el acceso para la utilización de agua residual en el experimento. A la fecha de realización del proyecto (enero 2020 – noviembre 2021), no se conoce el grado de transmisibilidad de esta enfermedad por manipulación de aguas residuales humanas. Para la continuación del desarrollo

experimental, se decidió sustituir el agua residual residencial por un agua preparada con excreta animal.

El agua residual proviene de una granja porcina ubicada en Jaris del cantón de Mora (9°52'28" N, 84°16'55" O). La granja porcina cuenta con más de 100 cerdos y 3 lagunas de sedimentación colocadas en serie con colector de biogás para uso domiciliario en labores de cocina. La recolección del agua cruda se realizó semanalmente, se tamizó para eliminar sólidos de mayor tamaño y se almacenó a 4°C hasta ser utilizada. Se realizaron pruebas de laboratorio para ajustar las concentraciones de sólidos volátiles tomando como referencia el Trabajo Final de Graduación de Johel Venegas (51) quien en su desarrollo caracteriza el afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la facultad de Odontología de la Universidad de Costa Rica. Esto fue necesario para establecer una receta de dilución para el plan experimental del proyecto.

La inoculación de los filtros se realizó con lodo biológicamente activo de un reactor anaeróbico industrial de una granja avícola. Este material es ingresado en los filtros y dejado en reposo para estimular el crecimiento de los microorganismos sobre las paredes internas para preparar el medio microbiano. La circulación de aguas residuales a través de los filtros inicia un día después de la inoculación.

El afluente fue dosificado en los filtros tres veces por día (mañana, tarde y noche) para imitar el comportamiento de recibo de una planta de tratamiento de comunidades rurales, donde los picos de caudal se ajustan a las horas en que los habitantes realizan sus actividades en los hogares principalmente.

Los TRH seleccionados fueron 0,5 d y 1 d. Los filtros funcionaron primeramente durante nueve días para que el sistema se adapte al cambio de caudal antes de tomar la muestra para análisis. La selección del TRH más eficiente y el material de capa fija más adecuado requirió realizar dos experimentos, titulados: experimento 1 y experimento 2 (Figura 9).

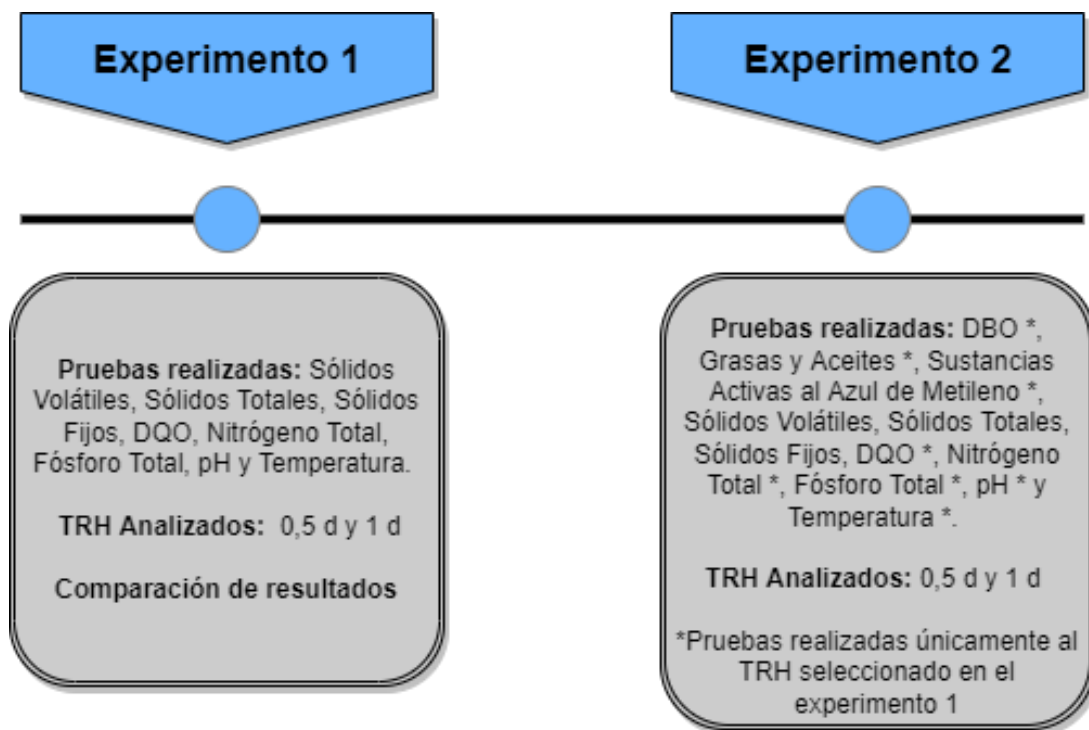


Figura 9. Esquema de operación de los filtros a escala de laboratorio para la sección experimental

El experimento 1 se realizó para determinar el TRH que ofrece mejores rendimientos de remoción de carga orgánica y nutrientes para ambos filtros. Durante esta prueba se utilizó un único lavado de filtros al inicio del experimento con el objetivo de desaguar el material sedimentable acumulado en el interior durante el periodo de estabilización. El lavado consistió en operar el sistema con aguas residuales fluyendo en sentido contrario, para esto se extrajo el volumen de lodos equivalente a la tasa de flujo diaria correspondiente al TRH en uso, es decir, para un caso donde se alimentan 6 litros de aguas residuales para un TRH de 1 día; se extrajeron 6 litros por la salida inferior del filtro eliminando así los lodos acumulados.

En experimento 2, se operó el sistema bajo los dos TRH, sin embargo, se seleccionó el escenario con el TRH que brindó mayor rendimiento durante el experimento 1 para el análisis completo, en el que se estudió parámetros de DBO, grasas y aceites, nitrógeno total y sustancias activas al azul de metileno en el Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental (CICA), mientras que para las pruebas restantes se utilizaron los laboratorios de Bioenergía e Investigaciones Varias de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica,. Se siguieron metodologías normalizadas para el análisis de agua potable y agua residual de la Asociación Americana de Salud Pública (APHA por sus siglas en inglés) (52). Las pruebas realizadas se presentan en las secciones 3.3.1.1 a 3.3.1.5.

En este experimento se estudió también el efecto de la retención de biomasa en el sustrato de capa fija al comparar los rendimientos en remoción de S_v del experimento 1 y 2 entre TRH equivalentes:

- Resultados de S_v de experimento 1 contra resultados de S_v de experimento 2, ambos bajo un TRH de 0,5 d.
- Resultados de S_v de experimento 1 contra resultados de S_v de experimento 2, ambos bajo un TRH de 1 d.

El estudio de la adhesión de los microorganismos sobre las superficies de la capa fija se analizó a través de la reducción en la carga orgánica del efluente, siendo este un indicador de la actividad de los microorganismos presentes en el proceso de depuración.

3.3.1.1. Sólidos volátiles

Se analizaron las muestras en un horno marca Jeio Tech durante 24 h a 105°C para cuantificar los sólidos totales (S_T), después de medir la masa (Balanza Sartorius BCE224I, resolución a 0,001 g), las muestras se colocaron en horno mufla marca Yamato FO810CR durante 6 h a 550°C para conocer los sólidos fijos (S_F). Con los datos obtenidos se calculan los sólidos volátiles (S_v) con la ecuación 6.

$$S_V = S_T - S_F \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

S_V = Sólidos Volátiles (mg/L).

S_T = Sólidos Totales (mg/L).

S_F = Sólidos Fijos (mg/L).

3.3.1.2. Temperatura y Potencial de Hidrógeno (pH)

Las muestras del afluente y efluente fueron analizadas con el equipo HANNA HI2211 para medir la temperatura y el potencial de hidrógeno (pH), de esta forma descartar la posibilidad de que se estuviera dando acidificación dentro de los filtros, indicador de procesos anaerobios incompletos.

3.3.1.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno se midió siguiendo el Método 8000 USEPA de alto rango del “Manual de análisis de agua” (53), con el equipo HACH DR/2010 para aguas residuales. Para realizar la lectura se usó un colorímetro marca HACH DR900 después de ser calibrado con un vial de control llamado blanco.

3.3.1.4. Nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP)

La prueba de contenido de nitrógeno total se llevó a cabo siguiendo el Método de Digestión de Persulfato número 10071 Test N’ Tube Vials de bajo rango y mediante ensayos en el Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental (CICA). Para el fósforo total se siguió el método de Digestión de Molibdovanadato con Ácido Persulfato número 10127 Test N’ Tube Vials de alto rango. Ambos métodos del manual de Análisis de Agua HACH (53) utilizando un reactor HACH DR/2010 y el método colorimétrico con equipo HACH DR900.

3.3.1.5. Comparación de rendimientos

El porcentaje de remoción en la concentración de los parámetros analizados se determinó con ecuación 7 mostrada a continuación:

$$Rendimiento (\%) = 1 - \frac{c_a(mg/L)}{c_e(mg/L)} \cdot 100 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

C_a = Concentración del contaminante o nutriente en el afluente (mg/L).

C_e = Concentración del contaminante o nutriente en el efluente (mg/L).

El criterio de desempeño de los filtros se basó principalmente en la reducción de los parámetros de S_T , S_V y DQO ya que estos valores son proporcionales a la cantidad de materia orgánica degradable de una muestra.

3.4. Estimación del potencial de bioquímico de metano de los sólidos generados

Para estimar el potencial de generación de biogás de los sólidos sedimentables y biomasa generada en los filtros se tomaron muestras de lodos de ambos filtros al finalizar la última repetición del experimento y se mezclaron con inóculo de procesos de digestión anaerobia proveniente del beneficiado de café en una relación 1:2 (1 parte de lodo por cada 2 partes de inóculo) para la valorización de este subproducto de la depuración de las aguas residuales como fuente de generación de energía mediante la digestión anaerobia. Se utilizó la metodología de Faivor *et al* (54) para la realización de los ensayos (Figura 10).



a)

b)

Figura 10. Ensamble de ensayo BMP con incubadora, a) almacenaje de las muestras, b) control de temperatura en baño maría

3.5. Diseño del sistema FAFA para la zona de impacto en Monteverde

La capacidad volumétrica del FAFA es calculada de la forma que detalla Centeno (55) en su análisis comparativo de tecnologías de tratamiento de aguas residuales haciendo uso de la ecuación 8. El cálculo del dimensionamiento depende únicamente de las características hidráulicas del caso que se encuentre en estudio tomando como parámetros de entrada el caudal y el TRH. Esta ecuación tiene como parámetro de entrada un coeficiente adimensional que contempla de manera general el volumen ocupado por la capa fija del FAFA además de otorgar un factor de seguridad en el dimensionamiento del diseño.

$$V_f = 1,60 \cdot Q_{md} \cdot TRH \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

V_f = Volumen final del FAFA (m^3).

1,60 = Coeficiente (adimensional).

Q_{md} = Caudal medio diario de aguas residuales (m^3/d).

TRH = Tiempo de Retención Hidráulico (d).

Con la información obtenida en el objetivo específico 1; del estudio de generación de aguas residuales de la zona de trabajo y la comparación multi criterio de los resultados de análisis de calidad de aguas del prototipo a escala en el objetivo específico 3; se reúnen los parámetros de la ecuación anterior para el cálculo volumétrico del filtro. De acuerdo con las dimensiones seleccionadas, se elaboran los planos con vistas de planta e ilustraciones de la apariencia final del sistema.

Se desarrolló un plan de mantenimiento y operación del equipo diseñado para garantizar las condiciones de trabajo que aseguren un rendimiento adecuado del sistema. Este plan toma en cuenta tasas de producción de lodos, lavados oportunos y utilización del total de la capacidad de diseño.

3.6. Análisis de datos

El análisis estadístico se realizó mediante las herramientas computacionales Excel e InfoStat. Inicialmente fue necesario evaluar criterios de normalidad de datos. Para esto, se construyeron histogramas que muestran la distribución de los residuos para determinar si los datos incluyen valores atípicos y gráficos de probabilidad normal para comprobar que los residuos están distribuidos normalmente siendo respaldado por el método de Shapiro-Wilks (Anexo 1). Al obtenerse la aprobación de los parámetros previos se procedió a calcular los ANOVA para determinar si las medias de dos o más resultados son iguales estadísticamente, por último, se realizan pruebas de Tukey para probar las diferencias entre las medias de los resultados obtenidos.

La comparación estadística mediante ANOVAS se utilizó inicialmente para verificar cuál de los TRH analizados presenta mejores rendimientos y con esto minimizar el número de pruebas realizadas en los análisis posteriores. Estos análisis posteriores constan de la comparación completa de los parámetros que exige la Ley de vertidos y reúso de aguas residuales para comparar cuál de los materiales de capa fija en los filtros resulta más efectivo bajo el TRH seleccionado.

4. RESULTADOS

4.1. Determinación de la variabilidad de generación de aguas residuales en la zona de estudio

4.1.1. Delimitación de la zona de estudio

Del estudio de prefactibilidad realizado por el AyA (56) se extrajeron las zonas de aporte para el sistema de tratamiento propuesto, que se delimita en la Figura 11. Según este estudio, la cobertura del sistema de recolección depende directamente de las características particulares de cada sector, dejando por fuera los sectores que requieran atención mediante estrategias semi o totalmente descentralizadas, incluso considerándose otras alternativas de gestión de aguas residuales a mediano o corto plazo para alcanzar el máximo de cobertura en el plan de manejo de residuos líquidos de la ASADA.

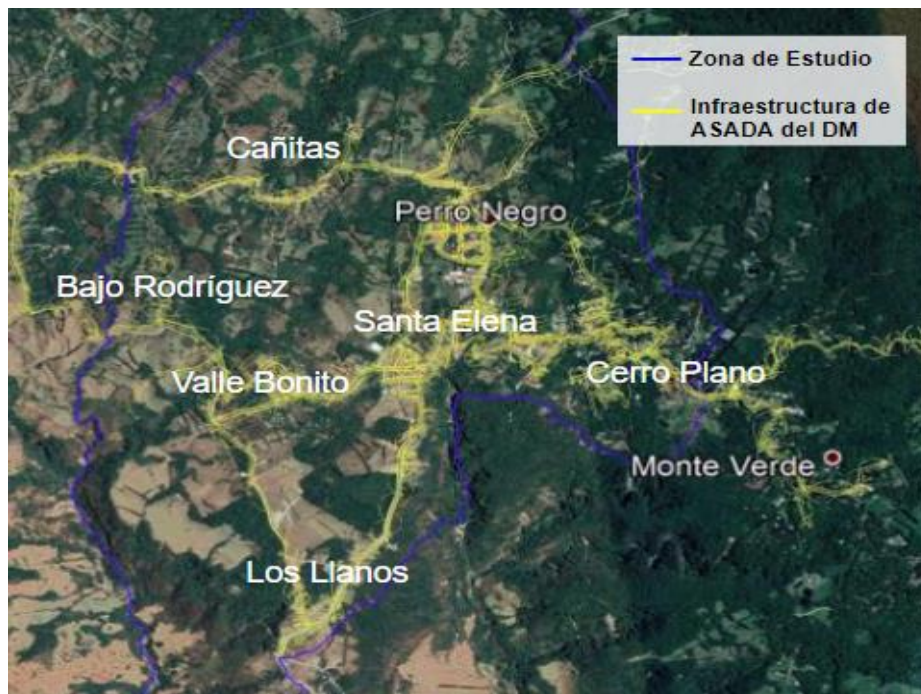


Figura 11. Delimitación del área de influencia del acueducto del Cantón de Monteverde (DM), incluyendo los límites del Cantón Municipal y los límites de la Zona de Estudio

Fuente: AyA (56)

4.1.2. Estimación del caudal de diseño

4.1.2.1. Caudal de origen domiciliar

Tomando el valor de consumo promedio mensual por abonado del sector domiciliar de 20,4 m³ de la Tabla 1 (sección 2.2) y el factor de hacinamiento de 3,2 (sección 2.2); se tiene una dotación de 212,4 litros por habitante por día (L/hab·día). Comparado con el consumo promedio de 475,5 L/hab·día de los acueductos administrados por Municipalidades reportado en el análisis sectorial de agua potable y saneamiento del AyA (57); Monteverde cuenta con una dotación mucho menor que el promedio, haciendo que el tamaño del sistema de tratamiento sea menor que en otras zonas de Costa Rica.

Para el cálculo de caudal futuro del sector domiciliar es necesario conocer la cantidad de población esperada para el año límite de diseño. Con el uso de la ecuación 4 (sección 3.1) se calculó un total aproximado de 1869 domicilios, bajo el supuesto de conservar el factor de hacinamiento de 3,2; esta cifra representa un total de 6067 habitantes para el año 2043 (Anexo 2).

Haciendo uso de la ecuación 1 y considerando un coeficiente de retorno sanitario del 80%, se tienen los caudales residuales domésticos (Q_{dom}) respectivos para el año 2018 y para el año 2043 resumidos en la Tabla 3 y ampliados en el Anexo 3.

Tabla 3. Caudales de aguas residuales generadas para el año de toma de datos (2018) y los esperados para el 2043 contemplando el aumento de población

Año	Cantidad de habitantes	Caudal residual (m ³ /d)
2018	3 981	676,4
2043	6 067	1 031

4.1.2.2. Caudal de origen comercial

La condición anual del turismo es importante de tomar en cuenta cuando la afluencia de visitantes podría alterar el volumen de agua residual de recibo. Monteverde, posee una asombrosa variedad de flora y fauna debido a las condiciones climáticas que encierran el bosque nuboso. Estas cualidades favorecen el atractivo para nacionales y extranjeros.

La visitación de Monteverde está relacionada con las tasas variables de consumo de agua potable del sector comercial; esta categoría de consumo posee el rango más amplio con más de 17500 m³ de diferencia entre los meses con el valor máximo y mínimo reportados durante el periodo de estudio.

De acuerdo con la disponibilidad de datos de visitación se selecciona la información de consumo de agua potable del sector comercial correspondiente al año 2016 para trasponer la información en un mismo gráfico (Figura 12).

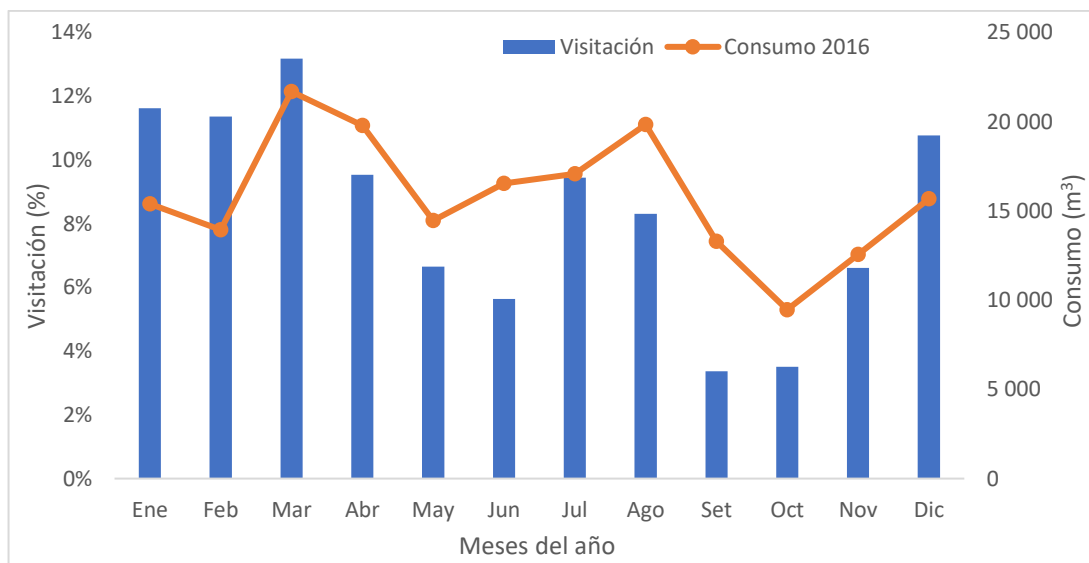


Figura 12. Distribución anual relativa de la población turística en Monteverde basado en datos de visitación de la Reserva de Monteverde entre el 2014 y 2016 y datos de consumo de agua potable del sector comercial para el año 2016

Fuente: (25)

Tal como se muestra en el gráfico de la Figura 12, el patrón de consumo del sector comercial tiene un comportamiento similar a los cambios en las tasas de visitación. Para el año 2016, marzo es el mes con mayor consumo de agua potable (21685 m³) y es el mismo en el que se reporta el porcentaje más alto de concentración de visitantes con un 13% del total anual. Por el contrario, el mes de octubre reporta el menor valor de consumo (9463 m³) con tan solo 4% de visitación anual.

Así como el caudal de aguas residuales de origen doméstico fue calculado para el año 2018 de acuerdo con la disponibilidad de datos poblacionales; se toman los valores correspondientes al consumo de agua potable promedio del sector comercial para el cálculo del volumen de aguas residuales generados durante el mismo año.

La estimación del caudal de aguas residuales comerciales futuras proyectado al año 2043 se ha calculado según una regresión de curvas de crecimiento lento; de acuerdo con el comportamiento de los datos disponibles de consumo. Los datos analizados fueron respectivos a los años del 2016 al 2019, dejando de lado la situación atípica del 2020 vivida por el COVID-19. La ecuación obtenida del comportamiento logarítmico fue utilizada para evaluar el año de interés. La selección de un ajuste logarítmico se basa en que el crecimiento de la curva tiende a cesar, este comportamiento es comparable con la tasa creciente de visitación de un sitio determinado, donde las limitaciones de espacio, construcción de infraestructura y ocupación no permiten que el aumento sea infinito (Figura 13).

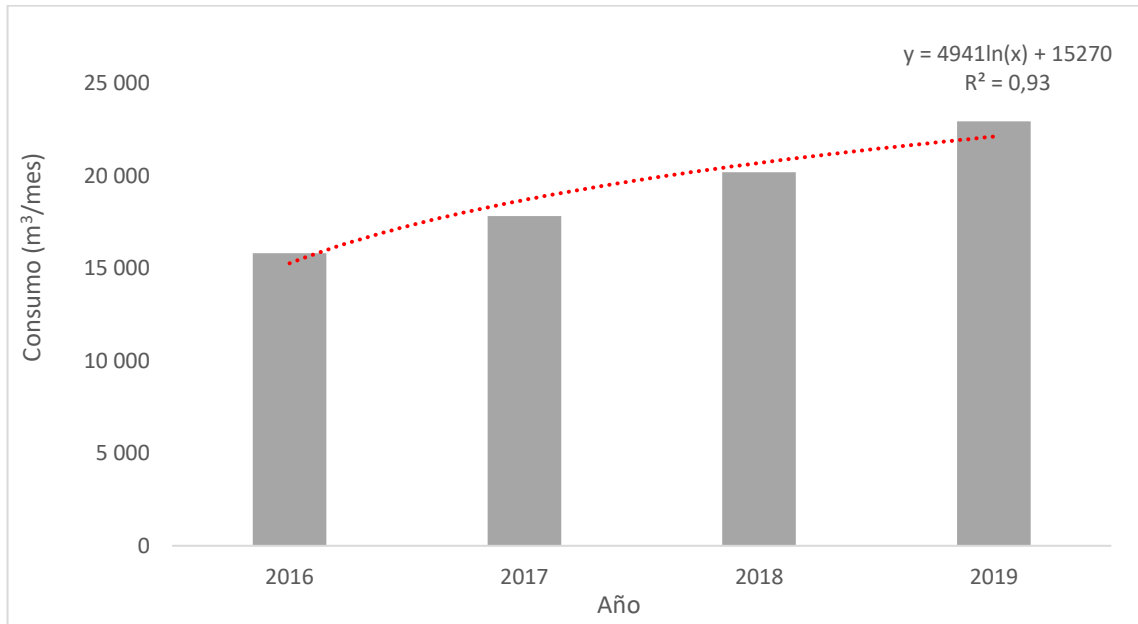


Figura 13. Ajuste de línea de tendencia logarítmica en datos de consumo del sector comercial

El coeficiente de determinación (R^2) de 0,93 es cercano a la unidad, y bajo los objetivos de este trabajo de graduación se considera adecuado entre los datos de campo y el ajuste de la regresión planteada para la estimación. En la ecuación de ajuste del gráfico se evalúa el año de interés. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de caudales de consumo y de generación de aguas residuales del sector comercial durante el 2018 y su proyección al 2043

Año	Caudal consumo (m³/d)	Caudal residual (m³/d)
2018	673,3	538,6
2043	1054,2	843,4

4.1.2.3. Caudal de origen institucional e industrial

En esta sección se engloban las categorías preferenciales y de gobierno. El sector preferencial está compuesto de Asociaciones de Desarrollo, Escuelas e Iglesias, mientras que la categoría de Gobierno se conforma por el Consejo Municipal, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Oficinas de la Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Organismo de Investigación Judicial (OIJ), Bomberos, entre otras. Ambas categorías combinadas reportan un consumo promedio diario de agua potable para el año 2018 de 58,9 m³, lo que representaría un volumen de aguas residuales de 47,2 m³/d (coeficiente de retorno sanitario de 80%). Debido a que estas categorías combinadas suman únicamente el 3,7% del total y además presentan un consumo constante durante el periodo de estudio (2016-2020); se utiliza el valor máximo reportado para el cálculo de caudal futuro. Con esto se pretende mantener un factor de seguridad en el que un posible crecimiento en el consumo de esta categoría llegue a mantenerse constante en el que actualmente es el caso crítico; referido al pico máximo reportado. Se tiene entonces:

Tabla 5. Caudal de consumo promedio y máximo de las categorías Preferencial y de Gobierno para el cálculo de aguas residuales esperadas para el periodo de diseño

Evaluación	Caudal consumo (m³/d)	Caudal residual (m³/d)
Promedio	58,9	47,2
Máximo	88,4	70,7

Para el caudal de aguas residuales de origen industrial, no se identifican industrias importantes y por esto el valor asociado al caudal industrial (Q_{ind}) de la ecuación 5 es despreciable.

4.1.2.4. Resumen de caudales de aguas residuales generados en la zona de estudio

Los datos de consumo para el 2018 y su proyección para el 2043 obtenidos en las secciones anteriores se resumen en la Tabla 6. El incremento de los volúmenes de generación de aguas residuales durante el periodo de diseño debe ser considerado a la hora de establecer el dimensionamiento de las estructuras de tratamiento. Para el caso de estudio, las categorías domiciliar, comercial e institucional analizadas presentan incrementos de 33,4%, 36,1% y 33,3% respectivamente. La estabilidad de las categorías presenta crecimientos uniformes ligados al desarrollo de las actividades comerciales, pero dependen de múltiples factores que podrían atrasar estas predicciones. Los cambios en las actividades comerciales, además, pueden modificar el comportamiento de las demás categorías, al involucrar, por ejemplo, el uso de nuevas modalidades de atención a los visitantes como “Airbnb” (servicio de alojamiento) que reflejarían cambios también en las proyecciones del sector domiciliar.

Tabla 6. Resumen de caudales promedio diarios de aguas residuales generados por categoría para el 2018 y 2043 en la zona de Monteverde de Puntarenas

Categoría	2018	2043
Domiciliar (m ³ /d)	676,4	1031
Comercial (m ³ /d)	538,6	843,4
Institucional (m ³ /d)	47,2	70,7
Industrial (m ³ /d)	0	0
Total (m³/d)	1262,2	1945

4.2. Diseño de un filtro anaeróbico a escala de laboratorio para el estudio de la variación de los tiempos de retención hidráulica para los caudales máximos y mínimos

La Figura 14 muestra el sistema utilizado para la evaluación de los TRH seleccionados para el estudio (12 h y 24 h). Tomando como guía el modelo dibujado con la herramienta computacional; se construyen dos filtros para este proyecto con una capacidad de 6,08 L cada uno. En la Tabla 7 se calculan los caudales teóricos diarios de agua residual para su logística de recolección.

Tabla 7. Caudal de trabajo en función de los cambios en los tiempos de retención hidráulicos utilizados en los filtros de 6,08 L de capacidad

Tiempo de Retención Hidráulico		Caudal por cada filtro*	Total requerido*
Horas	Días	(L/d)	(L/d)
24	1,00	6,08	12,16
12	0,50	12,16	24,32

*El caudal teórico de trabajo, sin contemplar el cambio por la porosidad del material de capa fija.

El sistema consta de un recipiente de 55 L en la parte superior para almacenamiento del afluente (A, Figura 14a). La apertura de válvulas de entrada (B, Figura 14a) provoca el ingreso del agua residual en cada filtro de manera ascendente por diferencia de potencial, de manera que no requiere energía adicional a la de la gravedad. La salida del agua tratada se ubica en la parte superior trasera de cada filtro y separa el efluente en dos recipientes independientes para su análisis respectivo. Para la salida de los lodos acumulados dentro del filtro se colocaron válvulas inferiores en cada filtro para desagüe (C, Figura 14a). El cierre de las válvulas después de cada alimentación fue necesario en este prototipo para que el aumento de presión provocado por el biogás encontrara una única salida a través del sistema contador (D, Figura 14b).

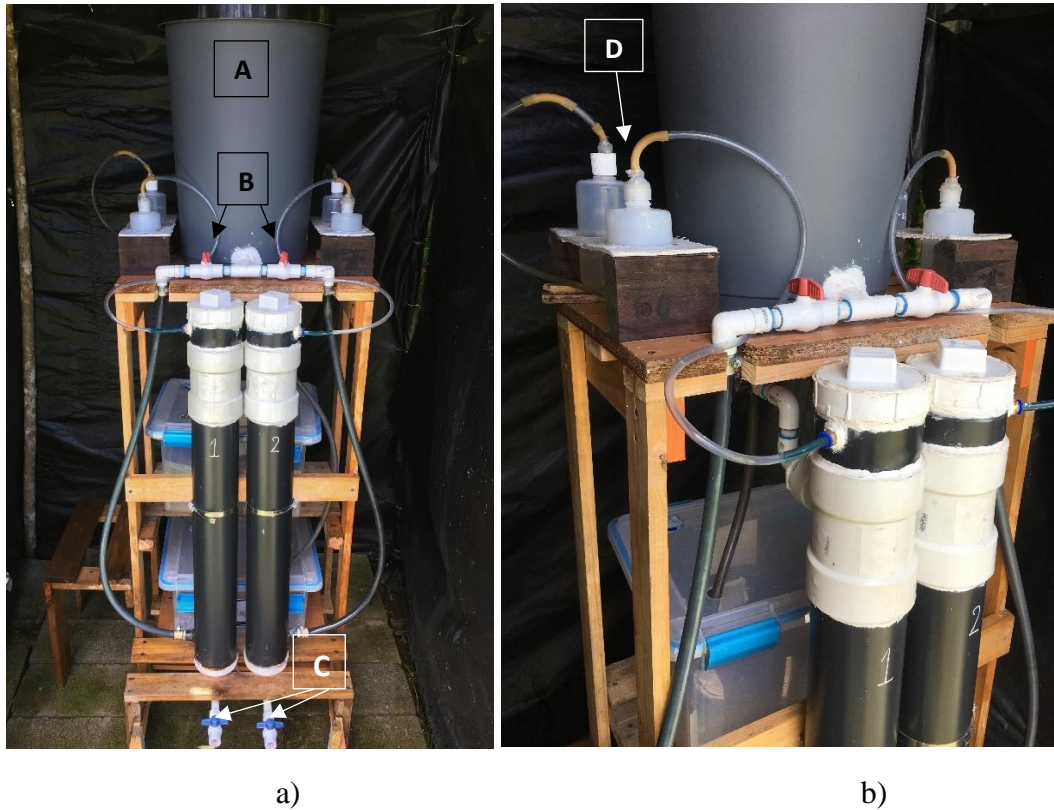


Figura 14. Prototipo construido para el diseño experimental. En a) vista general del sistema y b) acercamiento que visualiza tubería del efluente

El material de capa fija está contenido dentro de un compartimiento que divide el interior de los filtros en 3 secciones, la parte inferior de cada filtro es una zona libre de capa fija con una capacidad de 0,8 L (alrededor de 13% del filtro) que permite el ingreso uniforme del agua residual y la acumulación de lodos, seguido del material de capa fija que representa el cuerpo principal del filtro hasta aproximadamente el 90% de la altura total, donde se acumula el biogás generado antes de salir hacia el contador. Las proporciones de las cámaras del modelo son utilizadas para el escalamiento de diseño final.

La Figura 15 muestra el contador en su máxima capacidad de lectura. Al llenarse el recipiente de biogás, se devuelve manualmente el volumen de agua de la botella #2 a la #1 para continuar con la lectura. Según las variaciones obtenidas, fue necesario reiniciar el

contador de 2 a 4 veces por día, lo que funcionó como un indicador de actividad anaerobia dentro de los filtros. Al contar con flujo continuo de aguas residuales, las bacterias anaerobias obtienen alimento para continuar con su ciclo de reproducción.

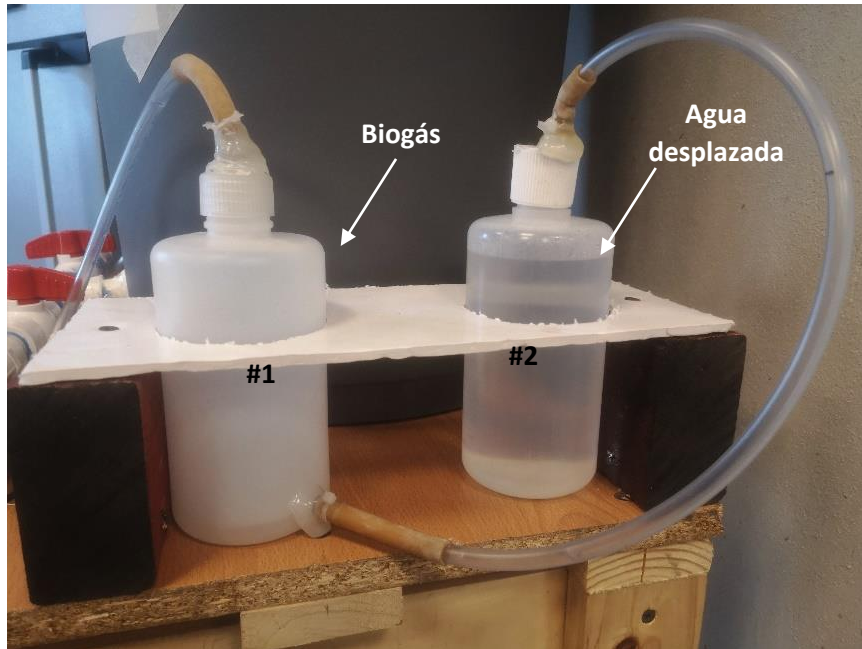


Figura 15. Contador de biogás por desplazamiento en su máxima capacidad de lectura (500 mL)

4.3. Estudio de medios filtrantes para la adhesión de comunidades microbianas

El material de soporte dentro de los filtros es una característica estructural de los FAFAs que lo diferencian de otros sistemas de tratamiento de aguas residuales con funcionamiento similar. Este material debe estar contenido por barreras físicas (principalmente en el fondo) que permitan la acumulación de lodos y la entrada uniforme del afluente. El objetivo de esta sección es poner a prueba dos materiales distintos como medio de capa fija de los filtros para evaluar si existen diferencias significativas en el rendimiento asociadas al material en uso.

Para el caso del diseño a escala se construyeron dos cilindros de 100 mm de diámetro (4 pulgadas) con malla plástica y varilla de acero inoxidable para mejorar el soporte y contener el material, con el objetivo de controlar los espacios dentro del filtro y facilitar la extracción al finalizar las pruebas (Figura 16). Las propiedades de los medios de soporte fueron medidas y son presentadas en la Tabla 8.



Figura 16. Sostén del material de capa fija en el interior de cada filtro. A la izquierda mezcla plástica de filtro 1, a la derecha piedra pómez de filtro 2

Tabla 8. Características físicas de los medios de soporte de capa fija

Material filtrante	Densidad del material (kg/m³)	Porosidad inicial (%)	Aspecto de la superficie
Mezcla plástica	199,5	71,7	Liso
Piedra Pómez	441,8	52,5	Rugoso

El filtro con mezcla plástica cuenta con 19,2% más de capacidad volumétrica debido a que la configuración del material es hueca y la relación entre área superficial/volumen es mayor que el filtro con piedra pómez. Esta diferencia porcentual en la porosidad es una ventaja del material plástico ya que la selección de un material que cuente con alta porosidad ayuda a maximizar la capacidad volumétrica.

4.3.1. Caracterización del agua residual de entrada

Se toma como referencia el proyecto de tesis de Venegas (51) para seleccionar el rango de concentración de sólidos totales, fijos y volátiles a los que se debe de llevar la dilución, basado en el análisis de calidad de aguas que realiza el autor en la PTAR de la facultad de Odontología de la Universidad de Costa Rica (UCR). De forma que la concentración de materia orgánica de las aguas residuales utilizadas en este proyecto sea comparable con las de operación de un sistema de aguas residuales ordinarias.

De las pruebas realizadas para ajustar las concentraciones de sólidos fijos, totales y volátiles en las muestras, se obtiene una receta de dilución que consiste en disolver 1 parte de agua residual cruda en 7 partes de agua potable para la mezcla de alimentación. En la Tabla 9 se detalla la caracterización realizada al agua cruda de granja porcina, la dilución a la que se llevó la muestra de agua cruda y el afluente de la facultad de Odontología.

Tabla 9. Caracterización del afluente de origen animal utilizado en la sección experimental y afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la facultad de odontología ^a

Parámetro *	Agua cruda de Porqueriza	Dilución (1:7) de Porqueriza	Afluente de PTAR Odontología ^a
pH	7,1 ± 0,2 (A)	7 ± 0,1 (A)	6,92 ± 0,6 (A)
Temperatura (°C)	18 ± 5,2 (A)	17 ± 0,6 (A)	22,8 ± 1,58 (A)
Sólidos Totales (mg/L)	7147 ± 271,4 (A)	1331 ± 138 (B)	2293 ± 670 (B)
Sólidos Fijos (mg/L)	1724 ± 34,2 (A)	300 ± 226,5 (B)	1246 ± 403 (A)
Sólidos volátiles (mg/L)	5423 ± 240,6 (A)	1030 ± 169 (B)	1047 ± 320 (B)

*: Letras iguales en una misma fila (Ej.: (A) y (A)) significa: No hay diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las muestras. Letras distintas en una misma fila (Ej.: (A) y (B)) significa: Hay diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las muestras.

a: Datos tomados de (51).

Del análisis de varianza realizado entre las muestras se encuentra que, utilizando una dilución de 1:7 no se obtienen diferencias significativas en las pruebas de pH, temperatura, sólidos totales y volátiles en comparación con el afluente de la PTAR de Odontología. Con esto, el uso de la receta mencionada permite comparar estadísticamente el agua de la PTAR con la dilución preparada para la sección experimental.

4.3.2. Sólidos volátiles como criterio de selección

Para el estudio del sistema de tratamiento secundario, la disminución de sólidos volátiles del afluente es el indicador seleccionado para evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica en el agua residual. Los resultados obtenidos en el prototipo, para cada uno de los medios filtrantes, se presentan en la Tabla 10; para los dos tiempos de retención hidráulicos estudiados.

Las concentraciones de sólidos volátiles en las aguas de entrada presentan rangos que varían de acuerdo con las condiciones de las muestras crudas, sin embargo, los resultados de los análisis de varianza entre las muestras de afluente reportan que las

diferencias de concentraciones entre TRH equivalentes para experimento 1 y 2 no son estadísticamente significativas ($p = 0,730$ con $\alpha = 0,05$ para TRH = 0,5 días y $p = 0,287$ con $\alpha = 0,05$ para TRH = 1 día).

Tabla 10. Reducción de sólidos volátiles en el proceso de depuración ^a

Experimento	TRH (d)	Sólidos Volátiles (mg/L)			Reducción (%)	
		Entrada	Salida Filtro 1	Salida Filtro 2	Filtro 1	Filtro 2
1	1	826,7 ± 71,8	278,7 ± 36,1	504,0 ± 22,3	66,3	39
	0,5	908,9 ± 39,8	348,9 ± 111,9	283,3 ± 38,4	61,6	68,8
2	1	846,7 ± 60,2	236,0 ± 31,7	221,3 ± 61,5	72,1	73,9
	0,5	1166,7 ± 158,2	277,3 ± 68,2	374,7 ± 67,0	76,2	67,9

a: Filtro 1 es capa fija plástica y Filtro 2 capa fija con piedra pómez.

En el experimento 1, para el filtro 1 (sustrato plástico), se muestra que el rendimiento en la remoción de sólidos volátiles disminuye de 66,3% a 61,6% cuando se disminuye el TRH de 1 día a 0,5 días, este fenómeno se puede relacionar con varios aspectos, entre estos se puede mencionar el arrastre del material colmatado provocado por el aumento en la velocidad del flujo, por el desprendimiento de los microorganismos de las paredes del material de soporte debido a las características de la superficie del material con poca rugosidad, o bien, por la disponibilidad de materia orgánica (mg/día).

Pese a esta reducción porcentual, las diferencias en los rendimientos no son significativas estadísticamente ($p = 0,359$ con $\alpha = 0,05$), por lo que al utilizar un filtro con material de capa fija plástica no resulta determinante ajustarse específicamente a uno de los dos tiempos de retención estudiados, lo que le concede a este filtro la capacidad de trabajar con un rango amplio de caudales sin afectar significativamente sus rendimientos en

remoción de S_v . Esto es ventajoso para el material plástico, debido a que, si bien se busca operar el sistema con TRH bajos para reducir el tamaño del diseño, es común que se cuente con variaciones en los caudales de generación de aguas residuales. Esto inevitablemente provoca variaciones en los tiempos de retención hidráulicos. Por el contrario, en el filtro 2 (piedra pómez), bajo el mismo escenario, los cambios en el TRH alteran significativamente el rendimiento en la remoción de S_v ($p = 0,001$ con $\alpha = 0,05$) presentando mayor eficiencia en tiempos de retención bajos.

Adicionalmente, el experimento 1 muestra que, al comparar bajo un mismo TRH, el filtro 1 es más eficiente que el filtro 2 para remover materia orgánica cuando $TRH = 1$ día; y que se comportan de manera similar cuando $TRH = 0,5$ días.

El comportamiento del experimento 2 difiere del experimento 1 a causa del lavado que se realizó para cada TRH; bajo este escenario, pese a que hubo mayor evacuación de lodos acumulados se observan en promedio rendimientos de remoción de materia orgánica más elevados, producto de comunidades microbianas estabilizadas adheridas efectivamente al medio de capa fija.

De acuerdo con los análisis de varianza solamente existen diferencias significativas en el filtro 2 al comparar el experimento 1 y 2 bajo un $TRH = 1$ día ($p = 0,002$ con $\alpha = 0,05$). En los demás escenarios, no hay un impacto en la acumulación de biomasa después del retro-lavado, con lo cual se puede inferir que el microbioma que se encarga de efectuar la disminución de la carga orgánica en el agua residual está bien anclada a ambos sustratos.

Después de finalizar la sección experimental, los filtros fueron abiertos para examinar la adhesión de las comunidades microbianas sobre la superficie de la capa fija (Figura 17).

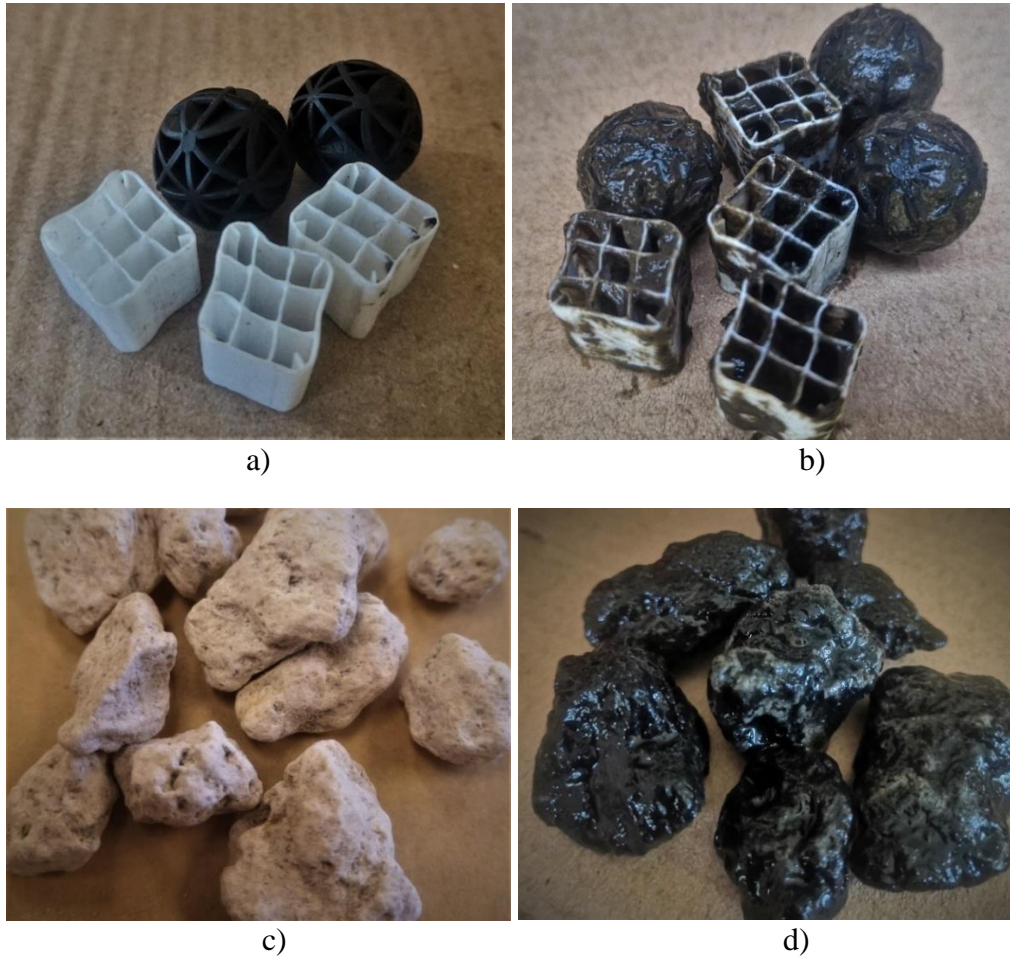


Figura 17. Comparación visual de material de capa fija al inicio y fin de la sección experimental

De la Figura 17 se puede observar que, aunque la matriz de capa fija plástica presenta mayor superficie de contacto, no necesariamente es aprovechada en su totalidad por los microorganismos debido a que la rugosidad de la superficie no favorece su adherencia. La imagen a) y b) de la Figura 17 demuestran que las paredes exteriores de las unidades plásticas color blanco no son buenas ofreciendo fijación por tener una superficie lisa, esta situación genera que el flujo de las aguas residuales arrastren parte del material poco fijado o bien que este sea desprendido y acumulado en el fondo del filtro, mientras que las unidades esféricas se muestran saturadas debido a la configuración con estrías que

permiten acumulación continua de microorganismos. Las imágenes c) y d) revelan buena cobertura en los orificios de la superficie de la piedra pómez, lo que en un inicio tenía un aspecto poroso resultó ser recubierto de una película viscosa de color oscuro que refleja ser una buena superficie de contacto.

Pese a que las condiciones de rugosidad de una parte del material plástico del filtro 1 parecieran no favorecer la fijación de los microorganismos, la relación área superficial/volumen le otorgan rendimientos estables bajo los escenarios puestos a prueba. Lo descrito en los párrafos anteriores resulta importante como criterio de selección del material de capa fija, ya que es necesario establecer un material que sea capaz de brindar estabilidad en los rendimientos ante tiempos de retención hidráulicos cambiantes como producto de la variabilidad en los caudales de recibo esperados, de acuerdo con los resultados de la sección 4.1.2.

En resumen, basado en resultados obtenidos, se selecciona **el filtro 1** (capa fija plástica) como el más funcional, por amortiguar de mejor manera los cambios de caudal y ofrecer rendimientos competitivos bajo condiciones que garanticen un **TRH entre el rango de 1 a 0,5 días**.

4.3.3. Calidad de las aguas de efluente

Las concentraciones de los contaminantes en las aguas residuales son un parámetro crucial en la selección de las tecnologías de tratamiento y las características tanto constructivas, como operativas y de mantenimiento. En algunas ocasiones, dificultades en el acceso a la totalidad de estas pruebas podría limitar el criterio de selección. Siguiendo el esquema de trabajo de la Figura 9 de la sección 3.3.1. se realizan las demás pruebas de calidad de aguas al primer ciclo de operación (experimento 1). Los resultados se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Pruebas de calidad de aguas para de experimento 1

Parámetro	TRH	Entrada (mg/L)	Salida filtro 1 (mg/L)	Salida filtro 2 (mg/L)	Eficiencia Filtro 1	Eficiencia Filtro 2
Nitrógeno Total		132 ± 6,2	105,8 ± 8,8 ^(a)	109,2 ± 6,7 ^(d)	20%	17%
Fósforo Total	1d	20,7 ± 1	17,2 ± 0,6 ^(b)	19,5 ± 2,3 ^(e)	17%	6%
DQO		1198,7 ± 36	512,7 ± 21,4 ^(c)	861,3 ± 20,5 ^(f)	57%	28%
Nitrógeno Total		184,3 ± 76,5	60,3 ± 34,3 ^(a)	52,5 ± 38,4 ^(d)	67%	72%
Fósforo Total	0,5d	24,3 ± 11,6	3,5 ± 1,3 ^(B)	7,8 ± 0,6 ^(E)	86%	68%
DQO		1462 ± 26,2	323,7 ± 11 ^(C)	290,3 ± 8,5 ^(F)	78%	80%

Las letras en los exponentes representan las comparaciones estadísticas, cada letra es a una prueba de ANOVA (6 en total).

Muestras con misma letra, todas en minúscula: No hay diferencias significativas entre resultados.

Muestras con misma letra, pero con mayúsculas y minúsculas: Hay diferencias significativas entre resultados.

Muestras con letras diferentes: No comparable.

Una vez seleccionado el material de capa fija que mayor estabilidad presenta en la remoción de S_v de la sección 4.3.2, interesa analizar el comportamiento de los demás parámetros de calidad de aguas para conocer los rendimientos promedio de operación bajo las condiciones de TRH variable entre el rango de 0,5 a 1 día.

Los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 11. Pruebas de calidad de aguas para de experimento 1 muestran que de modo general el TRH de 0,5 días ofrece mejores rendimientos comparados con el TRH=1 día, obteniendo diferencias significativas en la reducción de Fósforo y DQO para ambos filtros, mientras que el contenido de nitrógeno a la salida de ambos filtros no obtuvo diferencias significativas entre TRH. Con esto se puede concluir que, independientemente del tipo de material de capa fija utilizado, los rendimientos de remoción de los contaminantes mencionados se ven beneficiados al operar bajo el menor TRH estudiado.

Además, concordando con los análisis de la sección 4.3.2; la Tabla 11. Pruebas de calidad de aguas para de experimento 1 refleja que el filtro 1 ofrece mejores rendimientos en la mayoría de las pruebas realizadas (4 de 6; cerca del 66%) lo que aventaja al material de capa fija plástica frente a la piedra pómez.

Dado que el TRH de 0,5 días obtuvo una ligera ventaja sobre el TRH de 1 día durante el experimento 1; se utilizó el primero de estos en el experimento 2 para completar el análisis de los parámetros que exige la Ley de Vertidos y Reúso de Aguas Residuales de Costa Rica y con esto tener un panorama más amplio sobre el rendimiento general del equipo. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Características fisicoquímicas de las aguas residuales de entrada y salida para el TRH de 0,5 d del experimento 2

Parámetro	Entrada	Efluente Filtro 1	Efluente Filtro 2	Eficiencia Filtro 1	Eficiencia Filtro 2	Cuerpo receptor*	Alcantarillado sanitario*
Nitrógeno Total (mg/L)**	59,12 ± 0,95 ^(A)	54,50 ± 1,6 ^(B)	42,70 ± 1,3 ^(C)	8%	28%	-	-
Fósforo Total (mg/L)	108,17 ± 5,13 ^(A)	55,17 ± 1,61 ^(B)	54,67 ± 1,15 ^(B)	49%	49%	-	-
DQO (mg/L)	1934,67 ± 15,01 ^(A)	221 ± 8,19 ^(B)	262,67 ± 17,01 ^(C)	89%	86%	150	750
DBO _{5,20} (mg/L)**	1158 ± 82 ^(A)	137,5 ± 9,7 ^(B)	89,10 ± 6,3 ^(B)	88%	92%	50	300
Grasas y Aceites (mg/L)**	52,00 ± 2,4 ^(A)	42,2 ± 2,1 ^(B)	10,70 ± 1,7 ^(C)	19%	79%	30	50
SAAM (mg/L)**	0,85 ± 0,04 ^(A)	0,37 ± 0,04 ^(B)	0,26 ± 0,04 ^(C)	56%	69%	5	5
pH	7,2 ± 0,23 ^(A)	6,94 ± 0,05 ^(A)	6,95 ± 0,07 ^(A)	-	-	5 a 9	6 a 9
Temperatura (°C)	21 ± 5,2	15,1 ± 5,1	15,90 ± 5,21	-	-	15 a 40	15 a 40

SAAM: Sustancias Activas al Azul de Metileno.

Exponente representa análisis de varianza. Se comparan las letras entre columnas y no entre filas.

Letras iguales en una misma fila: No hay diferencias significativas entre las muestras.

Letras distintas en una misma fila: Hay diferencias significativas entre las muestras.

*Fuente: (50).

** Resultados en anexo (Anexo 4).

El objetivo de una caracterización completa del agua residual es determinar si el tratamiento propuesto mejora la calidad del efluente hasta un punto permisible de acuerdo con la ley de vertidos y reúso de aguas residuales, ya sea para depositarlo en un cuerpo receptor o en el alcantarillado sanitario.

Los resultados de la Tabla 12 muestran que **no es posible verter directamente** el efluente en un cuerpo receptor, sin embargo, al tratarse de un sistema de tratamiento secundario es posible que haya necesidad de un tratamiento posterior para continuar con el proceso de depuración. Además, se debe recordar que para este proyecto el agua residual utilizada como afluente es de origen animal, y si bien, se buscó alcanzar una concentración en los sólidos volátiles similar a la concentración del afluente de una PTAR convencional; muchos aspectos relacionados con los hábitos de consumo y tipo de alimentación pueden afectar las concentraciones de los nutrientes u otros posibles contaminantes.

Por ejemplo, en Estados Unidos, donde el consumo de agua potable es entre 350 y 400 L/hab·día, la DBO₅ oscila entre 200 y 250 mg/L; mientras que en países tropicales subdesarrollados donde el consumo en ocasiones es de la mitad o un cuarto de esa dotación, la DBO₅ se mantiene entre 300 y 700 mg/L (58). En el caso de estudio se tiene una concentración de entrada de 1158 mg/L de DBO₅ (más del doble del promedio tropical) y rendimientos reportados del 88% y el 92% en los filtros 1 y 2, respectivamente, aún no son suficientes para cumplir con los límites permisibles para vertido en cuerpos receptores; pero que, con aguas residuales del rango adecuado, podría esperarse una reducción en cargas orgánicas e inorgánicas para cumplir con la ley de vertidos.

Una concentración más alta a la entrada representa mayor dificultad de tratamiento; sin embargo, la eficiencia de los equipos anaerobios está relacionada directamente -entre muchas otras- con la disponibilidad de materia orgánica, por lo que disponer de un DBO₅ más bajo en la entrada podría posibilitar cumplir con el límite de concentración a la salida, pero la estabilización de la comunidad microbiana podría verse comprometida simultáneamente.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), el filtro 1; con mayor porosidad y área específica, presenta mayor rendimiento en la de reducción de DQO. Estos resultados concuerdan con el artículo James Young (59), quien encuentra que con aumentar el área de la superficie específica del medio de capa fija del filtro al doble; se obtiene un aumento de la remoción de DQO.

El filtro 2 muestra por su parte, mejorías en el rendimiento de remoción de Nitrógeno Total, Grasas y Aceites y Sustancias Activas al Azul de Metileno con diferencias significativas. Esto implica que ante la selección del filtro 1 basado en la reducción de S_V de la sección 4.3.2, sea necesario sacrificar rendimiento cuando el filtro se mantenga operando a un TRH cercano de 0,5 días, considerando el uso de tratamientos posteriores (terciarios) a la salida del FAFA para compensar los valores hasta cifras permisibles.

4.4. Estimación del potencial de bioquímico de metano de los sólidos generados

La producción de lodos es un subproducto en el tratamiento de las aguas residuales (49). Dado que la biomasa generada presente en los lodos puede tener un potencial energético como alimento para otras comunidades microbianas se busca cuantificar la capacidad de producción bioquímica de metano de los lodos producidos en ambos filtros para evaluar su potencial. En la sección 4.4.1 se presentan los resultados de utilizar los lodos como sustrato para la generación de biogás.

4.4.1. Potencial bioquímico de metano (BMP)

El experimento tuvo una duración total de 27 días; alcanzando una producción total acumulada de 587,5 mL entre las dos muestras analizadas, de los cuales 97 mL corresponden a la muestra control y 490,5 mL para la mezcla de lodo e inóculo (“Mezcla 1:2”). El comportamiento acumulado se muestra en la Figura 18.

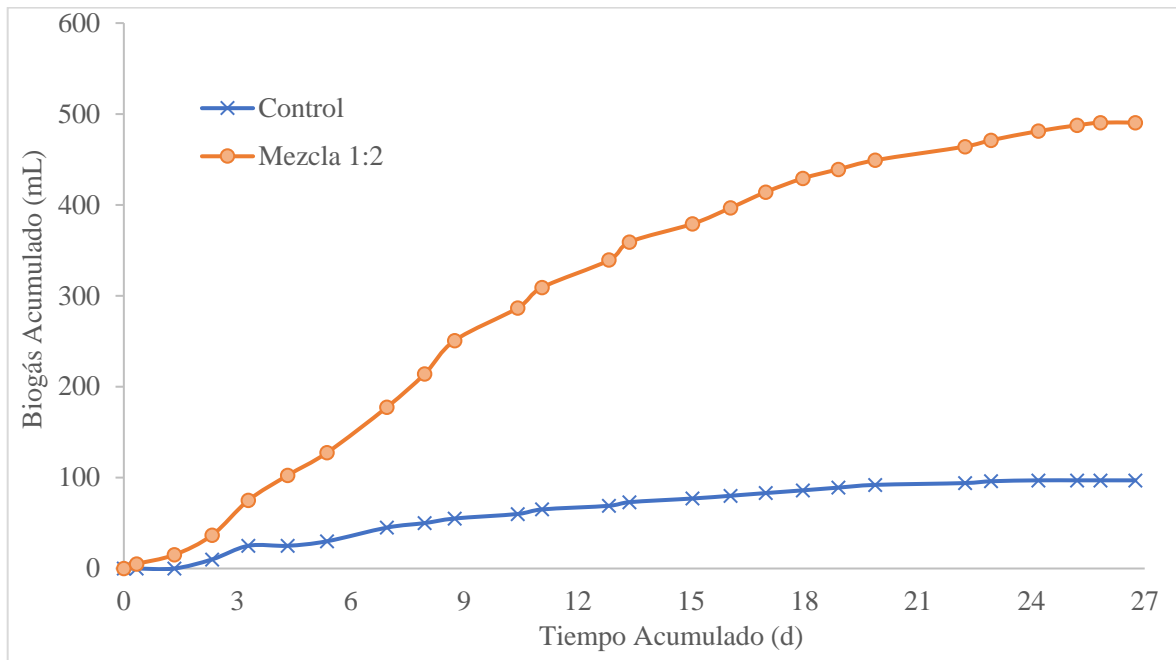


Figura 18. Producción de biogás acumulada en mezcla de lodos con inóculo y muestra de control

La producción de biogás generada durante los primeros 3 días fue baja debido a la adaptación de los microorganismos con el material orgánico, este patrón de comportamiento coincide con el reportado por Sánchez *et al.* (60) quienes en su experimento utilizando residuos de alimentos procesados obtienen un aumento en la producción de biogás para el día 4. La presencia de microorganismos aportados por el lodo en la muestra titulada *Mezcla 1:2* tuvo un efecto directo en la producción de biogás generado, mostrando una diferencia del 80,2% comparada con el *Control* al día 27, donde todas las muestras reportan 0 mL/día.

Adicionalmente, la producción de biogás acumulada por unidad de sólidos volátiles consumidos es de 173 mL/g S_v ; con una reducción del 40,8% del contenido de S_v . Valores similares se obtienen en otras investigaciones, Sánchez (60) hace referencia a reducciones entre el 40 y 70% en la cantidad de sólidos volátiles, sin embargo, esta investigación reporta valores de hasta 725 mL $CH_4/g S_v$, lo que representa cerca del 76% más a los

obtenidos en el presente proyecto. Si bien la capacidad de generación de biogás de los lodos obtenidos puede no ser suficiente para ciertas funciones que impliquen digestión anaerobia directa, es importante recalcar que los lodos tienen un alto potencial como estabilizadores de pH con efecto *buffer* y pueden también ser utilizados en procesos de co-digestión anaerobia.

4.5. Diseño del sistema Fafa para la zona de impacto en Monteverde

4.5.1. Cálculo de capacidad del filtro

La estructura de tratamiento está compuesta de 4 cámaras de igual capacidad, para una distribución del caudal total por secciones. El objetivo de esta modalidad de diseño es brindar la posibilidad de realizar mantenimiento preventivo de los equipos sin necesidad de interrumpir por completo el proceso de depuración.

El cálculo de volumen se obtiene a partir de la ecuación 8 de la sección 3.5; esta ecuación recibe como parámetros de entrada el caudal medio diario calculado en la sección 4.1.2 y el TRH que mejor rendimiento presentó en la sección 4.3.3 (Tabla 13).

Tabla 13. Volumen mínimo requerido del Fafa propuesto para el caso de estudio

Parámetro	Valor
TRH (d)	0,5
$Q_{md, 2043}$ (m ³ /d)	1945
$V_{Requerido, 2043}$ (m ³)	1556

Dado que la vida útil del diseño se ha establecido para 25 años (2018-2043), se debe ajustar un plan de operación que permita el uso parcial de la estructura durante los primeros años, ya que el caudal de la etapa de arranque (1262,2 m³/día) es aproximadamente el 64% del previsto para el último año. Teniendo en cuenta el caudal del periodo inicial; la estructura propuesta requiere como mínimo del uso de 1009 m³ de

capacidad para mantener las condiciones de retención hidráulicas de diseño durante los primeros años.

Estas capacidades volumétricas supondrían mantener el TRH adecuado siempre y cuando los cambios en los caudales no sean significativos, sin embargo, el análisis de los picos mínimos y máximos de caudales mensuales obliga a realizar ajustes en las dimensiones de la estructura para que la capacidad volumétrica amortigüe las fluctuaciones más pronunciadas en los caudales y con esto mantener el TRH dentro del rango de 0,5 a 1 día definido en la sección 4.3.3.

Considerando una estructura con capacidad final de 1665 m³ compuesta por 4 cámaras (416,25 m³ cada una) se propone iniciar la operación a una capacidad de trabajo del 75%, esto implica habilitar 3 de las 4 cámaras para un total de 1248 m³ en etapa de arranque (Figura 19). Las fluctuaciones en los TRH mostrados reportan un valor promedio de 0,61 días.

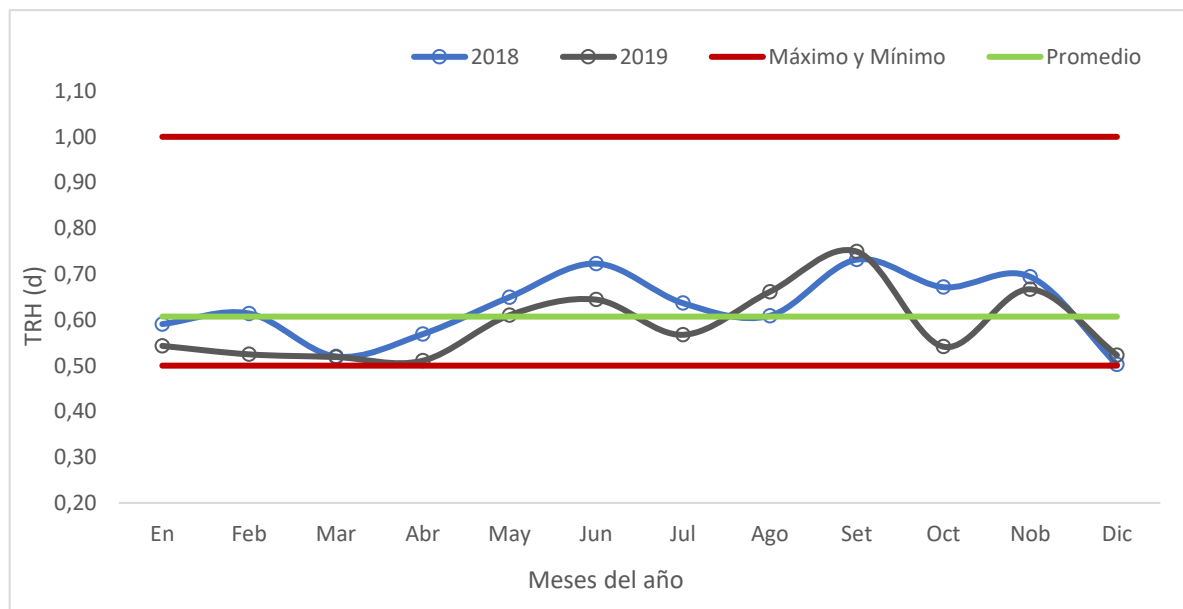


Figura 19. Fluctuaciones en los tiempos de retención hidráulico sobre diseño con capacidad volumétrica aumentada

La estructura es de forma rectangular, con una huella de construcción efectiva de 370 m^2 y una altura total de 5 m. Recomendaciones de literatura proponen que la altura del medio filtrante puede variar desde la totalidad hasta un 50 o 70% de altura del filtro (61), para este caso el medio filtrante ocupa un 90% de la altura total, es decir 4,5 m efectivos de capa fija. La Figura 20 muestra una vista general del diseño propuesto y el anexo 5 detalla las dimensiones de cada cámara en una vista de planta.

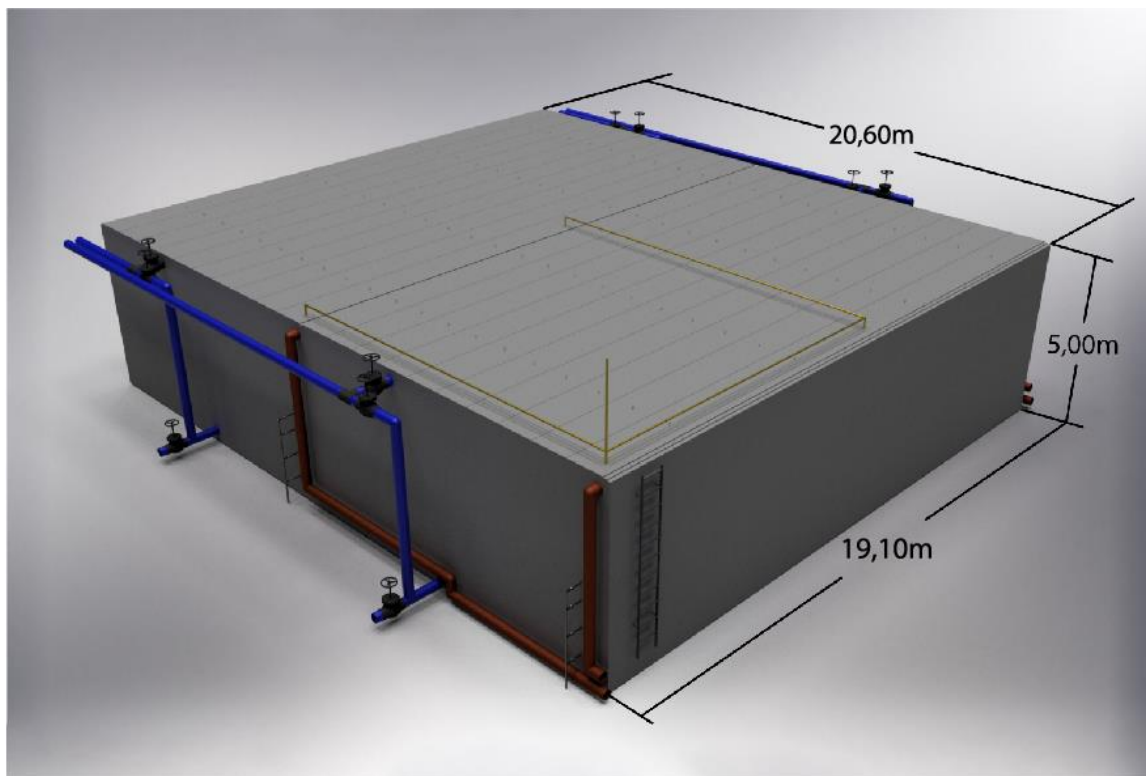


Figura 20. Vista general de propuesta de FAFA para la ASADA de Santa Elena de Monteverde

4.5.2. Estructuras de entrada y salida

Un enfoque integral del diseño del tanque debe incluir la configuración de entrada y salida del agua porque juntos determinan el patrón de flujo. Hidrodinámicamente existe un concepto en el funcionamiento de los filtros que debe evitarse para un adecuado

rendimiento en la depuración, este se conoce como las zonas muertas. Las zonas muertas son espacios dentro del volumen útil de trabajo donde el agua residual queda retenida cierto tiempo sin ser mezclado con el resto del volumen, provocado por una mala distribución en las tuberías de entrada (62). En términos microbiológicos, las zonas muertas se convierten en sitios donde la acumulación del material inerte desestabiliza el funcionamiento de los microorganismos depuradores, además, reduce el volumen efectivo de trabajo y puede alcanzar la obstrucción total.

Para mejorar el flujo de las aguas residuales dentro del filtro, se construye una red de tuberías que distribuyen el afluente de manera uniforme por toda la base del filtro. La velocidad del fluido dentro del filtro debe ser lo más baja posible y el perfil de velocidad debe ser uniforme para lograr altas tasas de sedimentación, para esto se diseña un filtro con menor altura, pero mayor área transversal. La Figura 21 muestra la configuración interna de las cámaras del filtro, estas cuentan con un ramal de tuberías perforadas de entrada en la parte inferior (A). Bajo condiciones normales de funcionamiento el afluente ingresa al mantenerse la válvula “C” abierta, desaguando el efluente por el vertedero de salida ubicado en parte superior de cada cámara, siempre y cuando las válvulas “B” y “D” se encuentran cerradas. Cuando es necesaria la evacuación de los lodos mediante retro-lavado se invierte procedimiento, al cerrar la válvula “C” y permitir el ingreso de las aguas residuales por la parte superior de cada cámara al abrir la válvula “B” y desaguando por la parte inferior al abrir la válvula D.

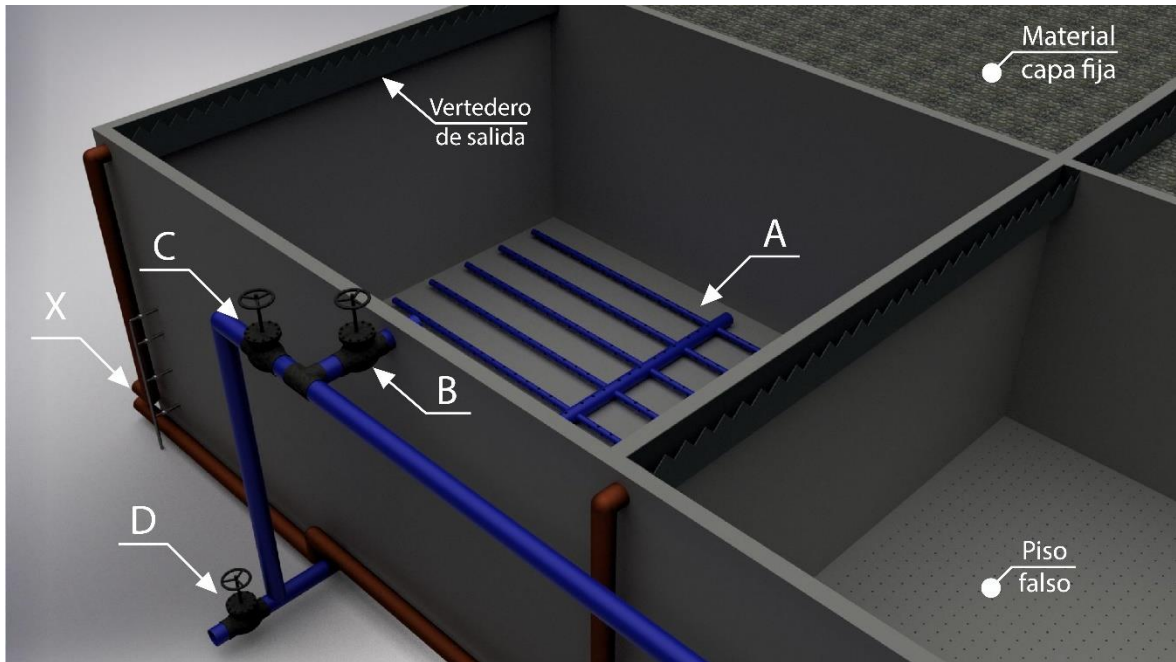


Figura 21. Distribución de entrada de afluente por ramal de tuberías ubicadas en la parte inferior del filtro

El cálculo de la velocidad del flujo determina el diámetro de la tubería de afluente y efluente. Como se detalló anteriormente, la etapa inicial está compuesta del uso de 3 cámaras independientes entre sí, cada una con una capacidad para procesar un tercio del caudal inicial (promedio mensual 2018 de $421 \text{ m}^3/\text{día}$), mientras que para la etapa final con la habilitación de la cuarta cámara el caudal futuro total será distribuido en partes iguales entre cada cámara, por lo que el flujo será de aproximadamente $486 \text{ m}^3/\text{día}$ en cada una. De acuerdo con el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos CFIA (63) el rango de velocidades para sistemas de desagüe de aguas negras es de 0,6 a 2 m/s. Para cumplir con este criterio de diseño es necesario el uso de tuberías de 10" (~25 cm), con esto se tienen velocidades de 1,4 y 1,6 m/s para el periodo inicial y final de diseño respectivamente.

En cuanto a la configuración interna del filtro, es necesaria la colocación de un falso piso en la parte inferior, esto con el objetivo de no verter el material de capa fija

directamente sobre las tuberías de ingreso debido a la compactación que esto provocaría. Tania Alvarado Uvidia (2) recomienda en su tesis de grado un fondo falso suspendido a 0,6 m con orificios de 2,5 cm de diámetro; estas medidas son aplicadas sobre el diseño propuesto en esta investigación.

4.5.3. Desempeño del FAFA propuesto

Para alcanzar una capacidad de tratamiento total con los rendimientos esperados, es aconsejable la incorporación de inóculo por fases para favorecer el crecimiento microbiano y reducir el tiempo de estabilización inicial. Una de las decisiones más determinantes fue la selección del material de capa fija (sección 4.3.2). Al hacer uso de este material (plástico), se esperan rendimientos superiores al 85% en la reducción de DBO y DQO, superiores al 70% en la reducción sólidos volátiles, por encima del 45% en reducción de Fósforo y cercano al 10% en reducción de Nitrógeno.

Para mantener el funcionamiento del filtro propuesto, es necesario un pretratamiento y tratamiento primario adecuado, ya que el rendimiento general de cada proceso depende directamente del rendimiento del proceso que lo antecede, sin embargo, la frontera de diseño de esta investigación se limita al diseño del sistema secundario, por lo que se da por sentado que las etapas unitarias anteriores cumplen a cabalidad su función.

4.5.4. Plan de operación

Alcanzar la estabilidad del sistema es un proceso sensible, por esto se recomienda tener especial cuidado de las condiciones de trabajo durante los primeros meses con inspecciones constantes de acumulación de lodos, calidad de las aguas de salida para conocer el rendimiento y tener especial cuidado de no descargar productos químicos fuertes en el filtro anaerobio haciendo análisis de calidad de aguas de entrada y sondeo de los entes generadores.

En cuanto a la tendencia de aumento de las aguas residuales resultantes del crecimiento poblacional y crecimiento en las tasas de turismo; estas determinan el

momento en que será necesario habilitar el cuarto compartimiento para el uso del 100% de capacidad. Para determinar esto se debe mantener monitoreo del TRH de funcionamiento, cuando se tengan periodos prolongados con TRH menores a 0,5 días se debe de abrir la cuarta etapa.

Bajo el panorama descrito; el incremento gradual de caudal de aguas residuales obliga a incrementar la capacidad inicial del sistema al cabo de 10 años de funcionamiento, es decir, para el 2028. En este momento, el caudal esperado será de aproximadamente 1592 m³/día, lo que provoca un TRH promedio de 0,49 días sobre el 75% de capacidad del sistema. Al abrir el cuarto compartimiento el volumen incrementa en un 25%, llevando el promedio de TRH de trabajo hasta un valor de 0,65 días. La Tabla 14 resume el comportamiento del FAFA bajo los dos escenarios.

Tabla 14. Condiciones de operación proyectada para el 2028 con el uso del 75 y 100% de capacidad del FAFA diseñado

Parámetro	75% de capacidad	100% de capacidad
Cámaras en uso	3	4
Q _{md} en cada cámara (m ³ /d)	530,7	398
TRH* (d)	0,49	0,65

*: Despejando TRH de ecuación 8.

4.5.5. Plan de mantenimiento

Una de las ventajas de operación de los FAFA es que la simplicidad de su diseño estructural agiliza las labores de mantenimiento al reducir al mínimo el número de componentes. A medida en que avanza la operación del filtro, hay que monitorear la acumulación de lodos y microorganismos que forman una biopelícula sobre las superficies internas del filtro, ya que estas aumentan gradualmente su espesor.

Conforme aumenta el espesor de esta biopelícula causa que la capa interna de esta biomasa (la que está fija a la superficie) se debilite por la falta de acceso al alimento. En consecuencia, esta “capa interna” pierde adherencia al medio de soporte, hasta que termina por desprenderse. Todo lo anterior provoca un ciclo de autolimpieza en el filtro que evitará su obstrucción por engrosamiento de la biomasa adherida (5). Por lo tanto, en periodos de limpieza no es necesaria la extracción completa del material (61), sino que es suficiente con circular las aguas residuales del sistema en reversa (retro-lavado) (40). El proceso de retro-lavado requiere la circulación continua de aguas residuales para mantener las condiciones anaerobias de ausencia de oxígeno, para esto es necesario que el afluente fluya desde la parte superior, de modo que el desagüe de la parte inferior provoque el arrastre de los sólidos sedimentados sin vaciar el filtro.

Para controlar el nivel de acumulación de sólidos dentro de los filtros se colocan 4 salidas con profundidades variables. Estas salidas tienen la función de “ventanillas de inspección”, el objetivo es tomar muestras de cada una para evaluar de acuerdo con el color y concentración de sólidos el volumen ocupado por los lodos. Las válvulas se ubican a 0,4 m, 1,1 m, 1,8 m y 2,5 m medidos desde la base del filtro. (Figura 21, etiqueta X).

5. CONCLUSIONES

Para el presente trabajo final de graduación, se puede concluir lo siguiente, según los objetivos desarrollados:

5.1. Determinación de la variabilidad de generación de aguas residuales en la zona de estudio

- Se determinó que la variación en la generación de aguas residuales en la zona de estudio será del 35% para el año 2043, lo que representa un cambio de 682,8 m³ por día, comparado con lo generado durante el 2018.

5.2. Diseño de un filtro anaeróbico a escala de laboratorio para el estudio de la variación de los tiempos de retención hidráulica para los caudales máximos y mínimos

- Se diseñó un filtro anaeróbico a escala de laboratorio que es capaz de procesar 24 litros diarios, en el cual se demostró que el TRH es uno de los parámetros de funcionamiento más influyentes en el FAFA, obteniendo mayor rendimiento cuanto menor fue el tiempo de retención hidráulico, basados en los análisis de remoción de DQO, Nitrógeno Total y Fósforo Total.

5.3. Estudio de medios filtrantes para la adhesión de comunidades microbianas

- La comparación de rendimientos entre ambos filtros puestos a prueba demuestra que el material plástico tiene mejores rendimientos que la piedra pómez como capa fija debido a una mayor relación área superficial/volumen.
- El uso de retro lavados al inicio de cada TRH no afecta el rendimiento de los filtros en remoción de sólidos volátiles, por lo que se concluye que los microorganismos

que se encargan de disminuir la carga orgánica en el agua residual están bien ancladas a ambos sustratos utilizados dentro de los filtros.

5.4. Estimación del potencial de bioquímico de metano de los sólidos generados

- Los sólidos generados en el sistema de tratamiento de aguas residuales estudiados presentan una productividad de 173 mL/g S_v de acuerdo con los resultados del ensayo de BMP, pero este valor no compite con la capacidad de generación de biogás de otras fuentes.

5.5. Diseño del sistema FAFa para la zona de impacto en Monteverde

- Para la calidad y cantidad de aguas residuales esperadas, el sistema debe tener como mínimo 370 m² de área disponible para su construcción, con un volumen total de 1665 m³ para ser funcional hasta un periodo proyectado al año 2043, iniciando con un 75% de su capacidad máxima de trabajo y aumentando su capacidad al 100% para el año 2028.

6. RECOMENDACIONES

Las aguas residuales de origen doméstico contienen características físico-químicas y microbiológicas variables relacionadas a los hábitos alimenticios de los hogares, así como la calidad de vida y el nivel socioeconómico, por esto, es crucial que se realice un muestreo en la zona de estudio para una caracterización más específica de la calidad del agua.

Para descubrir el mayor rendimiento de los lodos en procesos de digestión anaerobia, reflejado en el total acumulado de producción de biogás, se recomienda montar un ensayo de BMP con más combinaciones de proporciones de lodos/inóculo. Esto para encontrar el equilibrio en el que los microorganismos se ven beneficiados por un aumento en la materia orgánica disponible sin saturar el sistema e incluso considerar la co-digestión anaerobia, que presenta amplias posibilidades de mejorar los rendimientos puesto que permite el tratamiento en conjunto de distintos sustratos.

Independientemente del uso que se le dé al biogás generado del proceso anaerobio; es necesario que se cuente con sistemas de canalizado y transporte para utilizar el gas ya sea como fuente de energía o para disponerlo por medio de chimeneas que se usan para quemarlo, de manera que su liberación no sea directa sino en forma de dióxido de carbono que es una gas menos contaminante (28).

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Mihelcic JR, Zimmerman JB. Ingeniería ambiental: Fundamentos, sostenibilidad, diseño. Alfaomega Grupo Editor. México: Alfaomega; 2012. 722 p.
2. Alvarado Uvidia TI. Diseño de un sistema de tratamiento de agua residual para la Parroquia Bilbao. Vol. Bachelor, Facultad de Ciencias. Escuela de Ingeniería en Biotecnología Ambiental. (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador; 2015. 122 p.
3. Calle Chumo RN, Rodas Soto WL. Estudio de tratabilidad para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en un industria alimenticia. Ingeniería Química. (Tesis de grado). Universidad de Guayaquil. Ecuador; 2013.
4. Rodríguez D. Monitoreo y evaluación de una planta piloto para el tratamiento de agua residual por medio de un sistema de biomasa adherida con esponjas colgantes de flujo descendente, implementada como tratamiento secundario para el efluente de un sedimentador primario. Ingeniería Civil (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica; 2017.
5. Lozano-Rivas WA. Fundamentos de diseño de plantas de tratamiento de aguas rresiduales. Bogotá, Colombia.; 2012. 196 p.
6. Política regulatoria sobre el acceso al agua potable y saneamiento de aguas residuales. Ley N°9849. Artículo 50 de la Constitución Política; 2020.
7. Romero LD, Araya S, Briceño A, Johnson G, Quirós D, Marschall C. Costa Rica: Agua y Saneamiento 2030, Análisis relacionado al ODS. Latin American Investment Protections. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). San José, Costa Rica; 2018. 37 p.
8. Castro Llorca F, Gutiérrez Espelta E, Astorga Espeleta Y. Política nacional de

- saneamiento en aguas residuales. Acueductos y Alcantarillados (AyA), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Salud (MS). San José, Costa Rica; 2016.
9. LATINOSAN. V Conferencia Latinoamericana de Saneamiento [Internet]. 7 de marzo. 2019. Available from: <https://latinosan2019cr.com/costa-rica-alcanza-15-de-cobertura-de-alcantarillado-sanitario-con-tratamiento/>
 10. Torres P. Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas Residuales domésticas en países en desarrollo. Revista EIA. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Medellín, Colombia; 2012.
 11. Viquez E. Evaluación preliminar de dos tipos de biofiltro utilizados como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas. Ingeniería Civil. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica; 1999.
 12. Ortiz Muñoz DF. Manual de Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales para poblaciones medianas de la Región Sur del Ecuador. Escuela de Ingeniería Civil. (Tesis de grado). Universidad Técnica Particular de Loja. Ecuador; 2014.
 13. Ayala Fanola RM, Gonzalez Marquez G. Apoyo Didactico En La Enseñanza – Aprendizaje De La Asignatura De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales. Ingeniería Civil. (Tesis de Licenciatura). Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Colombia; 2008.
 14. García I, Betancort J, Salas J, Peñate B, Pidre J, Sardón N. Guía sobre tratamiento de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población. Vol. 53, Journal of Chemical Information and Modeling. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA). España; 2006. 128 p.
 15. Riveros Olivares B. Tratamiento de aguas residuales municipales en la Ciudad de México. Ingeniería Civil. (Tesis de grado). Universidad Autónoma de

México.México; 2013.

16. Crites Y Tchobanoglous. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Bogotá, Colombia; 2000. 776 p.
17. Noyola A, Morgan J, Guereca LI. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de México (UNAM). México; 2013. 1-140 p.
18. Guevara Llerena DJ, Ramos Ramos TP. Evaluacion del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UEA. Ingeniería Ambiental. (Tesis de grado). Universidad Estatal Amazónica. Puyo, Ecuador; 2018.
19. Arana V. Guía para la toma de decisiones en la selección de sistemas de tratamiento de las aguas residuales no convencionales. Guitar. Miraflores, Perú; 2009. 8-9 p.
20. Patterson R. Nitrogen in Wastewater and it's role in constraining on site planning. Lanfax Laboratories Armidale. University of New England; 2003.
21. Spellman F. Water and wastewater treatment plant operations. 2da. Edition. CRC Press. Boca Ratón, United States; 2009.
22. Gómez Rendón CP. Manejo de aguas residuales en pequeñas comunidades. Ciencias agrícolas, pecuarias y del medio ambiente. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Bogotá, Colombia; 2013. 1-108 p.
23. Methcalf E. Ingeniería de aguas residuales. tratamiento, vertido y reutilización. 3rd ed. McGraw-Hill. Distrito Federal, México; 1996. 388 p.
24. Blanco Buitrago KA, Leon Caicedo DL. Diseño hidráulico de la planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de Guacamayas. Vol. 9, Bucaramanga. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. (Grado de Ingeniero Químico). Universidad de Santander; 2010.

25. ASADA Santa Elena. Consumo de agua potable. Información personal. 14 de Junio 2021;
26. INEC. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Estimaciones y proyecciones de población [Internet]. 18 abril. 2011. Available from: https://www.inec.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion?keys=&shs_term_node_tid_depth=757&field_periodo_tid=All&field_anio_documento_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=2021
27. Barrantes DC. Dimensionamiento , conceptualización y propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CITA) . Ingeniería Química. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica; 2014.
28. Flores Sanchez EA. Evaluación de la planta de tratamiento de agua residual de Bosques de Santa Ana conformada por un reactor anaerobio de flujo ascendente de manto de lodos (UASB) con postratamiento de lodos activados. Ingeniería Civil. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica; 2019.
29. CITME. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía de la Universidad de Alcalá. Madrid. Elecé Industria Gráfica; 2006. 137 p.
30. Solís Morales K. Evaluación del modelo escala de biomasa suspendida por medio de esponjas colgantes de flujo descendente (DHS) como postratamiento de un reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB). Ingeniería Civil. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica; 2018.
31. Solano Hernández N. Diseño de un sistema compacto para el tratamiento de residuos urbanos. Escuela de Ingeniería de Biosistemas. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica; 2020.

32. Arnaiz C. Tratamiento biológico de aguas residuales. Revista Tecnología del Agua. Grupo de Tratamiento de Aguas Residuales. Escuela Universitaria Politécnica. Universidad de Sevilla. España.; 2000.
33. Chernicharo C. Postratamiento de efluentes de reactores anaerobios. [Coletanea de Artigos Tecnicos. Volume 1. Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte.]; 2000.
34. Muñoz Cuevas A. Tratamiento biológico de las aguas residuales de la cuenca central de México. Valuación de los métodos empleados. Tesis de Maestria (Metodología de la Ciencia). Centro de Investigaciones Económicas, Administración y Sociales. (Tesis de grado). Instituto Politécnico Nacional. Distrito Federal, México; 2011. 251 p.
35. Menéndez Gutiérrez C, Pérez Olmo JM. Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales. Environmental Capacity Enhancement Project in Cuba. La Habana, Cuba.; 2007. 298 p.
36. Alvarado Arce A. Evaluación de materiales de desecho como medio filtrante en filtros anaerobios de flujo ascendente. Ingeniería Ambiental. (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica; 2011.
37. Serrano H. Evaluación ambiental y sanitaria de dos sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la construcción de prototipos en escala natura. Escuela de Ingeniería Civil. (Tesis de Licenciatura) Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica; 2005. 106 p.
38. Ruiz Cortines BA. Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente. Comisión Nacional del Agua. Coyoacán, México; 2015. 365 p.
39. Ruiz I. El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de las aguas

- residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. Universidad de Coruña. España; 1997.
40. Tilley E, Ulrich L, Lüthi C, Reymond P, Schertenleib R, Zurbrügg C. Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Vol. 2da edicio, Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (Eawag). EAWAG, Alianza por el Agua y Cooperación Suiza en América Central; 2018. 178 p.
 41. Picado Valverde S de los Á. Evaluación físico-química, biológica e hidrodinámica del funcionamiento de sistemas de tratamiento prefabricados para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias. Ingeniería Ambiental (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Cartago, Costa Rica; 2016.
 42. López AL, De La Barrera Fraire J, Rodríguez RV, Argueta CB. Estudio comparativo entre un proceso fisicoquímico y uno biológico para tratar agua residual de rastro. *Interciencia*. 2008;33(7):490–5.
 43. Ruiz I, Veiga MC, de Santiago P, Blázquez R. Treatment of slaughterhouse wastewater in a UASB reactor and an anaerobic filter. *Bioresour Technol* [Internet]. 1997 Jun;60(3):251–8. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852497000205>
 44. Kapdan IK. Kinetic analysis of dyestuff and COD removal from synthetic wastewater in an anaerobic packed column reactor. *Process Biochem* [Internet]. 2005 Jun;40(7):2545–50. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032959204004364>
 45. Feng L, Ward AJ, Ambye-Jensen M, Møller HB. Pilot-scale anaerobic digestion of by-product liquid (brown juice) from grass protein extraction using an un-heated anaerobic filter. *Process Saf Environ Prot* [Internet]. 2021 Feb;146:886–92. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582020319534>

46. Davis M, Masten S. Ingeniería y Ciencias Ambientales. McGraw-Hill Interamericana. Cuajimalpa, México; 2005. 746 p.
47. Arhoun B. Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora [Internet]. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias, Departamento de Ingeniería Química. (Tesis Doctoral). Universidad de Málaga; 2017. 191 p. Available from: <http://orcid.org/0000-0003-2263-0639>
48. Mihelcic J, Zimmerman J. Ingeniería ambiental Fundamentos, sustentabilidad y diseño. Alfaomega Grupo Editor. México; 2006. 720 p.
49. Fandiño Piamonte HS. Diseño preliminar de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Esperanza Departamedo norte de Santader en Colombia [Internet]. Vol. 01, Universitas Nusantara PGRI Kediri. Ingeniería Ambiental (Tesis de grado). Universidad de Santo Tomás. Colombia; 2017. Available from: <http://www.albayan.ae>
50. MINAE. Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601-MINAE-S. Vol. 55. Diario Oficial La Gaceta; 2007.
51. Venegas Castillo JA. Determinación de los parámetros de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para la optimización del diseño de modelos de caja negra bajo condiciones tropicales. Escuela de Ingeniería de Biosistemas. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica. San Pedro, Costa Rica; 2020. 131 p.
52. McCrady MH. Standard methods for the examination of water and wastewater. Vol. 56. (20° ed). American Journal of Public Health and the Nations Health; 1999 Apr.
53. HACH Company. Manual de análisis de agua [Internet]. 2000. Available from: <http://www.hach.com>
54. Favior L, Kirk D. Statiscal Verification of a Biochemical Methane Potential Test.

- ASABE (11 ed). Estados Unidos; 2011.
55. Centeno Mora E. Análisis comparativo de distintas tecnologías de tratamiento de aguas residuales para Municipalidades de Costa Rica [Internet]. Ingeniería Civil. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica; 2011. 381 p. Available from: <http://arxiv.org/abs/1011.1669>
 56. AyA. Estudio integral para el manejo de las aguas residuales de Monteverde de Puntarenas. Factibilidad y diseños preliminares. Asociación Administradora del Acueducto y Alcantarillado Sanitario del distrito de Monteverde (Puntarenas). Costa Rica; 2019.
 57. AyA-OPS-OMS. Análisis sectorial de agua potable y saneamiento en Costa Rica. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. Costa Rica; 2002.
 58. Mara D. Domestic wastewater treatment in developing countries. Earthscan from Routledge. London, Inglaterra: Taylor & Francis.; 2004.
 59. Young J. Factors affecting the design and performance of upflow anaerobic filters. Vol. 24. Water Science and Technology; 1991.
 60. Sánchez Reyes C, Patiño Iglesias ME, Alcántara Flores JL, Reyes Ortega Y, Pérez Cruz MA, Ortíz Muñoz E. Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. Rev Int Contam Ambient. 2016;32(2):191–8.
 61. Hegg Sánchez SS. Evaluación de optimizaciones de sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales. Escuela de Química. (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica; 2018. 101 p.
 62. Gomez Valverde AL. Estudio del efecto del almacenamiento sobre la calidad de agua en un tanque de distribución. In: Intergovernmental Panel on Climate Change,

editor. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis [Internet]. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. p. 1–30. Available from: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9781107415324A009/type/book_part

63. Morales R Á, Mora M D, Vargas, B L, Chanto J LF, Zamora C P, Jiménez R Ó. Código de instalaciones hidráulicas y sanitarias en edificaciones. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. Editorial Tecnológica de Costa Rica. San José, Costa Rica; 1995. 146 p.

8. ANEXOS

Anexo 1. Pruebas estadísticas realizadas a los residuos de los datos para evaluar que los resultados obtenidos en los análisis de varianza son reales.

Shapiro-Wilks (modificado)						
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)	
RDUO Sv Entrada	9	0,00	367,97	0,98	0,9608	

Figura 22. Prueba formal de normalidad Shapiro-Wilks para las muestras de afluente de las aguas residuales.

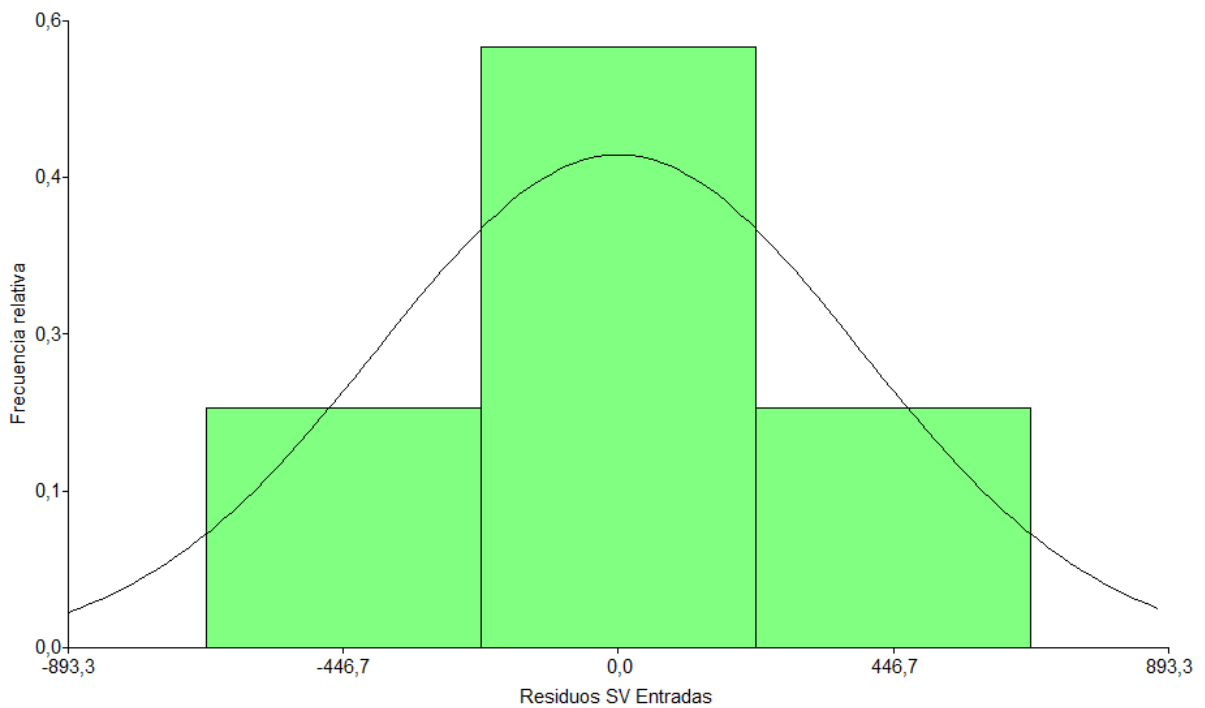


Figura 23. Histograma de los residuos para determinar si los datos son asimétricos en una muestra de afluente de las aguas residuales.

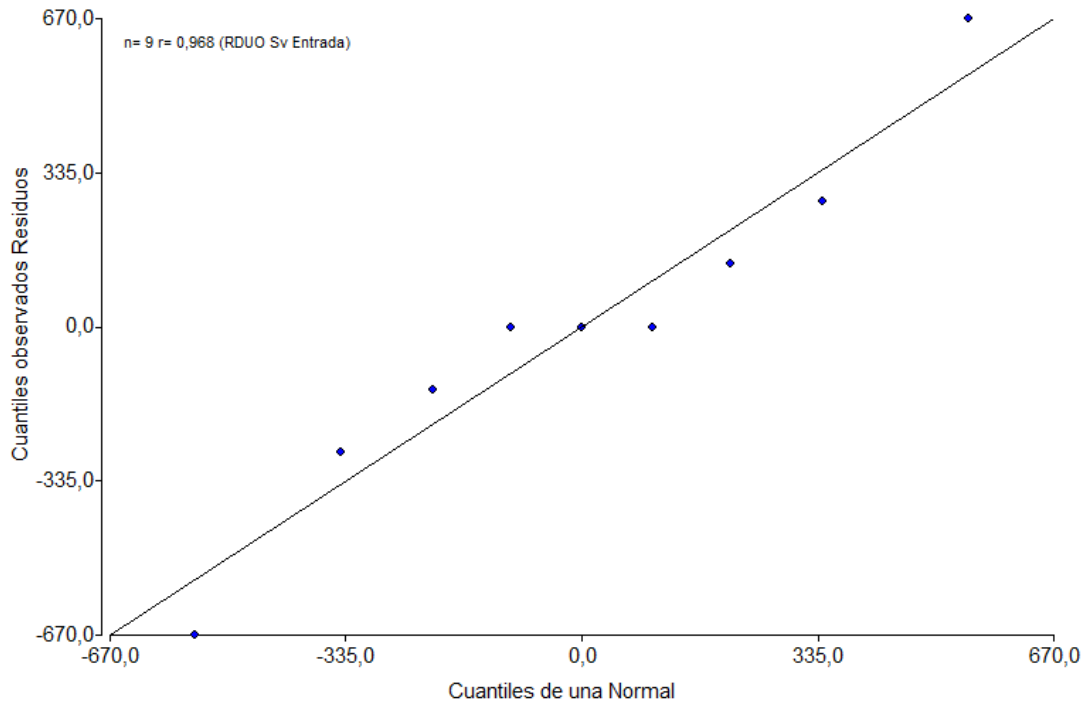


Figura 24. Distribución de los residuos de la media de afluente de las aguas residuales.

Anexo 2. Cálculo de población futura para el año 2043 con una tasa de crecimiento poblacional de 1,7% utilizando la ecuación 4 de la sección 3.1.

$$P_f = P_o \cdot (1 + t)^n$$

$$P_f = 3\,980,8 \text{ hab} \cdot (1 + 0,017)^{25}$$

$P_f = 6\,067 \text{ hab}$

Anexo 3. Cálculo de caudal de aguas residuales domésticas para el año 2018 y para el año 2043 utilizando la proyección de la ecuación 1 de la sección 2.2.

$$Q_{dom,2018} = P \cdot D \cdot C_r$$

$$Q_{dom,2018} = 3\,981 \text{ hab} \cdot 212,4 \text{ L/hab} \cdot d \cdot 0,8$$

$$Q_{dom,2018} = 676,4 \text{ m}^3/d$$

$$Q_{dom,2043} = P \cdot D \cdot C_r$$

$$Q_{dom,2043} = 6\,067 \text{ hab} \cdot 212,4 \text{ L/hab} \cdot d \cdot 0,8$$

$$Q_{dom,2043} = 1\,031 \text{ m}^3/d$$

Anexo 4. Informe de resultados obtenidos del Centro de Investigación en Contaminación Ambiental.

Solicitante: Junior Jiménez Quesada
 Solicitado por: Junior Jiménez Quesada
 Dirección del cliente: San José, Mora, Jarís
 Teléfono / Fax: 8613-8562 / No indicado
 Fecha de emisión de reporte: 23 de junio de 2021
 Oferta No.: 174-2021
 Número de muestras: Tres

RESULTADOS

Análisis	Unidad	LCA-081-2021 # 1	Método aplicado (ver nota 4)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20})*	mg/L O ₂	1 158 ± 82	MAQA-10
Grasas y Aceites*	mg/L	52,0 ± 2,4	MAQA-2
Nitrógeno Total**	mg/L N	59,12 ± 0,95	MAQA-40
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)*	mg/L	0,847 ± 0,043	MAQA-26

*Ensayo acreditado ante ECA. Ver alcance en <http://www.eca.or.cr>

**Ensayo no acreditado ante ECA.

Análisis	Unidad	LCA-081-2021 # 2	Método aplicado (ver nota 4)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20})*	mg/L O ₂	137,5 ± 9,7	MAQA-10
Grasas y Aceites*	mg/L	42,2 ± 2,1	MAQA-2
Nitrógeno Total**	mg/L N	54,5 ± 1,6	MAQA-40
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)*	mg/L	0,372 ± 0,037	MAQA-26

*Ensayo acreditado ante ECA. Ver alcance en <http://www.eca.or.cr>

**Ensayo no acreditado ante ECA.

Análisis	Unidad	LCA-081-2021 # 3	Método aplicado (ver nota 4)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20})*	mg/L O ₂	89,1 ± 6,3	MAQA-10
Grasas y Aceites*	mg/L	10,7 ± 1,7	MAQA-2
Nitrógeno Total**	mg/L N	42,7 ± 1,3	MAQA-40
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)*	mg/L	0,263 ± 0,037	MAQA-26

*Ensayo acreditado ante ECA. Ver alcance en <http://www.eca.or.cr>

**Ensayo no acreditado ante ECA.

NOTAS:

- El Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), de la Universidad de Costa Rica opera bajo permiso sanitario de funcionamiento otorgado por el Ministerio de Salud, según resolución No. CS-ARSMO-D-593-19.
- Los resultados de este informe son exclusivos para el análisis realizado a la(s) Muestra(s):
LCA-081-2021 # 1: Muestra de agua residual descrita como: "Entrada". Ubicación: no indicada. Fecha de muestreo: 21 de mayo de 2021. Hora de muestreo: 6:00 am. Muestreado por: interesado. Fecha de ingreso al CICA: 21 de mayo de 2021. Solicitante no indica lugar de vertido.
LCA-081-2021 # 2: Muestra de agua residual descrita como: "Salida 1". Ubicación: no indicada. Fecha de muestreo: 21 de mayo de 2021, hora de muestreo: 6:00 am, muestreado por interesado, fecha de ingreso al CICA: 21 de mayo de 2021. Solicitante no indica lugar de vertido.
LCA-081-2021 # 3: Muestra de agua residual descrita como: "Salida 2". Ubicación: no indicada. Fecha de muestreo: 21 de mayo de 2021, hora de muestreo: 6:00 am, muestreado por interesado, fecha de ingreso al CICA: 21 de mayo de 2021. Solicitante no indica lugar de vertido.
- Las incertidumbres corresponden a incertidumbres expandidas con un factor de cobertura de 2 (k=2), lo cual da un nivel de confianza del 95 %.
- Métodos de Análisis Químico Ambientales (MAQA) realizados de acuerdo con: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 23ª. Edición. 2017 (para el método de referencia referirse al alcance de acreditación en <https://www.eca.or.cr/>).

LCA-081-2021

5. Documento confidencial para uso del solicitante. No puede reproducirse parcialmente sin autorización del Laboratorio.
6. La fecha de análisis queda comprendida entre la fecha de ingreso de la muestra al CICA y la fecha de emisión del reporte.
7. Las muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 7 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este período se desecharán.
8. El laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre la preservación y representatividad de la(s) muestra(s) que no hayan sido recolectadas por el personal autorizado del laboratorio. En dicho caso, los resultados del presente informe reproducen las condiciones de la muestra tal como fue recibida y la información como la descripción, tipo de muestra, ubicación, fecha y hora de muestreo es suministrada por el solicitante.

Última línea
Firmado digitalmente por
JOHAN MOLINA
DELGADO (FIRMA)
Fecha: 2021.06.23
14:22:08 -06'00'
Johan Molina Delgado
Coordinador de Laboratorio



Anexo 5. Detalle de dimensionamiento de la estructura del Fafa, se detalla: vista superior con dimensiones laterales y grosor de pared.

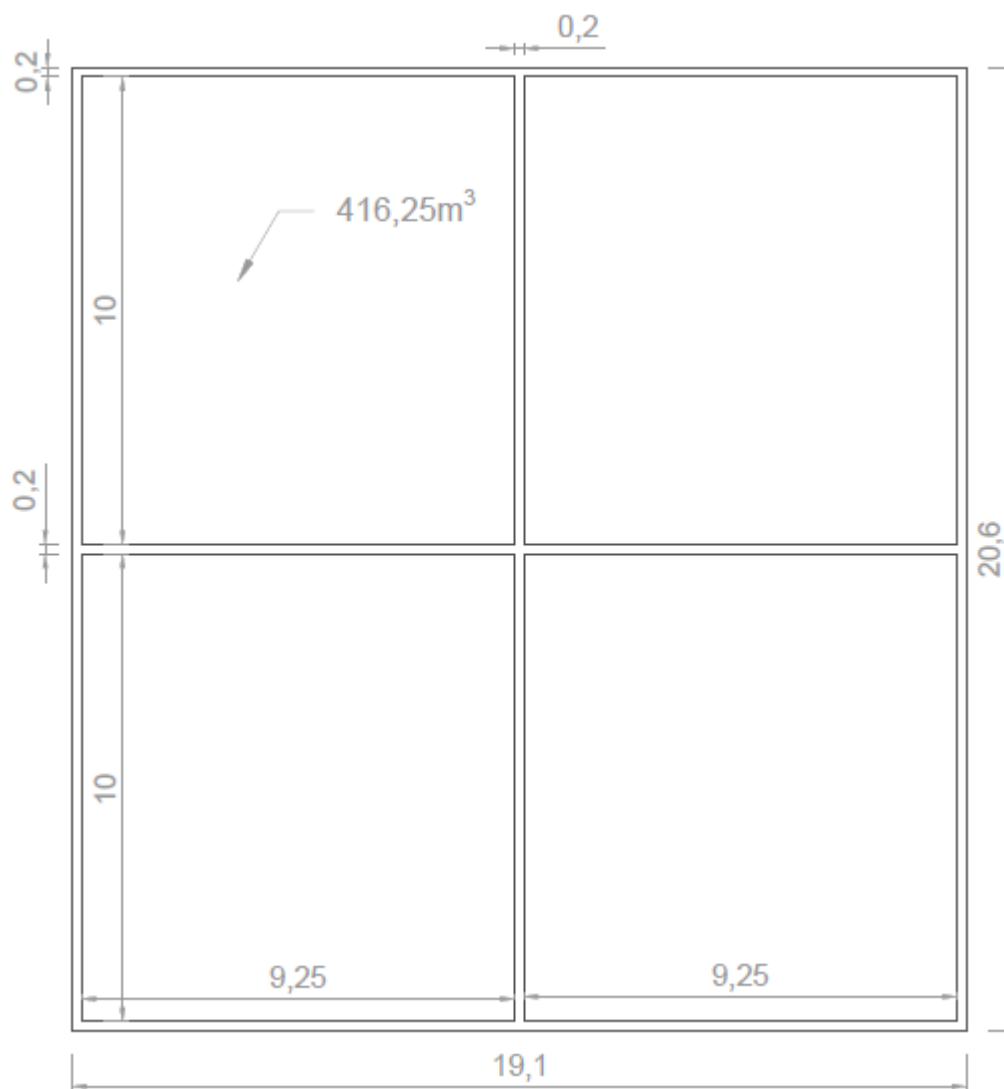


Figura 25. Vista de planta de las cámaras del Fafa propuesto.