

**EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO
ASCENDENTE EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES MUNICIPALES**

Autor

Jonathan Alejandro Rendón Arango

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE EN PLANTAS DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

Jonathan Alejandro Rendón Arango

Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Sanitario

Asesores:

Diana Catalina Rodríguez Loaiza, Ph.D, Msc, Ingeniera Sanitaria

Francisco Molina Pérez, Ph.D, Msc, Ingeniero Sanitario

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2021

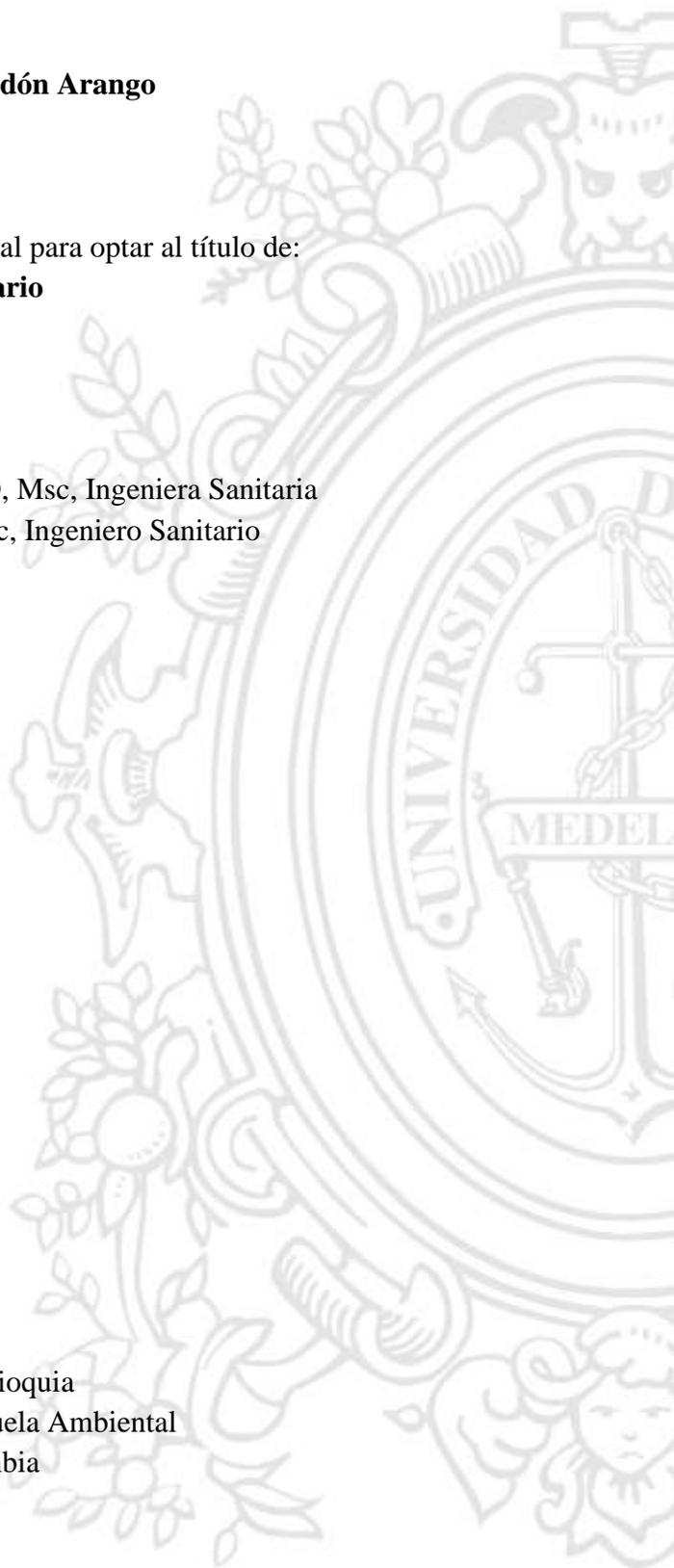


TABLA DE CONTENIDO

Lista de ilustraciones	5
Lista de fotografías	5
Lista de tablas	6
1. Resumen	7
2. Introducción	8
3. Objetivos	9
3.1 Objetivo general	9
3.2 Objetivos específicos	9
4. Marco referencial	9
4.1 Marco Geográfico	9
4.1.1 Municipio de San Vicente Ferrer	9
4.1.2 Municipio de Santo Domingo	12
4.1.3 Municipio de Granada	13
4.1.4 Corregimiento de Buenos Aires	15
4.1.5 Municipio de San Francisco	16
4.1.6 Corregimiento de la Piñuela municipio de Cocorná	18
4.2 Marco Teórico -Conceptual	20
4.2.1 Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)	20
4.2.2 Microbiología anaerobia	21
4.2.3 Biopelícula	23
4.2.4 Biogas	24
4.2.5 Factores que intervienen en el proceso	25
4.2.6 Criterios de diseño	26
5. Metodología	31
5.1 Diagnóstico inicial del filtro anaerobio de flujo ascendente	31
5.2 Seguimiento de control del sistema de Filtración Anaerobio de Flujo Ascendente	31
5.2.1 Campañas de monitoreo	31
5.2.2 Análisis físico químico de los parámetros reportados del agua residual	32
5.3 Diseño de filtros anaerobios de flujo ascendente	32
5.3.1 Evaluación del diseño	32
5.3.2 Metodologías de diseño	33
5.4 Metodología propuesta para el diseño de un filtro anaerobio de flujo ascendente	36
6. Resultados y análisis	38
6.1 Diagnóstico inicial	38
6.1.1 FAFA del municipio de San Vicente Ferrer	38
6.1.2 FAFA del municipio de Santo Domingo	40
6.1.3 FAFA del municipio de Granada	41
6.1.4 FAFA corregimiento de Buenos Aires	43
6.1.5 FAFA del municipio de San Francisco	44

6.1.6	FAFA de la planta del corregimiento de la Piñuela municipio de Cocorná.....	45
6.2	Análisis fisicoquímico de los parámetros reportados por el laboratorio de CORNARE	46
6.2.1	PTAR del municipio de San Vicente de Ferrer.....	46
6.2.2	PTAR del municipio de Santo Domingo.....	47
6.2.3	PTAR del corregimiento de Buenos Aires del municipio de San Luis.....	48
6.2.4	PTAR del municipio de San Francisco	49
6.2.5	PTAR del municipio de Granada y corregimiento de La Piñuela en el municipio de Cocorná	51
6.3	Evaluación del diseño de los filtros anaerobios de flujo ascendente según la metodología de CONAGUA	51
6.3.1	FAFA de la planta de tratamiento del municipio de San Vicente Ferrer	51
6.3.2	FAFA municipio de Santo Domingo	53
6.3.3	FAFA del corregimiento de Buenos Aires	56
6.3.4	FAFA del municipio de Granada	59
6.3.5	FAFA del municipio de San Francisco	61
6.3.6	FAFA del corregimiento de la Piñuela.....	63
6.4	Resultados metodología de diseño propuesta FAFA.....	65
6.4.1	FAFA municipio de San Vicente de Ferrer.....	65
6.4.2	FAFA municipio Santo Domingo	67
6.4.3	FAFA del corregimiento de Buenos Aires.....	68
6.4.4	FAFA del municipio de San Francisco	70
6.4.5	FAFA del municipio de Granada	71
6.4.6	FAFA del corregimiento de La Piñuela	73
7.	Conclusiones	75
8.	Referencias bibliográficas	76

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de San Vicente Ferrer.....	10
Ilustración 2. Tren de tratamiento PTAR San Vicente Ferrer.....	11
Ilustración 3. Mapa de Santo Domingo.....	12
Ilustración 4. Tren de tratamiento de la PTAR Santo Domingo.....	13
Ilustración 5. Mapa del municipio de Granada.....	14
Ilustración 6. Tren de tratamiento de la PTAR Granada.....	15
Ilustración 7. Tren de tratamiento de la PTAR Buenos Aires.....	16
Ilustración 8. Mapa de San Francisco.....	17
Ilustración 9. Tren de tratamiento de la PTAR San Francisco.....	18
Ilustración 10. Mapa de Cocorná.....	19
Ilustración 11. Tren de tratamiento de la PTAR La Piñuela.....	20
Ilustración 12. Zonificación de diseño en un FAFA.....	20
Ilustración 13. Proceso metabólico de la digestión anaerobia.....	21
Ilustración 14. Material de soporte en plástico.....	30

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Panorámica general de la PTAR San Vicente Ferrer.....	11
Fotografía 2. Collage de la PTAR Santo Domingo.....	13
Fotografía 3. Vista General de la PTAR Buenos Aires.....	16
Fotografía 4. Plano aéreo de la PTAR San Francisco.....	18
Fotografía 5. Flotación de rosetas encima de la malla.....	39
Fotografía 6. Empuje del medio de soporte sobre la malla.....	39
Fotografía 7. Rosetas plásticas amarradas en bloques.....	40
Fotografía 8. Losa superficial y cámaras de inspección del FAFA Santo Domingo.....	41
Fotografía 9. Rosetas flotando en el FAFA Santo Domingo.....	41
Fotografía 10. Estado del medio de soporte FAFA Granada.....	42
Fotografía 11. Material de soporte empujando la malla.....	42
Fotografía 12. Rosetas amarradas en bloque FAFA Buenos Aires.....	43
Fotografía 13. Rosetas flotando FAFA Buenos Aires.....	43
Fotografía 14. FAFAS en fibra de vidrio San Francisco.....	44
Fotografía 15. Estado del medio de soporte FAFA San Francisco.....	44
Fotografía 16. Vista general del FAFA La Piñuela.....	45
Fotografía 17. Estado del medio de soporte FAFA La Piñuela.....	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tiempo de retención hidráulico recomendado por el RAS	27
Tabla 2. Valores recomendados de carga orgánica volumétrica	29
Tabla 3. Fechas de muestreo en las PTAR de estudio	31
Tabla 4. Pasos de evaluación de un filtro anaerobio de flujo ascendente	32
Tabla 5. Diseño de filtros anaerobios de flujo ascendente como unidad de pos-tratamiento (CONAGUA)	34
Tabla 6. Diseño de filtro anaerobio de flujo ascendente Edith Padilla	35
Tabla 7. Diseño de filtro anaerobio de flujo ascendente propuesto	36
Tabla 8. Resultados del muestreo físico químico PTAR San Vicente de Ferrer	46
Tabla 9. Resultado de muestreo PTAR del municipio de Santo Domingo	47
Tabla 10. Resultados del muestro realizado PTAR Buenos Aires	49
Tabla 11. Resultados de muestreo PTAR San Francisco	50
Tabla 12. Diseño de formulación del FAFA San Vicente de Ferrer	51
Tabla 13. Evaluación del FAFA San Vicente Ferrer	52
Tabla 14. Diseño de formulación FAFA Santo Domingo	54
Tabla 15. Evaluación del FAFA Santo Domingo	55
Tabla 16. Diseño de formulación FAFA Buenos Aires	57
Tabla 17. Evaluación del FAFA Buenos Aires	58
Tabla 18. Diseño de formulación FAFA Granada	59
Tabla 19. Evaluación del FAFA Granada	60
Tabla 20. Diseño de formulación FAFA San Francisco	61
Tabla 21. Evaluación del FAFA San Francisco	62
Tabla 22. Diseño de formulación FAFA La Piñuela	63
Tabla 23. Evaluación del FAFA La Piñuela	64
Tabla 24. Resultado diseño propuesto FAFA San Vicente de Ferrer	65
Tabla 25. Resultado de diseño propuesto FAFA Santo domingo	67
Tabla 26. Resultado de diseño propuesto FAFA Buenos Aires	69
Tabla 27. Resultado de diseño propuesto FAFA San Francisco	70
Tabla 28. Resultado de diseño propuesto FAFA Granada	72
Tabla 29. Resultado del diseño propuesto FAFA La Piñuela	73

1. RESUMEN

Desde que la humanidad comenzó a organizarse en comunidades, ha buscado que sus asentamientos estén cerca del agua, como recurso natural indispensable para el desarrollo de las actividades diarias, y siendo este, la base fundamental de toda forma de vida y conservación de la misma en la compensación de las necesidades básicas. No obstante, el vertimiento de las aguas residuales no tratadas, ha sido, desde entonces, la causa de los problemas de salud pública; pues estas afectaciones a la salud humana, sumadas al deterioro ambiental y ecosistémico, siguen siendo una problemática actual debido a agentes contaminantes, manejos inadecuados de los recursos e infraestructura deteriorada. Por esta razón, se han implementado mecanismos para el tratamiento del agua residual, usando tecnologías que se valen del uso de microorganismos para disminuir la carga contaminante hasta una concentración aceptable; sin embargo, en el diseño y construcción de dichos sistemas se han encontrado falencias que dificultan los resultados deseados, como ocurre en las plantas de tratamiento de agua residual municipal.

Este estudio se enfocó en mejorar las condiciones de operación de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA), para lo cual, se realizó una evaluación de diseño y construcción con base en mediciones realizadas en campo y en el análisis de parámetros hidráulicos, tales como: el tiempo de retención hidráulico, la carga orgánica volumétrica, la carga hidráulica superficial y la velocidad ascensional. Los resultados obtenidos mostraron que estas unidades no alcanzan altas eficiencias debido al incumplimiento de los parámetros hidráulicos en el diseño. Así mismo, al realizar un análisis en la formulación de estas unidades, se encontró que las metodologías de diseño centran su atención en obtener altas eficiencias, dejando de lado el cumplimiento de los parámetros hidráulicos; por esta razón, se realizó una metodología con la que se buscó integrar varios factores, y esto permitió obtener mejores resultados en comparación con los diseños actuales construidos. Aunque los volúmenes fueron mayores, éstos siguen guardando una relación directa con el volumen de las unidades que los anteceden. Pese a las mejoras de diseño y conforme a lo que se observó en la actividad de campo, se concluyó que, para el caso del FAFA, es importante la implementación de adaptaciones constructivas que permitan mantener el medio de soporte en el lugar que debe estar, pues esta situación terminó dificultando la operación de los filtros actuales y puede ser un hecho indirecto que genere variaciones de lo planteado en el diseño aplicado a la realidad.

2. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso preciado en el cual se ha modelado la vida y se ha transformado la sociedad desde sus inicios en la civilización humana. Con el paso de los años y debido al crecimiento poblacional, se ha incrementado su uso para fines domésticos, industriales y agropecuarios; agregando sustancias ajenas a su composición química natural y constituyéndose en lo que se denomina agua residual. Ésta es vertida en fuentes hídricas como corrientes, lagos, bahías, entre otros; que tienen una buena capacidad de dilución y auto purificación de contaminantes; sin embargo, al aumentar las cargas vertidas se excede dicha capacidad, con el consecuente deterioro de este recurso (Orozco, 2014).

Aprendiendo de los procesos naturales, el hombre ha implementado técnicas con microorganismos como la tecnología anaerobia, con el fin de disminuir la carga orgánica y sustancias tóxicas que se vierten (Molina et al., 2001). Importantes contribuciones de Young, McCarty y Lettinga, trajeron sistemas como los filtros anaerobios y los UASB (Díaz et al., 2002). En contraste, a pesar de los beneficios económicos, constructivos, de operación y mantenimiento, se han encontrado dificultades que parten desde los principios técnicos de diseño (Miki, 2010). En el transcurso del tiempo, con el uso de estos sistemas, se han reportado ineficiencias en el tratamiento y operación, relacionadas con el contacto de la masa bacteriana y el sustrato o la colmatación debido al material suspendido (López et al., 2008), por lo cual, se hace necesaria la implementación de sistemas combinados como complementos en el tratamiento (Chernicharo, 2007) como es el caso UASB – FAFA que resulta hasta en un 30% más barato que el uso de un proceso aerobio (Torres, 2012).

Estos sistemas generalmente se diseñan utilizando los principios básicos de la hidráulica y la digestión anaerobia, controlando y operando, como una caja negra, en la que solo se conoce la entrada y salida del sistema (Díaz et al., 2002). Por esta razón, se han evidenciado falencias en las etapas de arranque y operación para este tipo de sistemas combinados, siendo los problemas de diseño de los FAFA de mayor relevancia, pues no cumplen con las especificaciones adecuadas como complemento para el reactor, con lo que se incumplen las eficiencias estimadas en la formulación de los proyectos.

En este trabajo, se realizará una evaluación en el diseño y condiciones operativas de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA), de las plantas de tratamiento del corregimiento de Buenos Aires en el municipio de San Luis y el corregimiento de la Piñuela en el municipio de Cocorná; los municipios de Santo Domingo, San Vicente Ferrer, Granada y San Francisco, elegidos en vista de que los FAFA construidos en cada PTAR tienen características diferentes, bien sea por el material, el volumen o la forma; proponiendo metodologías que permitan obtener mejores desempeños en el proceso de operación.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar el diseño de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA), del corregimiento de Buenos Aires, La Piñuela y los municipios de San Vicente Ferrer, Santo Domingo, Granada y San Francisco.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar el diagnóstico de las especificaciones técnicas de diseño, operación y mantenimiento de los filtros anaerobios de flujo ascendente en las PTAR de estudio, mediante visitas de campo y análisis de información existente.
- Proponer una metodología que permita mejorar el diseño y operación de los filtros anaerobios, comparando el diseño de los filtros actuales con los resultados teóricos conseguidos en la metodología de diseño propuesta.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 Marco Geográfico

4.1.1 Municipio de San Vicente Ferrer

4.1.1.1 Localización

Se ubica en la región occidental del territorio de Colombia y en el centro – oriente del departamento de Antioquia (Ilustración 1), en el sistema montañoso que se constituye como Altiplano del Oriente Antioqueño. Su cabecera municipal se encuentra a 2.201 m.s.n.m., predominando el piso térmico frío (2000 – 3000 m.s.n.m.) con temperaturas medias de 17°C (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2011a). Geográficamente se localiza en las coordenadas 6° 16' 0" de latitud norte y 75° 20' 0" de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Tiene una extensión total de 23.211 hectáreas, de las cuales corresponden 170 al casco urbano y el resto a la zona rural.

El municipio de San Vicente Ferrer limita al norte con los municipios de Barbosa y Concepción, al sur con los municipios de Rionegro y Marinilla, al oriente con el municipio de El Peñol, y al occidente con los municipios de Guarne y Girardota (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2011a).



Ilustración 1. Mapa de San Vicente Ferrer

Fuente: Modificado de evaluación y zonificación de riesgo San Vicente de Ferrer

4.1.1.2 *Hidrografía y clima*

El sistema hidrográfico del municipio está conformado por cuencas abastecedoras de especial importancia, esto debido al servicio ecosistémico que prestan de aprovisionamiento y regulación hídrica. Entre las principales fuentes que nacen o discurren sobre el territorio, se identifican 1 río y 20 quebradas (Concejo municipal San Vicente Ferrer, 2017). San Vicente Ferrer está bajo la influencia del cañón del río Porce y la cuenca media del río Nare, posición que favorece en el asentamiento de un clima frío en términos generales. Las temperaturas varían entre 16°C, y 20°C; el régimen de precipitación media anual está entre 1.000 y 4.000 mm, que se divide en dos periodos de lluvia entre los meses de abril – mayo y octubre – noviembre, y dos periodos secos entre los meses de enero – marzo y julio – septiembre (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2011a).

4.1.1.3 *Población*

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2005), la población total del municipio es de 18.552 habitantes, de los cuales 6.970 están establecidos en la zona de cabecera municipal, y 11.582 corresponden a la población rural.

4.1.1.4 *Tren de tratamiento de las aguas residuales*

La planta de tratamiento del municipio (Ilustración 2 y Fotografía 1) está conformada por un sistema de cribado que se encarga de proteger bombas, válvulas, conducciones y otros elementos contra posibles daños y obturaciones provocados por la presencia de objetos de gran tamaño como: basuras, ramas, piedras (Metcalf & Eddy, 1995). Dos desarenadores que tienen como

propósito separar materiales inertes y densos como: arenas, arcilla, vidrios, etc. Para proteger los sistemas posteriores de posibles obstrucciones y cementación (Qasim & Zhu, 2018). Una canaleta Parshall que es un sistema hidráulico que se utiliza como aforador, con el fin de mantener un control del caudal de agua residual que ingresa a la PTAR. Un tanque de bombeo que se encarga de impulsar el agua residual hasta el tratamiento secundario. Dos reactores UASB que tienen como objetivo eliminar sustancias orgánicas solubles y sólidos en suspensión (Qasim & Zhu, 2018), transformando la DQO biodegradable en DQO gaseosa para facilitar su salida del medio acuoso o agua residual. Dos filtros anaerobios de flujo ascendente que sirven como unidad de postratamiento del UASB y que se encargan de degradar la materia orgánica faltante; por último, están los lechos de secado que sirven para acondicionar los lodos extraídos de los tratamientos biológicos para su posterior disposición en un relleno sanitario.

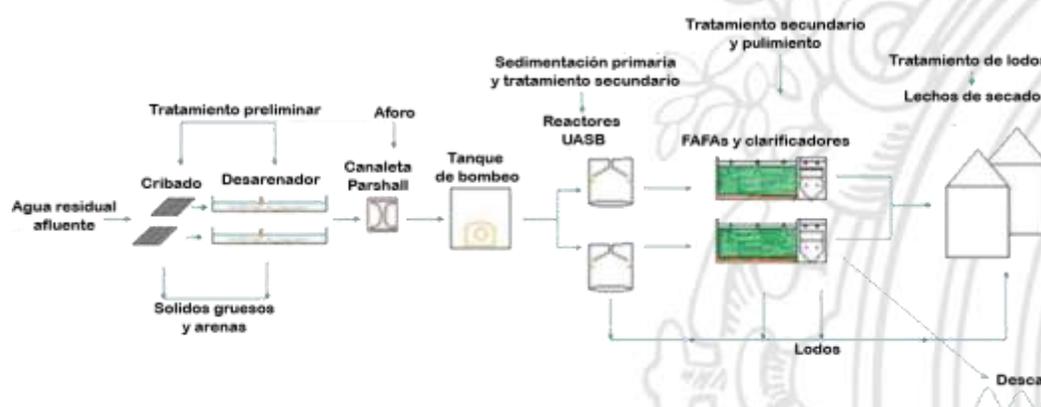


Ilustración 2. Tren de tratamiento PTAR San Vicente Ferrer
Fuente: Adaptado de informe de diagnóstico PTAR San Vicente Ferrer



Fotografía 1. Panorámica general de la PTAR San Vicente Ferrer
Fuente: Autoría propia

4.1.2 Municipio de Santo Domingo

4.1.2.1 Localización

Se encuentra ubicado en el nordeste del departamento de Antioquia (Ilustración 3), entre los ríos Medellín y Porce, Nare y Nus. Limita por el norte con los municipios de Yolombó y Cisneros, por el este con San Roque, en el sur con Alejandría y Concepción, y en el oeste con los municipios de Barbosa y Don Matías (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2011b).



Ilustración 3. Mapa de Santo Domingo

Fuente: Modificado de evaluación y zonificación de riesgo Santo Domingo

4.1.2.2 Hidrografía y clima

El sistema montañoso del territorio de Santo Domingo, presenta alturas que varían desde los 875 m.s.n.m. en el valle del río Nus a 2.300 m.s.n.m. en los cerros Aguas Frías y Rumazón, su cabecera municipal se encuentra a 1970 m.s.n.m. Los climas que presenta el municipio están influenciados fuertemente por la zona del oriente antioqueño que por lo general, es frío, húmedo y tropical; sin embargo, estudios más puntuales permiten comprobar que los climas que configuran el sistema en Santo Domingo son: templado, con una temperatura de entre 17,9 y 22,6 °C; frío, con temperaturas que van desde los 14,8°C y 17,2°C; de manera ordinaria, la precipitación promedio multianual va desde los 3.000 a 5.000 mm (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2011b).

4.1.2.3 Población

El número total de habitantes reportados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2018) fue de 12.394, de este total, un número de 2.808 habitantes se encontraban establecidos en la cabecera urbana y 9.586 habitantes en la zona rural.

4.1.2.1 Tren de tratamiento de las aguas residuales

La planta de tratamiento del municipio de Santo Domingo (Ilustración 4 y fotografía 2), está compuesta por dos unidades de cribado, dos desarenadores, un sistema de bombeo que impulsa el agua residual a un reactor UASB, seguido de dos filtros anaerobios de flujo ascendente donde termina el tratamiento para ser finalmente vertida el agua residual tratada en la fuente receptora. La PTAR cuenta además con 3 celdas de lechos de secado para acondicionar las arenas y lodos generados en el tratamiento.

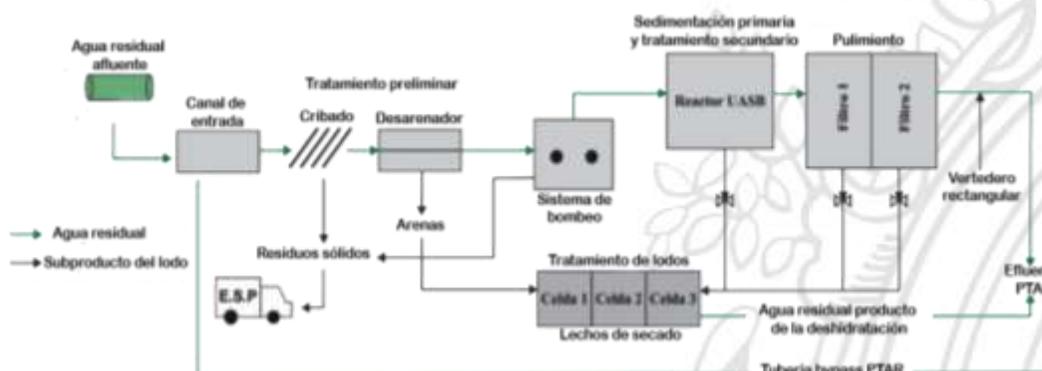


Ilustración 4. Tren de tratamiento de la PTAR Santo Domingo

Fuente: Adaptado del informe de diagnóstico de la PTAR Santo Domingo



Fotografía 2. Collage de la PTAR Santo Domingo

Fuente: Autoría propia

4.1.3 Municipio de Granada

4.1.3.1 Localización

El municipio de Granada se encuentra situado geográficamente a 06°09' de latitud norte y a 75°11' latitud oeste Greenwich. Hace parte de la subregión oriente del departamento de Antioquia (Ilustración 5). Granada limita al norte con los municipios de El Peñol y Guatapé, al

oriente con San Carlos y San Luis, al sur con los municipios de Cocorná y al occidente con los municipios de Santuario y Marinilla (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2012a).

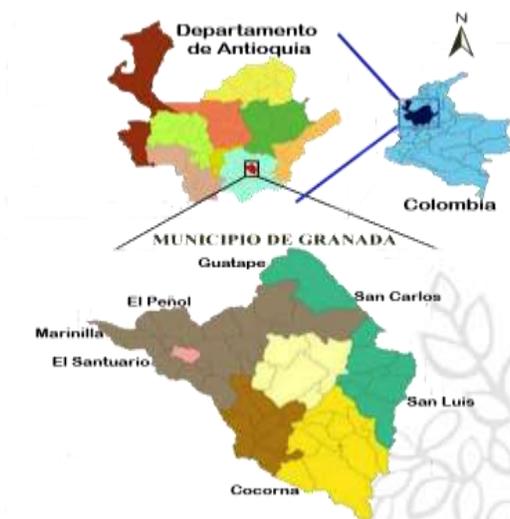


Ilustración 5. Mapa del municipio de Granada

Fuente: Modificado de evaluación y zonificación de riesgo Granada

4.1.3.2 *Hidrografía y clima*

Su altura sobre el nivel del mar oscila entre los 950 y los 2.500 m.s.n.m., la cabecera municipal se ubica a 2.050 m.s.n.m. El territorio municipal presenta una temperatura promedio de 18°C. El clima está determinado por los aspectos geográficos y atmosféricos que le dan una amplia variación al territorio, con temperaturas de 29°C en la zona sur, hasta lo más fríos en el norte con 16°C. El sistema de cuencas, se compone por la cuenca baja del río San Matías hasta su desembocadura al Tafetanes, que delimita otra cuenca donde se represan aguas para el aprovechamiento hidroeléctrico. La cuenca del río San Matías surte a la represa de El Peñol – Guatapé, la cual se halla localizada en la cabecera municipal a orillas de la quebrada Santa Bárbara (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2012a).

4.1.3.3 *Población*

El número total de habitantes reportados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2018) fue de 10.117, de este total, 5.541 habitantes que se establecieron en la cabecera urbana y 4.576 habitantes en la zona rural del territorio.

4.1.3.4 *Tren de tratamiento de las aguas residuales*

La planta de tratamiento del municipio de Granada (Ilustración 6), está compuesta por dos rejillas en el cribado, dos desarenadores y una canaleta Parshall, seguido de un sedimentador primario que contiene placas inclinadas para aumentar el área superficial de contacto para lograr separar los sólidos orgánicos sedimentables del agua residual, luego se encuentran dos filtros anaerobios de flujo ascendente como sistema secundario, para finalmente verter el agua residual tratada a la

fuente receptora. El tratamiento de los lodos producidos en el tratamiento primario y secundario es digerido en un reactor UASB que busca estabilizarlo para posteriormente ser llevado a los cuatro lechos de secado disponible para su deshidratación.

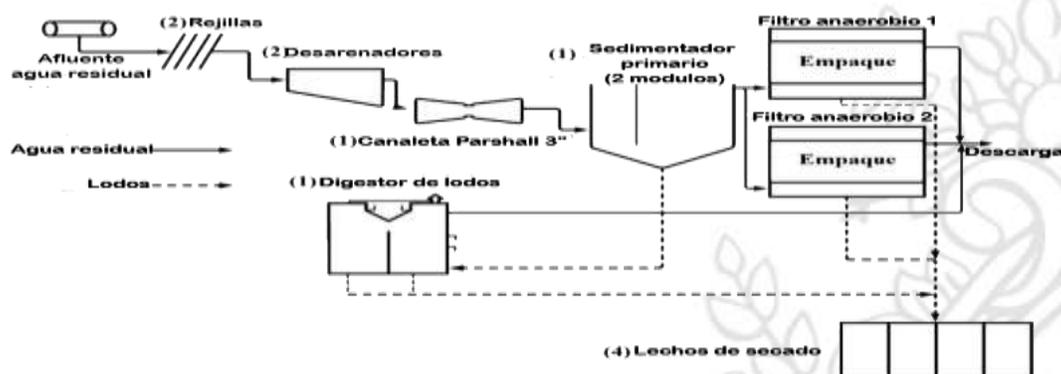


Ilustración 6. Tren de tratamiento de la PTAR Granada
Fuente: Adaptado de informe de diagnóstico de la PTAR Granada

4.1.4 Corregimiento de Buenos Aires

4.1.4.1 Localización

Buenos Aires es un corregimiento del municipio de San Luis, este último pertenece a la región del oriente del departamento de Antioquia. Posee un área superficial de 516,7 Km². Limita con los municipios de San Carlos y Puerto Nare por el norte, Puerto Triunfo por el oriente, San Francisco por el sur y con los municipios de Cocorná y Granada por el occidente (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2012c).

4.1.4.2 Hidrografía y clima

El corregimiento de Buenos Aires se encuentra sobre los 1.435 m.s.n.m. con una temperatura promedio de 19°C (Vasquez Ruiz et al., 2020), aunque en el municipio de San Luis se ha reportado 24°C como la temperatura promedio. El sistema montañoso se caracteriza por ser quebrado y con altas pendientes (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2012c).

4.1.4.3 Población

El reporte de habitantes que se encuentran establecidos en Buenos Aires es de 214 habitantes (Vasquez Ruiz et al., 2020).

4.1.4.4 Tren de tratamiento

La planta de tratamiento del corregimiento de Buenos Aires (Ilustración 7 y Fotografía 3), está compuesta por un sistema de cribado, un desarenador, seguido de un tanque séptico el cual se caracteriza porque la sedimentación y la digestión ocurren dentro del mismo tanque, consiste esencialmente en uno o varios tanques en serie de sedimentación de sólidos, los beneficios son:

eliminar sólidos suspendidos y material flotante, realizar el tratamiento anaerobio de los sólidos sedimentados, y almacenar lodos y material flotante (Romero Rojas, 2004), luego se encuentra un FAFA para finalmente verter el agua residual tratada a la fuente receptora. Para deshidratar los lodos producidos se cuenta con un lecho de secado.

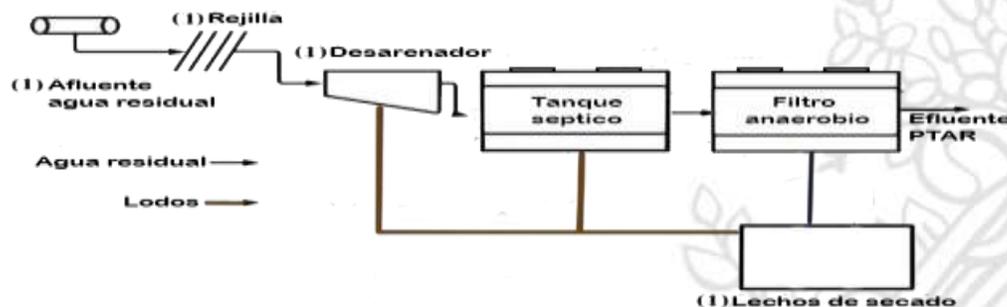


Ilustración 7. Tren de tratamiento de la PTAR Buenos Aires

Fuente: Adaptado del informe de diagnóstico de la PTAR Buenos Aires



Fotografía 3. Vista General de la PTAR Buenos Aires

Fuente: Autoría propia

4.1.5 Municipio de San Francisco

4.1.5.1 Localización

Con una extensión territorial de 386,58 km², el municipio se ubica geográficamente a 5° 57' 42" de latitud norte y 75° 05' 58" de longitud al oeste del meridiano de Greenwich, el municipio está localizado al sur oriente del departamento de Antioquia y limita con el municipio de Cocorná dividido por el recorrido del río Santo Domingo y del Río Claro (Ilustración 8); sirviendo como límite entre los municipios de San Luis y Sonsón (Alcaldía municipal de San Francisco, 2019).



Ilustración 8. Mapa de San Francisco

Fuente: Modificado de evaluación y zonificación de riesgo San Francisco

4.1.5.2 Población

Según el reporte realizado por el DANE en el año 2018, el territorio de San Francisco estaba habitado por 5.648 habitantes, en los que se reportan 2.486 en la cabecera urbana y 3.162 en la zona rural (DANE, 2018).

4.1.5.3 Hidrografía y clima

La cabecera municipal se ubica a 1.250 m.s.n.m., entre un sistema montañoso que presenta variaciones altitudinales de 170 a 2.200 m.s.n.m. La temperatura media que se registra es de 23°C. En el municipio predomina el clima frío con meses muy lluviosos entre mayo y octubre. Los meses más secos son entre enero y febrero. La precipitación promedio anual es de 4.901 mm, y las temperaturas registradas varían desde los 27°C en las zonas más bajas hasta los 17°C en el sector sur, donde nace el Río Claro y el Río Caunzal (CORNARE & Gobernación de Antioquia, 2012b).

4.1.5.4 Tren de tratamiento de las aguas residuales

La planta de tratamiento del municipio de Granada (Ilustración 9 y Fotografía 4), está compuesta por dos rejillas de cribado, dos canales desarenadores y una canaleta Parshall como sistema de aforo, posteriormente se tiene un reactor UASB y dos FAFA para finalmente descargar el agua tratada a la fuente receptora. Para el tratamiento de los lodos producidos la PTAR cuenta con 4 lechos de secado.

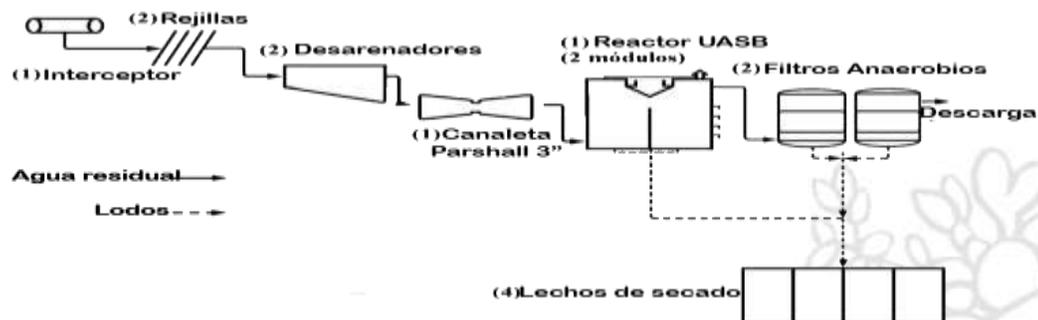


Ilustración 9. Tren de tratamiento de la PTAR San Francisco
Fuente: Adaptado del informe de diagnóstico PTAR San Francisco



Fotografía 4. Plano aéreo de la PTAR San Francisco

Fuente: Constructor de la PTAR

4.1.6 Corregimiento de la Piñuela municipio de Cocorná

4.1.6.1 Localización

Se encuentra localizado en jurisdicción del municipio de Cocorná y se ubica al oriente del departamento de Antioquia (Ilustración 10). Limita al norte con el municipio de Santuario, al sur con San Francisco y Sonsón, por el oriente con San Luis y Granada, y al occidente con El Carmen de Viboral (Alcaldía municipal de Cocorná, 2015).



Ilustración 10. Mapa de Cocorná

Fuente: Modificado de evaluación y zonificación de riesgo San Francisco

4.1.6.2 *Hidrografía y clima*

El corregimiento se encuentra a 1.350 m.s.n.m., el clima en la cabecera oscila entre los 23 y 25 °C con una temperatura promedio de 23°C (Ramírez et al., 2021). El territorio se caracteriza por una elevada precipitación con valores de 3.500 a 5.000 mm anuales con un valor promedio de 4.560 mm en la zona urbana. El territorio de Cocorná se extiende desde los 450 m.s.n.m. en el Cañón del Río Santo Domingo, hasta los 2.350 m.s.n.m. en el sector del Altiplano del Oriente Antioqueño por lo cual, hay fluctuaciones entre los 16 y 26 °C. (Alcaldía municipal de Cocorná, 2015)

4.1.6.3 *Población*

Se tiene un registro de viviendas conectadas a la red de alcantarillado combinado que fue suministrado por el presidente de la junta de acción comunal, el señor Fainer Zuluaga Vásquez, donde hay 250 viviendas (Ramírez et al., 2021).

4.1.6.4 *Tren de tratamiento*

La planta de tratamiento del corregimiento La Piñuela (Ilustración 11), está compuesta por dos rejillas de cribado, dos canales desarenadores y una canaleta Parshall, seguido de un reactor UASB que es complementado por un FAFA, para finalmente descargar el agua residual tratada a la fuente receptora. La PTAR cuenta con cuatro lechos de secado para la deshidratación de los lodos producidos.

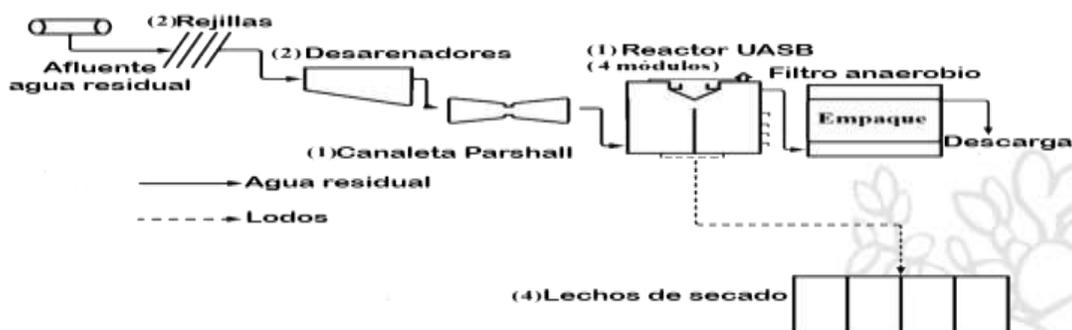


Ilustración 11. Tren de tratamiento de la PTAR La Piñuela

Fuente: Adaptado de diagnóstico de la PTAR La Piñuela

4.2 Marco Teórico -Conceptual

4.2.1 Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)

Los primeros reactores anaerobios, conocidos como reactores de primera generación, eran considerados ineficientes debido al pobre contacto existente entre el sustrato y la biomasa, ejemplo de esto son los tanques sépticos y los digestores de lodos de una sola etapa. En 1969, Young y McCarthy desarrollaron los FAFA con base en la estrategia de fijar la biomasa a un soporte de material inerte (Ilustración 12), logrando una gran área superficial para el crecimiento y adherencia de biopelículas (Díaz et al., 2002). Este material está completamente sumergido en el agua residual y por eso no hay aire dentro del sistema, garantizando de esta manera, las condiciones anaerobias (Ramalho, 1996). El agua ingresa por la parte inferior del reactor y asciende para pasar por el medio de soporte, donde los microorganismos degradan la materia orgánica presente en ella, facilitando la adherencia de las bacterias, logrando conseguir altos tiempos de retención celular con bajos tiempos de retención hidráulica (Metcalf & Eddy, 1995).

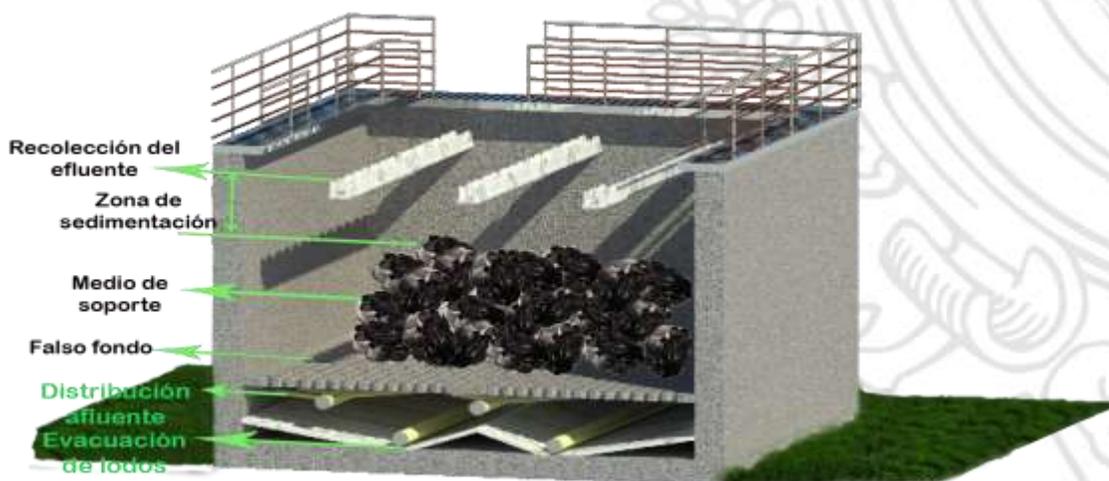


Ilustración 12. Zonificación de diseño en un FAFA

Fuente: Autoría propia, modelación realizada en REVIT

4.2.2 Microbiología anaerobia

La digestión anaerobia (Ilustración 13) es un proceso microbiológico complejo que se realiza en ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica (carbohidratos, proteínas y lípidos) es transformada en biomasa y compuestos orgánicos de cadena más simple (Chernicharo, 2007). Se ha identificado que este proceso de degradación es llevado a cabo por una comunidad de distintas especies de bacterias, con funciones específicas en las reacciones secuenciales que se dan, por lo que se considera como una asociación sintrófica. La ruta de degradación se ha delimitado en cuatro etapas definidas como: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (López et al., 2008).

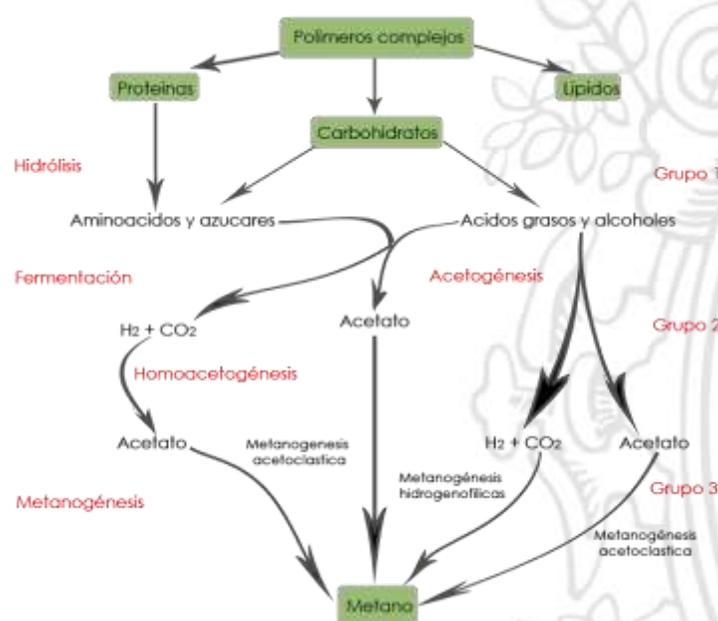


Ilustración 13. Proceso metabólico de la digestión anaerobia

Fuente: Tomado y adaptado de Digestión anaerobia: una mirada a la tecnología

4.2.2.1 Hidrólisis

La hidrólisis es un proceso de solubilización de compuestos orgánicos complejos (carbohidratos, proteínas y lípidos) en moléculas más simples y pequeñas (monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga) (Qasim & Zhu, 2018). Dicho proceso es efectuado por exo-enzimas excretadas por las bacterias fermentativas hidrolíticas, ya que los microorganismos no son capaces de asimilar la materia orgánica particulada (Sperling & Chernicharo, 2005). Los compuestos hidrolizados pueden pasar a través de la pared y membrana celular de las bacterias, para ser aprovechadas como fuente de energía y carbono celular (Metcalf & Eddy, 1995).

Las bacterias que llevan a cabo estas reacciones son anaerobias facultativas los géneros más frecuentes, que llevan a cabo esta reacción son miembros de la familia *Enterobacteriaceae* (Diaz et al., 2002).

4.2.2.2 *Acidogénesis*

Los compuestos de bajo peso molecular -resultado de la hidrólisis- son aprovechados por un grupo de microorganismos fermentativos que son anaerobios facultativos y obligados, llamados acetógenos o formadores de ácidos (Qasim & Zhu, 2018). En este proceso, son convertidos en moléculas simples como ácidos grasos volátiles de cadena corta, alcoholes, acetato, ácido láctico, CO₂, H₂, NH₃ y H₂S. Los resultados finales y el tipo de producto derivado, dependerá de las condiciones en las que se encuentre el medio del reactor; para las reacciones acidogénicas menos favorables energéticamente, dependerán fuertemente de las concentraciones de hidrógeno, si éste se remueve eficientemente por organismos consumidores como metanógenos, el acetato será el principal producto final, pero si este se retrasa se acumulará H₂ (López et al., 2008), lo que dificulta la descomposición anaerobia. Hay un límite termodinámico de concentración máxima permisible, que se mide en términos de la ley de Henry, en la cual la presión parcial de hidrógeno debe estar por debajo de 10⁻⁴ atm (Orozco, 2014).

La acidogénesis es la etapa de conversión más rápida en la cadena trófica anaerobia, dando como resultado velocidades de crecimiento de las bacterias diez o veinte veces más altas, y rendimientos de las bacterias y velocidades de conversión, cinco veces más altos comparados con las reacciones metanogénicas. Por esa razón, los reactores anaerobios son susceptibles a la acidificación, es decir, a repentinas caídas de pH, cuando existen sobrecargas en los reactores o perturbaciones por compuestos tóxicos. Una vez que se ha consumido la alcalinidad por los ácidos producidos, el pH comienza a bajar, resultando en concentraciones más altas de ácidos grasos volátiles (AGV) no disociados, y generando una inhibición más severa de los metanógenos. Esto último, obviamente conduce a una acumulación más rápida de AGV, y subsecuentemente, a una caída de pH (López et al., 2008).

4.2.2.3 *Acetogenesis*

Las bacterias acetogénicas son las responsables de la oxidación de los productos generados en la fase acidogénica, a un sustrato más apropiado para los microorganismos metanogénicos, ya que estos solo pueden transformar en metano, el hidrogeno y el acetato (Sperling & Chernicharo, 2005). Algunos estudios realizados han dilucidado la estrecha relación entre bacterias acetogénicas productoras de H₂, y arqueobacterias metanogénicas consumidoras de H₂, regulando los niveles de hidrógeno en el medio; bajo condiciones estables de digestión la presión parcial del hidrogeno se mantiene por debajo de 10⁻⁴ atm, lo que es suficiente para asegurar que se lleve a cabo la producción de acetato (López et al., 2008).

4.2.2.4 Metanogénesis

El grupo de las arqueobacterias metanogénicas se encargan de reducir el dióxido de carbono, utilizando el hidrógeno como donador de electrones y de descarboxilar el acetato para formar metano, es únicamente en esta etapa cuando la DQO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) del afluente se convierte a una forma gaseosa que abandona el reactor automáticamente, los metanógenos se clasifican en dos grandes grupos: los metanógenos acetoclásticos que generan el 70% del metano que se produce a partir de acetato como principal precursor. Su tasa de crecimiento es muy baja resultando en tiempos de duplicación de varios días; y los otros microorganismos son los metanógenos hidrogenotróficos que generan directamente el metano a partir del hidrógeno (Sperling & Chernicharo, 2005). Estas bajas velocidades de crecimiento explican por qué los reactores anaerobios requieren un periodo de puesta en marcha muy largo, sin embargo, el grupo hidrogenotrófico tiene una velocidad de crecimiento mucho más rápida, con tiempos de duplicación de 4 a 12 horas (López et al., 2008).

4.2.2.5 Sulfato reducción

Las aguas residuales, que contienen un exceso de donadores de electrones orgánicos con respecto a la cantidad de nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), sulfato (SO_4^{2-}) o sulfito (SO_3^{2-}), pueden ser utilizados por bacterias de sulfato reductoras como aceptores de electrones (Diaz et al., 2002).

Una característica de los medios donde las sulfatoreductoras desarrollan una alta actividad metabólica, es la presencia de olores desagradables producidos por el H_2S , así como el color negro en las aguas y los sedimentos. Debido a la formación de sulfuros que se precipitan al reaccionar con diferentes metales, estos microorganismos pueden crecer en presencia o ausencia de sulfatos en el afluente, ya que pueden usar otras rutas metabólicas (Metcalf & Eddy, 1995). Como consecuencia a que la solubilidad del H_2S es mucho más alta que la del CH_4 , se tendrá una remoción de DQO considerablemente más baja en la fase líquida (López et al., 2008).

En presencia de sulfatos, las bacterias sulfato reductoras son capaces de oxidar compuestos orgánicos e hidrógenos, compitiendo con las bacterias metanogénicas, generando la inhibición de las bacterias acetoclásticas, ya que los ácidos grasos como el propionato y el butirato son oxidados completamente a CO_2 o parcialmente hasta acetato (Diaz et al., 2002).

4.2.3 Biopelícula

Los reactores de biopelícula retienen las células microbianas en un conglomerado unido a portadores fijos o móviles. La matriz de la biopelícula consta de microorganismos, agua y una variedad de componentes solubles y particulados que incluyen productos microbianos solubles, material inerte y sustancias poliméricas extracelulares (EPS); de este modo, los microbios adheridos están protegidos del lavado, siempre y cuando no se genere un desprendimiento de los microorganismos y puedan crecer en lugares donde el suministro de alimento sea abundante. (Water Environment Federation, 2017)

Los microorganismos más cercanos a la superficie del biofilm, tienen la ventaja de obtener mayores concentraciones de sustrato, pero son susceptibles al desprendimiento inducido por el cizallamiento generado por el flujo del agua residual y la abrasión que se inicia por la colisión de las partículas, mientras los microorganismos que están próximos a la superficie del medio de soporte están más protegidos al desprendimiento, pero tienen una menor disponibilidad del sustrato.

El transporte de alimento es la principal diferencia entre el biofilm y el crecimiento suspendido; normalmente, los sistemas de crecimiento adherido tienen como limitante la cantidad de biomasa, por otro lado los sistemas de crecimiento adherido son limitados por la difusión molecular o el área superficial disponible de crecimiento (Water Environment Federation, 2017). En cualquier posición dentro de la biopelícula, el sustrato es utilizado de la misma manera como ocurre en el crecimiento suspendido (Rittman & McCarty, 2001).

El tamaño de la biopelícula depende en gran medida del medio acuoso en el que se encuentra, los entornos turbulentos de alta tensión cortante dan como resultado biopelículas planas y más densas, mientras que los entornos de baja tensión cortante, generan biopelículas rugosas y menos densas (Loosdrecht et al., 1995). Estudios han sugerido que las biopelículas planas y más densas pueden tener una mejor difusividad, por lo cual, controlar el espesor adecuado produce un entorno estable no sujeto a la resistencia excesiva de transferencia de masa (Water Environment Federation, 2017).

4.2.4 Biogas

La composición del biogas producido a partir de la digestión anaeróbica varía según la composición del sustrato, ya que un alto contenido en carbohidratos resultara con un contenido de metano bajo y un contenido de CO₂ alto en la producción total de biogas, mientras, que, si se tiene un sustrato con un contenido de proteínas y lípidos altos, el rendimiento teórico de metano aumentaría; el rendimiento se estima en 0,37, 1,0 y 0,58 m³ de CH₄ por kg de materia orgánica respectivamente. La generación de metano a partir de procesos anaeróbicos es proporcional a la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) de los residuos o lodos. El valor de DQO del gas metano es 4 gDQO/gCH₄, a temperatura y presión estándar (20 °C y 1 atm de presión), esto corresponde a 0,35 m³ de CH₄ producido/kg DQO eliminado (Drapcho et al., 2020).

Generalmente los procesos anaerobios son más eficientes energéticamente para aguas residuales con concentraciones mayores a 300 mg DBO/L, esto se debe a que en estas condiciones, la fracción producida disuelta en el efluente se vuelve insignificante en relación con la producción total de metano (Water Environment Federation, 2017).

4.2.5 Factores que intervienen en el proceso

Los procesos microbiológicos necesitan de unas condiciones específicas que adecuan su entorno, para que el desarrollo sea adecuado y su desempeño en la degradación de la materia orgánica sea eficiente, a continuación, se detallan los parámetros más relevantes.

4.2.5.1 pH

La actividad enzimática en las células permite que se desarrolle el metabolismo bacteriano, y finalmente, es el hecho por el cual nos valemos en el tratamiento de aguas residuales al usar tecnologías biológicas. Diversos estudios han mostrado que cambios extremos en el pH pueden afectar gravemente la estructura protéica de las enzimas, llegando a inactivar o incluso a desnaturalizar (Montoya, 2013). Por tal razón, no se logra el aprovechamiento del sustrato para la obtención de energía y formación de biomasa, esto se resume en una situación indeseada para un reactor o filtro anaerobio (Sperling, 1996).

El pH en la digestión anaerobia está en función de la producción de ácidos grasos volátiles (AGV), y de la alcalinidad presente en el medio, un aumento en la concentración de AGV que sobrepase la capacidad de consumo de ellos por los microorganismos que los pueden aprovechar, se traduce en una acumulación en el medio, lo que conduce a la inhibición de las bacterias metanogénicas hidrogenófilas, acumulando el H₂ e inhibiendo a las bacterias metanogénicas acetoclasticas, con lo que se abre la posibilidad de la acidificación del proceso sin oportunidad de retorno (Padilla, 2010).

Para que el proceso se desarrolle de forma adecuada, el pH debe estar entorno a la neutralidad; un intervalo aceptable es de 6 a 8,3 unidades de pH. A pesar de la importancia de llevar un control de este parámetro en la operación de filtros anaerobios, no se considera una herramienta adecuada, dado que la digestión anaerobia resulta ser muy lenta y cuando se logra identificar una variación considerable en el pH, ya puede ser tarde para tomar medidas correctivas, y la acidificación del sistema se torne irreversible. En consecuencia, se recomienda la medición de otros parámetros como la concentración de AGV y la alcalinidad (Diaz et al., 2002).

4.2.5.2 Temperatura

Es un factor determinante y que se debe tener en cuenta a la hora de elegir y diseñar cualquier sistema biológico en particular. Para el tratamiento anaerobio se han identificado dos rangos de operación, el mesofílico (25 a 40°C) con un óptimo de operación de 35 °C y el proceso termófilo que opera en un intervalo de (50 a 65°C) (Comisión Nacional de Aguas, 2019). La temperatura está estrechamente relacionada con la actividad metabólica de los microorganismos, la tasa de transferencia de gases, las características de sedimentación de los sólidos biológicos y las tasas de reacción química. Esto termina influyendo en parámetros de diseño como el tiempo de retención y la aplicación de cargas orgánicas (Comisión Nacional de Aguas, 2019).

El régimen mesofílico es el más usado en procesos de digestión anaerobia, a pesar de que en el régimen termófilo permite conseguir mejores eficiencias, el sentido de esto es que tiende a hacer del proceso anaerobio más inestable a cualquier cambio en las condiciones de operación; por ejemplo, la inhibición microbiológica causada por la toxicidad de algunos compuestos, (Padilla, 2010) sin embargo, el operar un filtro bajo condiciones termófilas, ofrece ventajas muy provechosas como una mayor producción de gas por unidad de sólidos volátiles, se favorece la eliminación de un buen porcentaje de virus y bacterias patógenas, además de una separación sólido – líquido más rápida al disminuir la viscosidad de la solución (Córdova et al., 2019).

4.2.5.3 Sólidos totales y crecimiento de la biomasa.

Los filtros anaerobios pueden ser usados en el tratamiento de aguas residuales concentradas o diluidas, no obstante, son más adecuados para aguas con materia orgánica soluble, puesto que la obstrucción del medio de soporte aumenta con la concentración de sólidos suspendidos en el afluente, lo cual los cataloga como unidades más enfocadas al pulimiento de la calidad de los efluentes de otros sistemas (Dias et al., 2017). La mayor parte de la biomasa se acumula en los intersticios del medio filtrante, que según estudios es la biomasa suspendida la que realiza el mayor trabajo en la degradación de la materia orgánica (López et al., 2008), aunque, se pueden generar taponamientos y afectar las características hidrodinámicas del medio como canalización de flujos, cortos circuitos, régimen de mezcla, tiempos de residencia, zonas muertas y recirculación interna (Galindo et al., 2016).

Por otro lado, para la biopelícula adherida al medio de soporte, estudios realizados indican que normalmente el espesor está entre 1 mm a 3 mm (Romero Rojas, 2004), Sin embargo, si su espesor es considerable y el tamaño del material filtrante sea tal que el porcentaje de vacíos es bajo, se puede tener riesgo de taponamiento en el filtro (Alvarado, 2011).

4.2.6 Criterios de diseño

Young (1991), reunió datos operacionales de distintos filtros anaerobios, los cuales correlacionó estadísticamente para determinar los parámetros con mayor influencia en el desempeño de estos sistemas. Entre las variables que tienen mayor influencia en el diseño son: el TRH, la concentración del agua residual, el área superficial del medio de soporte, la carga orgánica volumétrica y la velocidad ascensional.

4.2.6.1 Caudal de diseño

A la hora de proyectar las instalaciones de tratamiento de las aguas residuales generadas en una comunidad, como punto de partida es fundamental conocer el caudal (Metcalf & Eddy, 1995). Según el reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (2000), los caudales deben relacionarse con la población servida, para determinar los aportes de agua residual per cápita proyectados a 25 años.

4.2.6.2 *Tiempo de retención hidráulico (TRH)*

Las aguas residuales domésticas normalmente tienen una concentración menor a 2000 mg/L de DQO, en estas condiciones el parámetro que rige el diseño es el tiempo de retención hidráulico, que se refiere al tiempo medio de permanencia del agua residual en el interior del filtro, y se calcula así

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

Donde:

TRH: tiempo de retención hidráulica (días)

V: volumen del filtro anaerobio (m³)

Q: flujo de alimentación (m³/d)

Investigaciones desarrolladas en Brasil, donde se evaluó el desempeño de varios filtros anaerobios, se encontró que pueden llegar a obtener una efectividad apropiada, trabajando con tiempos de retención hidráulica del orden, entre 4 a 10 horas (Goncalves et al., 2001). Los sistemas de baja tasa de carga, es decir, tiempos de retención hidráulica relativamente largos, generalmente se aplican para aguas concentradas, mientras que los sistemas de alta tasa -tiempos cortos de retención hidráulica; los tiempos de retención celular altos- habitualmente se aplican a aguas residuales más diluidas (Drapcho et al., 2020).

El reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (2000) proporciona en el “título E - tratamiento de aguas residuales” los criterios de diseño que se deben tener en cuenta para los filtros anaerobios de flujo ascendente, la siguiente (Tabla 1) presenta los valores propuestos como adecuados, para el tiempo de retención hidráulica relacionado a la carga orgánica del agua residual afluyente.

Tabla 1. Tiempo de retención hidráulico recomendado por el RAS

Concentración orgánica afluyente (mg DBO ₅ /L)	TRH (h)		
	mínimo	promedio	máximo
Mínima: 50 Media: 65 Máxima: 80	3	5,25	12
Mínima: 80 Media: 190 Máxima: 300	2,5	5,25	12
Mínima: 300	2,5	5,25	12

Media: 650 Máxima: 1000			
Mínima: 1000 Media: 3000 Máxima: 5000	3	7	12

Fuente: RAS 2000

El tiempo de retención hidráulico debe ser suficiente para permitir un estrecho contacto entre los reactantes. Si se tiene en cuenta la baja velocidad de crecimiento de las bacterias metanogénicas, que usan el 90% de la energía en la producción de metano y solo el 10% en síntesis celular, implica que el tiempo de residencia de la biomasa debe incrementar.

4.2.6.3 Carga Orgánica Volumétrica (COV)

Se define como la cantidad de carga orgánica que recibe el reactor por unidad de volumen de lecho filtrante, se expresa así,

$$COV = \frac{S_o * Q}{V_{lecho}}$$

S_o: concentración de DBO en el afluente mg/L

Q: flujo de alimentación m³/d

V_{lecho}: volumen del lecho filtrante m³

Normalmente la carga orgánica volumétrica está entre 1,0 y 30,0 kg DQO/m³d, este criterio es muy utilizado para los reactores y filtros de tratamiento anaerobio donde no se puede medir con precisión los sólidos suspendidos (Orozco Jaramillo, 2014). Los filtros anaerobios pueden soportar cargas orgánicas altas; generalmente las cargas aplicadas no sobrepasan los 12 kg DBO/m³d para aguas residuales domésticas (Romero Rojas, 2004). Cuando el agua residual tiene concentraciones superiores a 12.000 mg DQO/L como puede ocurrir en aguas de residuo industrial, si se tiene esta condición, el criterio que rige el diseño, sería la COV (Carga Orgánica Volumétrica). (Comisión Nacional de Aguas, 2019); por el contrario, cuando se trata de aguas residuales diluidas como el agua de origen doméstico, el criterio fundamental que rige el diseño es el TRH.

En estudios realizados a los filtros anaerobios, se han logrado resultados asertivos aplicando una COV de 0,15 a 0,50 kg DBO/m³d para el volumen total del filtro, y valores de 0,25 a 0,75 kg DBO/m³d teniendo en cuenta solo el volumen del medio de soporte (Chernicharo, 2007). La producción de biomasa es condicionada por la concentración del sustrato en el medio y la velocidad a la cual es suministrada, por esta razón es importante controlar este parámetro, la cual

determina la cantidad de sustrato disponible por la biomasa disponible en el FAFA. Cuando la concentración del sustrato es baja los microorganismos la utilizan para subsistir, por lo cual no hay crecimiento de biomasa, y en contraste, cuando la concentración de sustrato es muy elevada, el tamaño de la población microbiana es el factor limitante para degradar el sustrato (Padilla, 2010). La (Tabla 2) recopila los valores de COV según el volumen del filtro y el volumen del lecho empacado para sistemas de filtración anaerobia, que se diseñan como pos-tratamiento de UASB (Goncalves et al., 2001).

Tabla 2. Valores recomendados de carga orgánica volumétrica

Criterio de diseño	Valor (kg DBO ₅ /m ³ d)
COV volumen útil	0,15 a 0,50
COV medio de soporte	0,25 a 0,75

Fuente: Pós-tratamiento de efluentes de reactores anaerobios por reactores con biofilm.

4.2.6.4 Carga Hidráulica Superficial (CHS)

Ésta se refiere al volumen del agua residual aplicado diariamente por unidad de área superficial del medio de soporte; matemáticamente se describe de la siguiente forma (Comisión Nacional de Aguas, 2019).

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

Donde:

CHS: carga hidráulica superficial m³/m²d

Q: flujo de alimentación m³/d

A: área superficial del medio empacado m²

En un estudio que se realizó para distintos filtros anaerobios de flujo ascendente con lecho empacado en piedra, los cuales se usaron para el pulimiento del efluente de tanques sépticos y reactores anaerobios de flujo ascendente, reportaron cargas hidráulicas usadas de 6 a 15 m³/m² d, por tanto, se obtuvieron efectos sobresalientes (Goncalves et al., 2001).

4.2.6.5 Lecho empacado

El material de soporte en el filtro anaerobio es uno de los factores más importantes a tener en cuenta en el diseño, ya que de ello depende el crecimiento adherido de la biomasa, debido a que es el corazón en este tipo de tecnologías anaerobias. El material que se usa debe tener una alta porosidad y diversidad en su granulometría, permitiendo la adherencia de la biopelícula y

favorecer el tiempo de retención celular en el filtro, logrando conseguir altas edades de lodos (Padilla, 2010).

En los inicios se usaba piedras volcánicas como medio de soporte, sin embargo, con este tipo de materiales era más frecuente el taponamiento, pero investigaciones posteriores han aplicado materiales fabricados que ofrecen la posibilidad de un lecho más homogéneo, con mayor área específica y por lo tanto con mayor cantidad de biomasa. La elección del material filtrante depende de las características mecánicas como la resistencia a la compresión, la altura de los filtros y los esfuerzos resultantes del peso del sustrato en el agua residual (Galindo et al., 2016).

Chernicharo plantea que la finalidad del material filtrante es el de retener los sólidos, esto ocurre bajo 3 modalidades: en el crecimiento de la biomasa adherida en la superficie de dicho material, en la posibilidad de crecimiento debajo del lecho de soporte como una masa de lodo granular o floculada, y además de esto, hay biomasa en los intersticios que aportan en la descontaminación del agua residual (Chernicharo, 2007).

4.2.6.6 Tipos de medios filtrantes

Los materiales filtrantes más usados en principio, eran rocas con distintos grados de porosidad, para el caso, eran rocas volcánicas, rocas trituradas; investigaciones se han enfocado en otro tipo de materiales menos convencionales como lo son trozos de guadua, cascaras de coco y conchas de mar (Batero & Cruz, 2007). En general, la disponibilidad de materiales filtrantes es muy variada; aunque, las características morfológicas y estructurales, son las que limitan los materiales adecuados para su uso en los filtros anaerobios. Últimamente, se ha puesto un mayor interés en el uso de materiales plásticos, con lo cual se ha extendido en gran medida el uso de rosetas que ofrecen una mayor área superficial, resistencia y uniformidad; con esto, se consiguen en teoría, mejores eficiencias y disminución del riesgo de obstrucción que presenta el uso de materiales convencionales (Chernicharo, 2007). En la Ilustración 14 se muestran distintas clases de material de soporte en material plástico.



Ilustración 14. Material de soporte en plástico

La elección del mejor material filtrante es un criterio que no está muy claro, pues se han encontrado problemas en las plantas mencionadas, relacionados con el lecho filtrante y con la flotación. El material filtrante en exceso y la desigualdad en el tamaño de espacios vacíos, todo esto termina por afectar el régimen hidráulico que se desarrolla en el interior del sistema (Romero Rojas, 2004).

5. METODOLOGÍA

5.1 Diagnóstico inicial del filtro anaerobio de flujo ascendente

Se realizaron visitas técnicas a las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, donde se realizó una línea base de las condiciones constructivas y de operación en las unidades de filtración anaerobia de flujo ascendente, dicho proceso se realizó en medio del arranque de las PTAR de estudio.

5.2 Seguimiento de control del sistema de Filtración Anaerobio de Flujo Ascendente

5.2.1 Campañas de monitoreo

Durante el proceso de arranque se programaron dos campañas de monitoreo por PTAR, las fechas en las que se ejecutaron estas actividades se registraron en la (Tabla 3). El proceso que se realizó consistió en un muestreo compuesto, en el cual se tomó una muestra representativa del agua residual de la planta en varios puntos de la línea de flujo que pasa por la planta. El acompañamiento se ejecutó durante 8 horas, en un punto de entrada, otro intermedio y en la descarga, que se eligieron para lograr un seguimiento más acertado de los cambios en las características del agua residual.

Tabla 3. Fechas de muestreo en las PTAR de estudio

PTAR	Fecha
Primer muestreo San Vicente Ferrer	Lunes 25 de enero de 2021
Segundo muestreo San Vicente Ferrer	Lunes 1 de marzo de 2021
Primer muestreo Santo Domingo	Martes 26 de enero de 2021
Segundo muestreo Santo Domingo	Lunes 15 de marzo de 2021
Primer muestreo Buenos Aires	Martes 19 de enero de 2021

El procedimiento que se utilizó fue el establecido por CORNARE en su instructivo para la recolección de muestras de agua residual (Laboratorio de análisis de aguas, 2014). Primero se estimó el valor de las alícuotas siguiendo la ecuación:

$$V_i = \frac{V_{\text{total}} * Q_i}{n * Q_p}$$

Donde,

V_i : Volumen de cada alícuota (L)

V_{total} : Volumen total a componer (L)

Q_i : Caudal instantáneo de cada muestra (L/s)

Q_p : Caudal promedio (L/s)

n : Numero de muestras tomadas

Luego de cada una de las 8 muestras puntuales que se tomaron, se tomó el volumen de la alícuota, para finalmente mezclar en una sola, lo que se constituye como una **muestra compuesta**.

5.2.2 Análisis físico químico de los parámetros reportados del agua residual

Las muestras compuestas tomadas se conservaron en refrigeración a una temperatura de 4°C, y luego fueron transportadas al laboratorio de CORNARE ubicado en la sede del municipio de Santuario – Antioquia. Los parámetros medidos fueron: DQO, DBO₅, SST, ST, SVT, SSV, SDT, SSed, grasas y aceites entre otros; luego de recibir el reporte de resultados, se realizaron los análisis con base al conocimiento teórico de operación y funcionamiento de las unidades de tratamiento.

5.3 Diseño de filtros anaerobios de flujo ascendente

5.3.1 Evaluación del diseño

La metodología que se aplicó en la evaluación del diseño de los FAFA en las PTAR de estudio, fue propuesto por la Comisión Nacional del Agua en México (Comisión Nacional de Aguas, 2019) con su manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento básico, en la Tabla 4 se evidencian los pasos a considerar.

Tabla 4. Pasos de evaluación de un filtro anaerobio de flujo ascendente

Pasos	Formula	Abreviatura
Cálculo de la altura del medio filtrante.	$h_m = H - b - d$	<p>h_m: altura del medio filtro</p> <p>b: longitud del medio libre</p> <p>d: longitud del bajo dren</p>
Cálculo del volumen del medio filtrante.	$V_{medio} = h_m * A$	<p>V_{medio}: volumen del medio filtro</p> <p>h_m: altura del medio filtro</p> <p>A: área superficial del tanque</p>

Cálculo del gasto al que debe trabajar el filtro.	$Q = \frac{V_{\text{medio}} * COV}{S_0}$	Q: caudal de trabajo V _{medio} : volumen del medio filtro COV: carga orgánica volumétrica (debe estar comprendida entre 0,25 a 0,75 kg DBO/m ³ d)
Cálculo del caudal máximo de operación del filtro.	$Q_{\text{max}} = \frac{V_{\text{medio}} * 0,75}{S_0}$	
Cálculo del caudal mínimo de operación del filtro.	$Q_{\text{min}} = \frac{V_{\text{medio}} * 0,25}{S_0}$	
Cálculo del tiempo de retención hidráulico máximo.	$TRH_{\text{max}} = \frac{V_{\text{medio}}}{Q_{\text{max}}}$	
Cálculo del tiempo de retención hidráulico mínimo.	$TRH_{\text{min}} = \frac{V_{\text{medio}}}{Q_{\text{min}}}$	
Cálculo de la eficiencia esperada (%)	$\text{Eficiencia \%} = 100 [1 - 0,87 TRH^{-0,5}]$	
Concentración de DBO ₅ esperada.	$[DBO_5] = \frac{S_0 - (E * S_0)}{100}$	

Fuente: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: filtros anaerobios de flujo ascendente

5.3.2 Metodologías de diseño

Las metodologías que se muestran en las Tabla 5 y Tabla 6 se consultaron con el fin de diseñar bajo los mismos criterios, asumidos por los formuladores que desarrollaron el diseño actual de las unidades de filtración anaerobia como postratamiento. Construidas en las plantas de tratamiento de agua residual doméstica de los sitios de estudio, con ello se realizó un análisis comparativo de las condiciones del diseño actual conseguidas en las memorias de cálculo suministradas. En el caso del diseño de un Fafa como unidad de pulimento, se parte asumiendo el TRH, verificando que los demás parámetros se encuentren entre los valores recomendados por los estudios realizados y aceptados por diversos autores como Goncalves, Chernicharo, Mc Carthy, Young y Lettinga.

Tabla 5. Diseño de filtros anaerobios de flujo ascendente como unidad de pos-tratamiento (CONAGUA)

Parámetro	Formula	Abreviatura
Cálculo del volumen útil.	$V = Q * TRH$	Q: caudal medio TRH: tiempo de retención hidráulico
Cálculo de la altura útil	$H = h_{\text{fondo}} + h_{\text{medio}} + \text{bordo libre}$	h_{fondo} : altura falso fondo h_{medio} : altura del medio de soporte
Cálculo del área superficial	$A = \frac{V}{H}$	V: volumen útil H: altura total
Cálculo del volumen del medio de soporte	$V_{\text{medio}} = A * (h_{\text{medio}})$	A: área superficial h_{medio} : altura del medio de soporte
Verificación de la carga hidráulica superficial	$CHS = \frac{Q}{A}$	Se encuentra para el gasto medio, máximo diario y horario
Verificación de la carga orgánica volumétrica	$COV = \frac{Q * S_o}{V}$ $COV_{\text{medio}} = \frac{Q * S_o}{V_{\text{medio}}}$	Los valores se verifican con los recomendados
Eficiencia del FAFA	$\text{Eficiencia \%} = 100 [1 - 0,87 TRH^{-0,5}]$	
Concentración de DBO en el efluente	$DBO_{5 \text{ efluente}} = S_o - \frac{E * S_o}{100}$	

Fuente: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: filtros anaerobios de flujo ascendente

La metodología de diseño mostrada en la Tabla 6, recopila diversos autores como Goncalves quien realizó un estudio en Brasil del uso de filtros anaerobios de flujo ascendente, como unidad de pulimento para reactores UASB y tanques sépticos (Goncalves et al., 2001); además de esto, se basa en algunos parámetros del Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, (RAS, 2017).

Tabla 6. Diseño de filtro anaerobio de flujo ascendente Edith Padilla

Parámetro	Formula	Observación
Estimar la altura del falso fondo	-	Se recomienda una distancia de 0,3 a 0,6 m
Estimar la altura de borde libre	-	Se recomienda una distancia de 0,20 a 0,30 m
Estimar la altura total		
Calcular el tiempo de retención hidráulico.	$TRH = \frac{Td1 * Td2}{2}$	Propuesto por el RAS, cálculo del TRH en base a la concentración de materia orgánica esperada. Td1: TRH mínimo asumido Td2: TRH máximo asumido
Volumen útil	$V = Q * TRH$	
Porosidad del medio filtrante	$n = \frac{V_v}{V_t} * 100$	V_v: Volumen de vacíos del material V_t: Volumen total
Cálculo del volumen útil del medio de soporte	$V_{util} = V_{filtro} * n$	
Cálculo del caudal de diseño	$Q = \frac{V_{util}}{TRH}$	Valores de caudal recomendados por volumen de material filtrante
Volumen del medio de soporte	$V_{lecho} = \frac{Q * V_{lecho * unidad caudal}}{V_{util}}$	En caso de material inerte como el plástico se recomienda un volumen de 0,01 a 0,02 m ³ por cada 0,1 m ³ /d que ingrese.
Carga orgánica volumétrica	$COV = \frac{Q * S_o}{V_{medio}}$	Se estima con la DBO
Cálculo de tasa de aplicación hidráulica superficial.	$q_s = \frac{Q}{A}$	

Fuente: Evaluación de un filtro anaerobio de flujo ascendente para Tratar agua residual de rastro

5.4 Metodología propuesta para el diseño de un filtro anaerobio de flujo ascendente

Con base en las metodologías de diseño encontradas, se realizó una integración de información para lograr un aditamento, con la intención de poner un orden en el procedimiento e incluir los sectores mostrados en la Ilustración 12, enfocado a la zona útil del FAFA. Con esto se espera mejorar la eficiencia, el control y cumplimiento de los parámetros de diseño. Esta metodología mostrada en la Tabla 7, se usará para diseñar los filtros anaerobios de flujo ascendente de los municipios del convenio y compararlos con el diseño actual.

Tabla 7. Diseño de filtro anaerobio de flujo ascendente propuesto

Parámetro	Observaciones	Formula
1.Características del agua residual afluyente		
Caudal de diseño		
Demanda bioquímica de oxígeno	Efluente de la unidad anterior	
2.Parametros hidráulicos		
Tiempo de retención hidráulico	Asumido, entre 4 a 10 horas	
3.Dimensiones del FAFA		
Volumen útil	100 a 10000 m ³	$V_{\text{util}} = Q_{\text{diseño}} * TRH$
Numero de módulos	Se divide si el volumen es muy grande, volumen máximo aceptable de 400 m ³ por modulo	
Volumen útil por modulo		$V_{\text{util} \cdot \text{modulo}} = \frac{V_{\text{util}}}{\# \text{modulos}}$
Altura del falso fondo	Asumido, se recomienda entre 0,30 a 0,60 m	
Altura del borde libre	Asumido, se recomienda entre 0,10 a 0,20 m	
Altura del medio de soporte	Asumido, se recomienda de 1 a 3 m	
Altura útil	Entre 3 a 6 m	$H_{\text{util}} = H_{\text{borde}} + H_{\text{lecho}} + H_{\text{f.fondo}}$
Área superficial del tanque		$A_{s.\text{tanque}} = \frac{V_{\text{util} \cdot \text{modulo}}}{H_{\text{util}}}$
Volumen del medio de soporte		$V_{\text{lecho}} = A_{s.\text{tanque}} * H_{\text{lecho}}$
Verificación		
Porcentaje volumen medio de soporte	El 50 y 70 % del volumen útil, recomienda 66,6%	$\% \text{volumen} = \frac{V_{\text{lecho}}}{V_{\text{util}}} * 100$
Caudal diseño por modulo	Depende si es serie/paralelo	$Q_{d \cdot \text{modulo}} = \frac{Q_{\text{diseño}}}{\# \text{modulos}}$

TRH volumen útil por modulo	Entre 4 a 10 horas	$TRH_{v,util*modulo} = \frac{V_{util*modulo}}{Q_d*modulo}$
TRH en el medio de soporte	Entre 4 a 10 horas, tener en cuenta menor que el útil	$TRH_{lecho} = \frac{V_{lecho}}{Q_d*modulo}$
Carga hidráulica superficial del medio de soporte	Entre 6 a 15 m ³ /m ² d	$CHS_{lecho} = \frac{Q_d*modulo}{A_s*tanque}$
Carga orgánica volumétrica del medio de soporte	Entre 0,25 a 0,75 kg/m ³ d	$COV_{lecho} = \frac{Q_d*modulo*DBO_{afluente}}{V_{lecho}}$
Velocidad ascensional en el medio de soporte	máximo 1 m/h, arriba hay arrastre de solidos	$V_{ascensional} = \frac{Q_d*modulo}{A_s*tanque}$
Volumen lecho plástico RAS	0,1 m ³ /d requieren 0,01 a 0,02 m ³ volumen lecho	$V_{lecho} = \frac{Q_d*modulo*(0,01 \text{ a } 0,02)}{0,1}$
Continuación		
Ancho del tanque	Se toma de unidad anterior, despeja el largo	$Ancho = \frac{A_s*tanque}{Largo}$
Largo del tanque	Se toma de unidad anterior, despeja el ancho	$Largo = \frac{A_s*tanque}{Ancho}$
4. Características del lecho filtrante		
Área superficial de contacto	Fabricante	
Área total de contacto		$Area \text{ total contacto} = A_{s,contacto} * V_{lecho}$
Volumen unitario de roseta	Fabricante	
Porcentaje de vacíos en el medio de soporte		
Volumen de soporte en el lecho		$V_{soporte} = \%_{vacios} * V_{lecho}$
Cantidad de rosetas		$\#_{rosetas} = \frac{V_{lecho}}{V_{unitario.roseta}}$
5. Eficiencia		
Eficiencia lecho		$E_{lecho} = 100 * (1 - 0,87 * TRH_{lecho}^{-0,50})$
Eficiencia volumen útil		$E_{util} = 100 * (1 - 0,87 * TRH_{v,util*modulo}^{-0,50})$
DBO efluente TRH lecho		$DBO_{efluente.lecho} = DBO - \frac{DBO * E_{lecho}}{100}$
DBO efluente TRH útil		$DBO_{efluente.util} = DBO - \frac{DBO * E_{util}}{100}$

En la Tabla 7, se siguió una secuencia de diseño partiendo del tiempo de retención hidráulico, criterio que se utiliza normalmente cuando se trata de aguas residuales domésticas, que no tienen una carga orgánica tan alta como si ocurre con efluentes industriales. El volumen del FAFA se diseña por compartimientos, es decir, el volumen útil contiene el agua residual, este se delimita desde la base hasta la canaleta recolectora. Posteriormente, se obtiene el área superficial del tanque, el cual debe estar en proporción con la unidad de tratamiento que antecede el filtro anaerobio en el tren de tratamiento. Después de tener las dimensiones calculadas se evalúan los

parámetros hidráulicos como: tiempo de retención hidráulico, carga orgánica volumétrica, carga hidráulica superficial y velocidad ascensional en el lecho filtrante.

En caso de no cumplir con los intervalos recomendados para los FAFA como postratamiento, se modifican los resultados de los pasos anteriores, luego de tener la parte hidráulica lista, se centra la atención en el volumen del lecho filtrante, donde se determina la cantidad necesaria de rosetas, según las características del material elegido.

En relación al análisis de algunas metodologías de diseño, se encontró que, para determinar los parámetros hidráulicos en el lecho, se determinaba el volumen útil, en base al porcentaje de huecos del lecho empacado. El área superficial del lecho se determina multiplicando el área superficial de cada roseta por el volumen total del lecho. Conforme a lo anterior, no se consideran los procedimientos planteados, ya que, en teoría, en el lecho de empaque, la materia orgánica es aprovechada en distintos sectores, como en los intersticios donde hay crecimiento bacteriano en suspensión, debajo del lecho empacado y adherido a la superficie de las rosetas, por ello, dicho volumen se considera como un todo, y finalmente se determina la eficiencia del FAFA.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 Diagnóstico inicial

6.1.1 FAFA del municipio de San Vicente Ferrer

La PTAR del municipio de San Vicente Ferrer cuenta con dos FAFA configurados en paralelo, como unidades de pulimiento para dos reactores UASB, este sistema secundario es alimentado por bombeo. Se encuentra que las dimensiones tienen concordancia con el volumen del reactor, por lo que no se evidencia una desproporción. Una de las líneas de flujo que dividen el caudal a cada FAFA, conduce menores caudales que en la otra línea de flujo, esto es atribuido a problemas en el bombeo o contrariedades hidráulicas en las tuberías de alimentación, y como consecuencia, ocasiona que a uno de los FAFA llegue menos agua residual.

En la instalación y control del material filtrante se tienen dificultades, ya que algunas rosetas plásticas se encuentran flotando en la superficie debido al empuje que genera el agua residual y el lodo, logrando alcanzar las canaletas de recolección y por el empuje que ocasiona el medio de soporte, causar un desnivel en las mismas. Finalmente, lo que se genera es una contaminación en el efluente ya tratado, agregándole que, además, cierra la posibilidad de un borde libre que permita un espacio para la sedimentación (Fotografía 5 y Fotografía 6).



Fotografía 5. Flotación de rosetas encima de la malla

Fuente: Autoría propia



Fotografía 6. Empuje del medio de soporte sobre la malla

Fuente: Tomada por la Ingeniera Sanitaria residente Jessica Salgado

Para solucionar esto, se intenta amarrar las rosetas por bloques (Fotografía 7) para que hagan contrapeso a la fuerza de empuje del agua residual, además de esto, se ubica una malla que mantenga el volumen del medio filtrante en su lugar, y así lograr la identidad de cada parte interna del FAFA (Ilustración 12). A pesar de los esfuerzos el empuje del agua sigue dispersando las rosetas plásticas en la superficie.



Fotografía 7. Rosetas plásticas amarradas en bloques

Fuente: Tomada por la Ingeniera Sanitaria residente Jessica Salgado

Además de las dificultades en mantener el material filtrante en su lugar, se evidencian problemas de corrosión por la formación de H_2S en las barandas de seguridad de la plataforma. Como unidades de pulimiento, reciben una menor cantidad de DBO_5 proveniente del reactor UASB razón por la cual, se espera una menor transformación a DBO_5 gaseosa, por esto no es común encontrar sistemas de separación sólido – líquido – gaseoso (SLG) como si se hace en los reactores UASB. No obstante, por los daños observados y la claridad en la presencia de estos gases, se debería tener en cuenta algún mecanismo para controlar los vapores generados a la hora de formular los diseños de filtros anaerobios de flujo ascendente, debido a que esto puede ocasionar riesgos considerables para la salud de la comunidad, las estructuras físicas y la contaminación atmosférica.

6.1.2 FAVA del municipio de Santo Domingo

El filtro anaerobio que se diseñó para esta planta de tratamiento tiene una configuración modular en serie; las dimensiones de estas unidades tienen concordancia con el volumen que tienen los reactores UASB que están ubicados con anterioridad. Uno de los problemas que se evidencian, es que el tanque es sellado por una losa de concreto que cubre la superficie (Fotografía 8), este hecho estuvo pensado para el control de gases, sin embargo, esto genera impedimentos de operación como el ingreso al filtro con el fin de realizar modificaciones y limpieza que favorezcan el funcionamiento.



Fotografía 8. Losa superficial y cámaras de inspección del FAFA Santo Domingo

Fuente: Autoría propia

Cuando se abrieron las tapas de ingreso e inspección se evidenciaron problemáticas con el material del lecho filtrante, debido a que se encontraban sobre la superficie y encima de la canaleta de recolección del agua tratada (Fotografía 9). Esto implica que no haya un borde libre recomendado para la sedimentación y lograr un mejor efluente, ya que esto puede generar daños como el empuje y desnivel de las canaletas o aportes de materia orgánica que afecten la calidad del efluente. En conclusión, debido al inconveniente estructural para el ingreso al mismo, se ha imposibilitado la solución de este contratiempo.



Fotografía 9. Rosetas flotando en el FAFA Santo Domingo

Fuente: Tomada por la ingeniera residente Carolina Rojas

6.1.3 FAFA del municipio de Granada

Los filtros anaerobios de este municipio están instalados después de un sedimentador primario, las problemáticas más evidentes están relacionadas con la dispersión y flotación del material del lecho filtrante, afectando la calidad del efluente recolectado por las canaletas de recolección

(Fotografía 10). Se evidencia una cantidad excesiva de rosetas plásticas que ocupan todo el volumen útil del filtro; el hecho de tener mayor área superficial específica de soporte para el crecimiento de los microorganismos, en teoría está relacionado con mejores rendimientos del FAFA, pero esto no es lo que ocurre en la práctica, debido a que el medio de soporte termina cerca a los sistemas de recolección del efluente, con lo cual se termina afectando su calidad.



Fotografía 10. Estado del medio de soporte FAFA Granada

Fuente: Autoría propia

La solución que se dio a esta problemática fue adaptar una estructura en PVC a los costados del tanque, que sirviera de anclaje para adaptar una red mallada, con el fin de mantener las rosetas plásticas en su lugar y que no floten por el empuje del agua residual (Fotografía 11).



Fotografía 11. Material de soporte empujando la malla

Fuente: Autoría propia

6.1.4 FAFA corregimiento de Buenos Aires

El tipo de sistema utilizado para esta PTAR, es compacto y construido en fibra de vidrio, en este caso el filtro anaerobio se encuentra como unidad de postratamiento para un tanque séptico. El principal problema que se encuentra es la flotación de las rosetas (Fotografía 13). Para enmendar esta contrariedad, se amarró el material filtrante en paquetes para que ganaran mayor peso unitario (Fotografía 12), aun haciendo esto, la solución no tuvo éxito, pues el material en que están construidas las paredes del tanque no permite modificaciones para la instalación de mallas, o alguna herramienta o mecanismo que permita mantener el lecho filtrante en su lugar. Por tanto, el efluente de la PTAR tiene condiciones deficientes, en las se puede cotejar presencia de gusanos y material suspendido que desfavorecían la calidad de la planta.



Fotografía 12. Rosetas amarradas en bloque FAFA Buenos Aires

Fuente: Tomada por la ingeniera residente Laura Vásquez



Fotografía 13. Rosetas flotando FAFA Buenos Aires

Fuente: Autoría propia

6.1.5 FAFA del municipio de San Francisco

Esta PTAR cuenta con 2 filtros anaerobios de flujo ascendente, los cuales cuentan con un volumen cada uno de 20,5 m³. El material en el que están contruidos es fibra de vidrio (Fotografía 14), con rosetas plásticas como material del lecho filtrante. El medio de soporte ocupa más del 70% del tanque por lo cual no hay una zona de sedimentación (Fotografía 15).



Fotografía 14. FAFAS en fibra de vidrio San Francisco

Fuente: Tomada por la ingeniera residente Lizeth Mesa



Fotografía 15. Estado del medio de soporte FAFA San Francisco

Fuente: Tomada por la ingeniera residente Lizeth Mesa

El hecho de construir en fibra de vidrio puede acarrear problemas a futuro, ya que imposibilita la implementación de reformas que se vayan necesitando en el momento de operación; en este caso los volúmenes son pequeños en comparación a los volúmenes que tienen los reactores UASB, de quienes reciben sus efluentes.

6.1.6 FAFA de la planta del corregimiento de la Piñuela municipio de Cocorná

La planta cuenta con un UASB que tiene una capacidad de $79,04 \text{ m}^3$, seguida de una unidad de filtración anaerobia de flujo ascendente para el pulimento del efluente, que tiene una capacidad de $38,27 \text{ m}^3$, es claro que hay una desproporción en los volúmenes y que finalmente se puede ver reflejado en el funcionamiento de los FAFA.



Fotografía 16. Vista general del FAFA La Piñuela

Fuente: Tomado y adaptado de Informe de diagnóstico PTAR La Piñuela

El material que se usó como lecho filtrante fueron rosetas plásticas, las cuales se encuentran en una cantidad tal, que dentro del volumen no hay una delimitación de zonas (Ilustración 12), como la altura de material filtrante que se recomienda sea del 50 a 70%, la altura total útil del filtro y la altura de sedimentación (Fotografía 17). De igual manera, se encuentra que la parte superior del tanque está cubierta por una losa de concreto, con una pequeña tapa de inspección, lo que impide las labores de mantenimiento y operación.



Fotografía 17. Estado del medio de soporte FAFA La Piñuela

Fuente: Tomado y adaptado de Informe de diagnóstico PTAR La Piñuela

6.2 Análisis fisicoquímico de los parámetros reportados por el laboratorio de CORNARE

6.2.1 PTAR del municipio de San Vicente de Ferrer

En la Tabla 8 se observan las concentraciones de algunos parámetros reportados por el laboratorio, para el punto del efluente en el reactor UASB, agua que ingresa en los filtros anaerobios en conjunto con los clarificadores para ser entregado finalmente a la fuente receptora como efluente de la PTAR.

Tabla 8. Resultados del muestreo físico químico PTAR San Vicente de Ferrer

Primer muestreo				
Parámetro	Unidades	Efluente UASB	Efluente PTAR	Resolución 0631 del 2015
Demanda química de oxígeno	mg/L	247	244,9	180
DBO ₅	mg/L	147,5	133,3	90
Sólidos suspendidos totales	mg/L	42,7	41,2	90
Sólidos volátiles totales	mg/L	92,3	72,3	-
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	36,1	36,1	-
Sólidos disueltos totales	mg/L	193,2	202,8	-
Segundo muestreo				
Demanda química de oxígeno	mg/L	219,2	146	180
DBO ₅	mg/L	101,5	72,5	90
Sólidos suspendidos totales	mg/L	54,2	< 15	90
Sólidos volátiles totales	mg/L	101,7	81,7	-
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	20,8	< 15	-
Sólidos disueltos totales	mg/L	181,2	157	-

La DQO que llega a los filtros anaerobios de flujo ascendente en el primer muestreo estuvo en 295,5 mg/L y en el segundo muestreo en 277,6 mg/L, luego de pasar el pulimiento tuvieron reducciones de 89,6 mg/L y 67,4 mg/L respectivamente, se puede decir que las reducciones no fueron considerables; el filtro anaerobio de flujo ascendente en conjunto con el clarificador tuvo una eficiencia promedio de 27,4%, por lo cual se puede inferir que la eficiencia del filtro puede ser incluso más baja. En términos de DQO el efluente de la PTAR no cumple con la normativa en el primer muestreo, la cual fija un valor máximo permisible de 180 mg/L, a diferencia del segundo donde si hay cumplimiento. La demanda bioquímica expresa la materia orgánica que puede ser consumida por los microorganismos en sus actividades metabólicas, en este caso las concentraciones reportadas son para el primer muestreo de 110,1 mg/L y para el segundo 107,3

mg/L. La eficiencia en promedio es de 25,8%, en este caso la PTAR cumple con la normativa de vertimientos, pero los filtros no alcanzan los porcentajes de remoción que se han reportado por diversos autores.

La relación de DBO₅/DQO indica la fracción de la DQO total que es aprovechable por los microorganismos, en este caso el agua residual que sale en el efluente del reactor UASB tiene una relación de 0,38, lo cual la clasifica como biodegradable para que la reciba el FAFA. En el efluente de la PTAR el índice de biodegradabilidad tiene en promedio un valor de 0,39; en el transcurso del arranque la proporcionalidad en los resultados fue poco variable por lo cual el sistema de tratamiento secundario en ese tiempo, trabajo en las mismas condiciones.

Los filtros anaerobios al contar con material de soporte para el crecimiento bacteriano, son susceptibles de taponamientos, el agua residual que recibe, llega con una concentración promedio de sólidos suspendidos volátiles de 105,4 mg/L que es reducida considerablemente en más de la mitad con una eficiencia combinada promedio de 58,6%, cumpliendo con la normativa de vertimientos; sin embargo, puede darse que la mayor influencia en estos resultados se debe a los sedimentadores secundarios, se nota también que los sólidos volátiles totales no tienen una reducción que sea influyente, con un efluente tiene concentraciones de 170 mg/L mostrando que hay presencia de materia orgánica en el agua tratada. Se espera que la materia que más fácilmente es aprovechada por los microorganismos es la que se encuentra disuelta, en este caso hay un ingreso al filtro anaerobio de 417,8 mg/L en promedio, con una reducción del 5,5%, es decir que prácticamente no sufrió cambios.

6.2.2 PTAR del municipio de Santo Domingo

La planta de tratamiento de agua residual del municipio de Santo Domingo cuenta con un reactor UASB y un filtro anaerobio de flujo ascendente, los puntos de muestreo que se van a analizar fueron ubicados en el efluente del reactor y en el efluente de la planta, es decir el efluente del FAFA, los resultados reportados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultado de muestreo PTAR del municipio de Santo Domingo

Primer muestreo				
Parámetro	Unidades	Efluente UASB	Efluente PTAR	Resolución 0631 del 2015
Demanda química de oxígeno	mg/L	350,8	259,9	180
DBO ₅	mg/L	175,9	124,7	90
Sólidos suspendidos totales	mg/L	84,6	47,4	90
Sólidos volátiles totales	mg/L	173,8	128,8	-
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	59	38,8	-
Sólidos disueltos totales	mg/L	234,7	265	-

Segundo muestreo				
Demanda química de oxígeno	mg/L	234	190,5	180
DBO ₅	mg/L	91,3	68,6	90
Sólidos suspendidos totales	mg/L	62,9	43,9	90
Sólidos volátiles totales	mg/L	115,2	81	-
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	50,1	38,8	-
Sólidos disueltos totales	mg/L	242,1	253,6	-

La DQO tiene una variación considerable entre el primer y segundo muestreo, esto indica que el reactor UASB tuvo una mejora sustancial en su rendimiento de operación, luego de pasar por el filtro anaerobio las concentraciones obtenidas fueron de 259,9 mg/L para el primer muestro y de 190,5 mg/L para el segundo, esto evidencia que el filtro anaerobio está teniendo problemas, posiblemente a que cuando se recibió la planta, las unidades nunca se habían limpiado por el sellamiento de las tapas de acceso. Luego de la limpieza y organización de las rosetas plásticas, aunque aparentemente tuvo una mejora, se encuentra que todo el trabajo lo está realizando el reactor UASB, pues al analizar las eficiencias de trabajo en el transcurso del arranque, el filtro ha desmejorado con un rendimiento inicial de 26% y finalmente del 18%. De los problemas identificados en esta unidad el que puede tener relación con este hecho, es la dificultad de mantener el lecho filtrante fijado en un lugar después del falso fondo, la dispersión y flotación de las rosetas hacen que la materia orgánica este en contacto hasta el final del tratamiento al estar cerca de las canaletas de recolección.

La DBO₅ mejoró después del primer muestreo, ya que este parámetro no cumplía con la normativa de vertimientos, sin embargo, se evidencia que el reactor UASB, es quien finalmente consume la DBO₅ hasta casi lograr con los 90 mg/L exigidos por la resolución 0631. Las eficiencias que logra el filtro anaerobio con su rendimiento al final fueron de solo el 24%; el índice de biodegradabilidad es de 0,39 lo que clasifica el agua residual que ingresa al FAFA como poco biodegradable. Los sólidos suspendidos que llegan al FAFA son relativamente bajos con una concentración en un primer muestreo de 84,6 mg/L, y en un segundo muestreo de 62,9 mg/L, por lo cual los problemas que ocurren en dicha unidad seguramente no están relacionados con taponamientos.

6.2.3 PTAR del corregimiento de Buenos Aires del municipio de San Luis

En la PTAR de Buenos Aires, los puntos de muestreo fueron el afluente de la planta en el interceptor del alcantarillado que lleva el agua residual hasta ella y en el efluente de la planta, en este caso no se tomó un punto intermedio, por lo tanto, los análisis hechos corresponden al rendimiento de todo el tren de tratamiento (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados del muestro realizado PTAR Buenos Aires

Primer muestreo				
Parámetro	Unidades	Afluente PTAR	Efluente PTAR	Resolución 0631 del 2015
Demanda química de oxígeno	mg/L	188,1	115,3	180
DBO ₅	mg/L	114,6	56,5	90
Sólidos suspendidos totales	mg/L	39,6	< 15	90
Sólidos volátiles totales	mg/L	110	139,2	-
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	35,9	16,3	-
Sólidos disueltos totales	mg/L	256,2	128,5	-

Debido a la poca población que tributa al alcantarillado del corregimiento, las aguas residuales que llegan a la planta se encuentran diluidas, con concentraciones de DQO y DBO₅ bajas por lo cual la PTAR no tiene que hacer mucho trabajo para cumplir con la normativa de vertimientos. La eficiencia total en término de DQO es de 38% y de DBO₅ de 50,7%, a pesar de los buenos resultados obtenidos, se considera que la planta no tiene una mayor influencia, y en contraste, puede tener mejor rendimiento.

El índice de biodegradabilidad es de 0,61 que se considera como un agua residual biodegradable. Los sólidos volátiles están relacionados con la materia orgánica presente, en este caso se evidencia un aumento de la concentración de salida con 139,2 mg/L, a diferencia con los 110 mg/L que ingresan, esta situación puede darse por el lavado de biomasa y las condiciones de operación limitadas por el diseño y construcción de la unidad de FAFA. Los sólidos disueltos totales tienen una reducción de 49,8%, una gran proporción fue aprovechada por los microorganismos; el agua que llega a la planta es en su mayoría doméstica compuesta de materia fecal.

6.2.4 PTAR del municipio de San Francisco

En el muestro se tomó un punto intermedio, en este caso el efluente del reactor UASB, por lo cual para este análisis se permite evaluar el rendimiento de operación del filtro anaerobio de flujo ascendente, ya que el efluente que se tiene, sería el agua que ingresa a la unidad de interés; y el resultado que se obtiene para el efluente de la PTAR sería la salida de la misma, pues el FAFA es la última unidad del tren de tratamiento (Tabla 11).

Tabla 11. Resultados de muestreo PTAR San Francisco

Primer muestreo				
Parámetro	Unidades	Efluente UASB	Efluente PTAR	Resolución 0631 del 2015
Demanda química de oxígeno	mg/L	247	244,9	180
DBO ₅	mg/L	147,5	133,3	90
Sólidos suspendidos totales	mg/L	42,7	41,2	90
Sólidos volátiles totales	mg/L	92,3	72,3	-
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	36,1	36,1	-
Sólidos disueltos totales	mg/L	193,2	202,8	-
Segundo muestreo				
Demanda química de oxígeno	mg/L	219,2	146	180
DBO ₅	mg/L	101,5	72,5	90
Sólidos suspendidos totales	mg/L	54,2	< 15	90
Sólidos volátiles totales	mg/L	101,7	81,7	-
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	20,8	< 15	-
Sólidos disueltos totales	mg/L	181,2	157	-

Entre el primer y segundo muestreo se encontraron mejoras considerables en la calidad del agua residual afluente, hecho que se atribuye al avance en el arranque del sistema. El FAFA tiene el trabajo más fácil para llevar las características del agua al cumplimiento de la normativa de vertimientos. La DQO que ingresa tiene un valor reportado de 219,2 mg/L, en su paso por el filtro logra una reducción hasta 146 mg/L con lo cual, el rendimiento es del 33,4%. Aunque los resultados de beneficio son altos por el cumplimiento con la norma, no se puede dejar de lado que el agua de ingreso ya tenía unas condiciones relativamente buenas, por lo cual el rendimiento es bastante bajo según los rendimientos reportados para un filtro anaerobio como unidad de postratamiento.

La DBO₅ que ingresa es baja con una concentración de 101,5 mg/L, luego de pasar por esta unidad se entrega una concentración de 72,5 mg/L, esta reducción muestra un rendimiento para este parámetro de 28,7%. El índice de biodegradabilidad se evidencia un valor de 0,46 y se considera biodegradable y apto para la aplicación de procesos biológicos, además los sólidos suspendidos que ingresan no representan un riesgo de taponamiento, debido a que la concentración de 54,2 mg/L es baja; por lo cual, el hecho que puede estar llevando esta unidad a mostrar estos resultados está relacionado con temas de diseño y construcción.

6.2.5 PTAR del municipio de Granada y corregimiento de La Piñuela en el municipio de Cocorná

En estos muestreos no se tomaron puntos intermedios, por lo cual no es posible hacer un análisis del funcionamiento de una unidad en específico como el filtro anaerobio de flujo ascendente, si no que los resultados se enfocan en el rendimiento de todo el tren de tratamiento.

6.3 Evaluación del diseño de los filtros anaerobios de flujo ascendente según la metodología de CONAGUA

La evaluación del diseño de los FAFA se realizó mediante algunas mediciones en campo, que abrieron la posibilidad de calcular parámetros hidráulicos para hacer una revisión, a la luz de los valores propuestos por diversos autores y la resolución 0330 del 2017.

6.3.1 FAFA de la planta de tratamiento del municipio de San Vicente Ferrer

La información que se registra en la (Tabla 12) fue obtenida de estudios y diseños que se desarrollaron previo a la construcción de la planta.

Tabla 12. Diseño de formulación del FAFA San Vicente de Ferrer

Parámetro	Unidades	Valor
1. Características del agua residual		
DBO ₅ afluyente	mg/L	92
Caudal de diseño	L/s	16,64
2. Dimensiones del FAFA		
Altura del medio de soporte	m	3,3
Altura útil	m	4,3
Ancho del tanque	m	6
Largo del tanque	m	8
Área superficial	m ²	48
Volumen del medio de soporte	m ³	158,4
Volumen útil	m ³	206,4
3. Características de las rosetas		
Volumen unitario	m ³	0,002
Área superficial libre de la roseta	m ² /m ³	65
Área superficial de contacto	m ²	10494
Cantidad de rosetas	#	105600
4. Parámetros hidráulicos de diseño		
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	0,07
Carga orgánica volumétrica	kgDBO/m ³ d	2,08
Velocidad ascensional medio de soporte	m/h	0,79
TRH en el medio de soporte	h	5,29

Eficiencia	%	60
Concentración de DBO ₅ efluente	mg/L	37

Fuente: Memorial de cálculo PTAR San Vicente de Ferrer

Los datos se obtuvieron de las memorias de cálculo y de los planos de diseño para la PTAR del municipio en mención, y fueron facilitados por la empresa de servicios públicos, con ayuda de la ingeniera residente. Revisando los criterios de dimensionamiento se encuentra que el ancho del tanque del filtro anaerobio está relacionado con el ancho del UASB, también es importante que las características del agua residual de ingreso son las que se obtienen de evaluar la remoción teórica en base a la eficiencia de la unidad previa al FAFA, por lo que puede dar un mayor acercamiento con la realidad al elegir los criterios y fijar los rendimientos esperados. En el momento del diseño se tuvo un criterio para obtener la cantidad de rosetas que debía haber para componer el volumen necesario de medio de soporte, y además cumplir con el tiempo de retención hidráulico de 5,29 h, que debe estar entre 4 a 12 h (Chernicharo, 2007), la carga orgánica volumétrica en 2,08 kg/m³d que está por encima del recomendado de 0,25 a 0,75 kg/m³d para el medio de soporte (Goncalves et al., 2001) y la carga hidráulica superficial de 0,07 m³/m²d que está por debajo del valor recomendado de 6 a 16 m³/m²d (Chernicharo, 2007).

La Tabla 13 registra valores que fueron medidos en campo y que plasman las condiciones reales de construcción del filtro anaerobio de flujo ascendente.

Tabla 13. Evaluación del FAFA San Vicente Ferrer

Parámetro	Unidades	Valor	Observación
1.Calculo de altura del medio de soporte			
Altura útil del filtro	m	3,95	
Altura del falso fondo	m	0,31	Tomado del plano
Altura del borde libre	m	0,32	
Altura del medio de soporte	m	3,32	Estimado
2.Calculo de volumen del medio de soporte			
Ancho del tanque	m	6	
Largo del tanque	m	7,5	
Área superficial	m ²	45	
Volumen del medio de soporte	m ³	149,4	
Volumen útil del filtro	m ³	177,75	
3.Calculo del gasto de trabajo			
Caudal bombeado	L/s	8,32	
4.Características del agua residual			
Concentración esperada de DBO ₅ afluente	mg/L	109	Tomado del muestreo

5. Cálculo de parámetros hidráulicos			
TRH medio de soporte	h	4,99	
TRH volumen útil	h	5,93	
Velocidad de flujo ascendente	m/h	0,66	
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	15,97	
Carga orgánica volumétrica DBO ₅	kg/m ³ d	0,524	
Eficiencia medio de soporte	%	61,05	

Evaluando las dimensiones del tanque, se encuentra una diferencia con las medidas propuestas en el diseño de formulación, de modo que, ya se espera una variación en algunos criterios de diseño. El caudal que se tomó fue el de bombeado hacia el tratamiento secundario, y las características del agua residual tratada de los muestreos realizados en la campaña de monitoreo. Las condiciones reales de la planta muestran que el tiempo de retención hidráulico para el volumen útil del filtro y el lecho filtrante, es de 5,93 y 4,99 h respectivamente, con esto cumplen con las 4 a 10 h propuestas por (Goncalves et al., 2001), aunque hay una variación con los datos de la (Tabla 12), sigue estando dentro del rango aceptado.

La carga hidráulica superficial tiene un valor de 15,97 kg/m³d que varía considerablemente con la encontrada en el diseño formulación (Tabla 12), en este caso, se encuentra casi en el límite para el cumplimiento que propone Goncalves de 6 a 16 kg/m³d (2001). La carga orgánica volumétrica está en un valor adecuado, sin embargo, debe tenerse en cuenta que el volumen del lecho filtrante fue estimado, y se obtuvo por relación a otras dimensiones que si se pudieron medir en las visitas a campo.

De los resultados obtenidos de muestreo (Tabla 8) y las evidencias que presentan las problemáticas que se tienen con el control del volumen de lecho filtrante en su lugar (Fotografía 5) y (Fotografía 6), quieren decir que posiblemente este volumen encontrado no represente la realidad o que la dispersión de las rosetas plásticas generan otras condiciones hidráulicas para el flujo dentro del tanque.

6.3.2 FAFA municipio de Santo Domingo

Los datos que se registraron en la (Tabla 14), son los valores que se obtuvieron al momento de formular el proyecto de la PTAR, específicamente hablando del diseño de los filtros anaerobios de flujo ascendente, las dimensiones de la unidad fueron verificados con el plano de diseño; dicha información fue facilitada por la empresa de servicios públicos del municipio con colaboración de la ingeniera residente.

Tabla 14. Diseño de formulación FAFA Santo Domingo

Parámetro	Unidades	Valor
1. Características del agua residual		
DBO ₅ afluente	mg/L	297
Caudal de diseño	L/s	11,66
2. Dimensiones del FAFA		
Altura del medio de soporte	m	1,8
Altura útil	m	2,7
Ancho del tanque	m	18
Largo del tanque	m	5,4
Área superficial	m ²	96,3
Volumen del medio de soporte	m ³	158,4
Volumen útil	m ³	262,44
3. Características de las rosetas		
Área superficial libre de las rosetas	m ² /m ³	65
Área superficial de contacto	m ²	10494
Cantidad de rosetas	#	6369
4. parámetros hidráulicos de diseño		
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	0,09
Carga orgánica volumétrica	Kg DBO/m ³ d	0,43
Velocidad ascensional	m/h	0,14
TRH medio de soporte	h	4,13
Eficiencia	%	93

Fuente: Memorial de cálculo PTAR Santo Domingo

Analizando la metodología usada y los datos obtenidos, se encuentra que las características del agua residual del afluente, corresponden a la salida estimada del reactor UASB, siendo ésta la unidad que antecede el filtro anaerobio. El caudal de diseño de la planta es de 11,66 L/s con los cuales, se calcularon las dimensiones del tanque que tienen una proporción adecuada en comparación con el volumen del tanque UASB, siendo incluso un poco más grande: el ancho del filtro en el memorial de diseño está amarrado al ancho de la unidad antecesora.

En este caso se tuvo en cuenta una estimación de la cantidad de rosetas plásticas como componentes del medio de soporte para un total de 6.369, esto no se pudo comprobar en campo debido a la complejidad y tiempo de dicha actividad, sin embargo es de revisión para con el diseño, ya que en las visitas técnicas y en el monitoreo de los muestreos se encontraron falencias en el rendimiento (Tabla 9), y el volumen del lecho filtrante es uno de los principales factores a revisar como fundamental, en lo que se considera un filtro anaerobio de flujo ascendente.

Revisando los parámetros hidráulicos que se obtuvieron, se encuentra que el tiempo de retención hidráulico de 4,13 horas está dentro del intervalo que propone Carlos Chernicharo de 4 a 10 horas (Chernicharo, 2007) estando en este caso muy cercano al límite inferior, no obstante se debe tener en cuenta, que el tren de tratamiento está configurado para dos filtros de flujo ascendente dispuestos en serie, por esta razón el TRH calculado en realidad correspondería al volumen total, con lo cual el valor que se obtiene es 8,26 horas, que sigue estando en el límite recomendado y que en teoría debería dar más tiempo de contacto al agua residual con los microorganismos.

La carga orgánica volumétrica calculada en base al volumen del medio de soporte, tiene un valor de 0,43 kg DBO/m³d, el cual se encuentra dentro del rango aceptado de 0,25 a 0,75 kg DBO/m³d (Chernicharo, 2007) y una carga hidráulica superficial de 0,09 m³/m²d que no está dentro del rango de 6 a 15 m³/m²d (Goncalves et al., 2001). La eficiencia teórica que se obtuvo es del 93%, muy alta para lo que normalmente es alcanzado por estos filtros y con lo que en realidad se ve en campo, los muestreos dejan claro que la unidad no está en su óptimo.

Los resultados obtenidos en la evaluación según la metodología de CONAGUA (Tabla 15), fueron el producto de mediciones en campo y registros de operación en tiempo real; se analizó el diseño en base al caudal máximo bombeado y al promedio, ya que se facilitó obtenerlo, pues luego de la salida del FAFA se tenía instalado un dispositivo de aforo, en este caso un vertedero rectangular.

Tabla 15. Evaluación del FAFA Santo Domingo

Parámetro	Unidades	Valor	Observación
1.Calculo de la altura del medio de soporte			
Altura útil	m	3,15	
Altura del falso fondo	m	0,31	Tomado del plano
Altura del borde libre	m	0	
Altura del medio de soporte	m	2,84	Estimado
2.Calculo del volumen del medio de soporte			
Ancho del tanque	m	6	
Largo del tanque	m	7,5	
Área superficial	m ²	45	
Volumen del medio de soporte	m ³	127,8	
Volumen útil	m ³	141,75	
3.Calculo del gasto de trabajo del filtro			
Caudal máximo bombeado	L/s	17,6	Problema bombeo

Caudal promedio bombeado	L/s	10,06	
4.Características del agua residual entrante			
Concentración de DBO ₅ afluente	mg/L	109	Tomado del muestreo
5.Calculo de parámetros hidráulicos			
TRH máximo medio de soporte	h	2,01	
TRH promedio medio de soporte	h	3,53	
Velocidad flujo ascendente máxima	m/h	1,41	
Velocidad flujo ascendente promedio	m/h	0,80	
Carga hidráulica superficial máxima	m ³ /m ² d	33,96	
Carga hidráulica superficial promedio	m ³ /m ² d	19,32	
Carga orgánica volumétrica DBO máxima	kg/m ³ d	1,30	
Carga orgánica volumétrica DBO promedio	kg/m ³ d	0,74	
Eficiencia medio de soporte	%	38,59	

En este sentido, se conoce que la PTAR tiene problemas con el sistema de bombeo, por lo cual en muchas ocasiones se sobrepasó el caudal de diseño lo que puede ocasionar problemas hidráulicos en la unidad. Las dimensiones del filtro fueron verificadas en la medida de lo posible, pues debido a la construcción de tanque cerrado no se logró obtener las medidas de la altura del falso fondo ni verificar el volumen conformado por el material de soporte existente, sin embargo, se realizó una estimación en base a los datos obtenidos en campo y en el plano de diseño.

El TRH que se obtuvo para varios casos, estuvo por debajo de lo recomendado por Goncalves, siendo más bajo que el que se esperaba en el diseño de la formulación (Tabla 14), el cual si cumplía analizando el filtro anaerobio por modulo, pero cuando se tienen en cuenta los dos módulos existentes el TRH promedio aumenta a 7,06 horas, con esto aumenta la eficiencia, a pesar de esto, los resultados de operación y caracterización de las aguas residuales (Tabla 9) muestran que el FAFA no tiene las eficiencias que se esperan, relacionado a las problemáticas evidenciadas con el volumen de lecho filtrante.

6.3.3 FAFA del corregimiento de Buenos Aires

Los datos registrados en la (Tabla 16), se obtuvieron con apoyo de la ingeniera residente de la PTAR producto de planos y las memorias de diseño facilitados por planeación del municipio de San Luis.

Tabla 16. Diseño de formulación Fafa Buenos Aires

Parámetro	Unidades	Valor
1. Características del agua residual		
Caudal de diseño	L/s	1
DBO ₅ afluente	mg/L	114,6
2. Dimensiones		
Altura del medio de soporte	m	1,77
Altura útil	m	1,77
Ancho del tanque	m	2,4
Largo del tanque	m	1,42
Área superficial	m ²	3,408
Volumen del medio de soporte	m ³	3,49
Volumen útil	m ³	3,49
3. Parámetros hidráulicos de diseño		
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	25,35
Carga orgánica volumétrica	Kg DBO/m ³ d	2,83
Velocidad ascensional medio de soporte	m/h	1,06
TRH medio de soporte	h	0,97
Eficiencia	%	11,69
DBO ₅ efluente	mg/L	101,20

Fuente: Planos hidráulicos PTAR Buenos Aires

El caudal que se proyectó para la planta fue de 1 L/s pues la comunidad que tributa al alcantarillado es pequeña, las dimensiones del tanque en fibra de vidrio corresponden a las encontradas en el plano, no se logró evidenciar la presencia de un falso fondo, por lo cual se asume que todo el volumen útil está ocupado por material filtrante, en este caso la unidad Fafa tiene un volumen de 3,49 m³, los parámetros hidráulicos que se obtuvieron fueron: tiempo de retención hidráulico de 0,97 h, el cual es demasiado bajo según estudios realizados por Goncalves (2001) de FAFAS como unidad de postratamiento de tanques sépticos. La carga orgánica volumétrica es de 2,83 kg DBO/m³d que está muy por encima del intervalo recomendado de 0,25 a 0,75 kg DBO/m³d (Chernicharo, 2007).

La carga hidráulica superficial con un valor de 25,35 m³/m²d por encima del límite superior recomendado de 15 m³/m²d (Goncalves et al., 2001). La eficiencia esperada es de 11,69% que está en concordancia con los resultados obtenidos en los muestreos Tabla 17, pues no es una planta que esté haciendo mucho teniendo en cuenta que los buenos resultados se dan por las bajas concentraciones con las que llega el agua residual a la planta.

La evaluación del FAFA se realizó en base a la metodología de CONAGUA, con mediciones realizadas en campo, los resultados se registran en la Tabla 17.

Tabla 17. Evaluación del FAFA Buenos Aires

Parámetro	Unidades	Valor	Observación
1. Calculo de la altura del medio de soporte			
Altura útil	m	1,74	
Altura del falso fondo	m	0,46	Tomado del plano
Altura del borde libre	m	0,32	
Altura del medio de soporte	m	0,96	medido en campo
2. Calculo del volumen del medio filtrante			
Ancho del tanque	m	2,5	
Largo del tanque	m	1,47	
Área superficial	m ²	3,67	
Volumen del medio de soporte	m ³	1,06	
Volumen útil	m ³	3,50	
Numero de rosetas	#	1340	
3. Calculo del gasto de trabajo del filtro			
Caudal máximo	L/s	1,80	Problemas método
Caudal promedio	L/s	1,15	
4. Características del agua residual entrante			
DBO ₅ afluente	mg/L	114,6	Dato de muestreo
5. Calculo de parámetros hidráulicos			
TRH máximo medio de soporte	h	0,16	
TRH promedio medio de soporte	h	0,26	
Velocidad flujo ascendente máxima	m/h	1,76	
Velocidad flujo ascendente promedio	m/h	1,13	
Carga hidráulica superficial máxima	m ³ /m ² d	42,32	
Carga hidráulica superficial promedio	m ³ /m ² d	27,04	
Carga orgánica volumétrica máxima	kg/m ³ d	16,75	
Carga orgánica volumétrica promedio	kg/m ³ d	10,70	
Eficiencia	%	-71,61	TRH 0,756 h tiende a 0%

Se debe resaltar que el tren de tratamiento no contaba con una estructura hidráulica para aforar el caudal de ingreso a la planta, por ende, se utilizó el método de flotador, con la influencia externa del viento que puede ocasionar errores en la medición; con relación a lo anterior, se tomaron los caudales máximos y promedio registrado, estos se encuentran por encima del caudal de diseño de la planta Tabla 16.

Los tiempos de retención hidráulicos que se lograron para distintas condiciones incumplen los valores recomendados, la carga orgánica volumétrica promedio con 10,7 kg DBO/m³d, está muy por encima del valor recomendado de 0,25 a 0,75 kg DBO/m³d (Chernicharo, 2007). La carga hidráulica superficial promedio de 27,04 m³/m²d tampoco cumple con el intervalo recomendado de 6 a 15 m³/m²d (Goncalves et al., 2001). La eficiencia en este caso presenta un caso particular ya que la ecuación usada para ello se expresa en términos de TRH, el valor de TRH de 0,756 horas hace cero la eficiencia, debido a esto, valores menores no tienen sentido en el diseño de un FAFA, resaltando también que los datos medidos en campo difieren en algunos aspectos de los datos obtenidos del plano.

6.3.4 FAFA del municipio de Granada

Los datos conseguidos que se tomaron de los planos de diseño y del memorial de cálculo, obtenido gracias a la ingeniera residente y compartido por la empresa de servicios públicos del municipio (Tabla 18), en este caso hay mucha información que no se evidencia en la construcción realizada, pues hay varios modelos como trabajo de optimización a la planta que originalmente se construyó en el año de 1999. El caudal que estaba llegando era mayor por lo cual se hizo necesario una adecuación para un caudal de 25 L/s.

Tabla 18. Diseño de formulación FAFA Granada

Parámetro	Unidades	Valor
1. Características del agua residual		
DQO afluente	mg/L	220,6
Caudal de diseño	L/s	13,1
2. Dimensiones		
Altura del medio de soporte	m	2,5
Altura útil	m	4,4
Altura del falso fondo	m	0,5
Ancho del tanque	m	7
Largo del tanque	m	7,3
Área superficial	m ²	51,1
Volumen del medio de soporte	m ³	127,75
Volumen útil	m ³	224,84
3. Parámetros hidráulicos de diseño		
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	22,15
Carga orgánica volumétrica	kg DBO/m ³ d	1,95
Velocidad ascensional	m/h	0,92
TRH medio de soporte	h	2,71
Eficiencia remoción esperada	%	47,14

Fuente: Planos hidráulicos y memorial de diseño PTAR Granada

En las memorias de diseño se tiene un FAFA cilíndrico no convencional, pero el que se construyó fue uno convencional en concreto reforzado de área rectangular, de las unidades construidas no se encontraron los criterios de diseño, pero si algunas medidas que se encuentran en los planos con lo cual se permite la evaluación de los parámetros hidráulicos, para el tren de tratamiento que se tiene; esta unidad actúa como tratamiento secundario antecedido de un sedimentador primario.

La carga hidráulica superficial con un valor de $22 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ está por encima del valor recomendado de 6 a $15 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ (Chernicharo, 2007), la carga orgánica volumétrica con un valor de $1,95 \text{ kg DBO}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ está por encima de lo que se considera favorable con un intervalo de 0,25 a $0,75 \text{ kg DBO}/\text{m}^3\cdot\text{d}$, para este parámetro se tomó la DBO esperada después del sedimentador primario; el tiempo de retención hidráulico como parámetro más importante en el diseño tiene un valor de 2,71 horas, que está por fuera de lo recomendado; normalmente los filtros anaerobios que no cumplen con este parámetro, evidencian problemas hidráulicos y de operación como se da en este caso. Los datos se tomaron de mediciones realizadas en campo siguiendo la metodología de evaluación de CONAGUA (Tabla 19), en el filtro anaerobio construido no se logra evidenciar la presencia de un falso fondo, sin embargo se presenta claramente una cantidad exagerada de rosetas plásticas que saturan el volumen útil, por esta razón se deduce el volumen ocupado por el lecho filtrante, los caudales de trabajo analizados fueron el máximo y el promedio obtenidos en la operación, el máximo se encuentra por fuera el caudal de diseño pero la diferencia no es considerable.

Tabla 19. Evaluación del FAFA Granada

Parámetro	Unidades	Valor	Observación
1. Calculo de la altura del medio de soporte			
Altura útil	m	4	
Altura del falso fondo	m	0	No se evidencia
Altura del borde libre	m	0,5	
Altura del medio de soporte	m	3,5	Estimado
2. Calculo del volumen del medio filtrante			
Ancho del tanque	m	3,8	
Largo del tanque	m	5,8	
Área superficial	m^2	22,04	
Volumen del medio de soporte	m^3	77,14	
Volumen útil	m^3	88,16	
3. Calculo del gasto de trabajo del filtro			
Caudal máximo	L/s	14,35	
Caudal promedio	L/s	10,90	
4. Características del agua residual entrante			

DBO ₅ afluente	mg/L	55	Dato de muestreo
5.Calculo de parámetros hidráulicos			
TRH máximo	h	1,49	
TRH promedio	h	1,97	
Velocidad flujo ascendente máxima	m/h	2,34	
Velocidad flujo ascendente promedio	m/h	1,78	
Carga hidráulica superficial máxima	m ³ /m ² d	56,25	
Carga hidráulica superficial promedio	m ³ /m ² d	42,73	
Carga orgánica volumétrica DBO máxima	kg/m ³ d	0,88	
Carga orgánica volumétrica DBO promedio	kg/m ³ d	0,67	
Eficiencia	%	28,80	

El tiempo de retención hidráulico se calculó para distintas condiciones, en las cuales se incumplió con los valores recomendados. La carga hidráulica superficial promedio con un valor de 42,73 m³/m²d no cumple con el límite máximo de 17 m³/m²d (Goncalves et al., 2001), y que tiene una diferencia de casi el doble con los datos encontrados de diseño (Tabla 18), la carga orgánica volumétrica es de 0,67 kg/m³d que está dentro del límite de 0,25 a 0,75 kg/m³d (Chernicharo, 2007).

6.3.5 FAFA del municipio de San Francisco

Los valores obtenidos (Tabla 20) fueron tomados de las memorias de diseño y de los planos obtenidos por la ingeniera residente, facilitados por la empresa de servicios públicos del municipio. En este caso se tienen 2 filtros anaerobios de flujo ascendente construidos en forma cilíndrica en material de fibra de vidrio, que difiere de los 3 tanques que estaban formulados en el proyecto y que se encuentran en los planos.

Tabla 20. Diseño de formulación FAFA San Francisco

Parámetro	Unidades	Valor
1.Características del agua residual		
DBO ₅ afluente	mg/L	101,5
Caudal de diseño	L/s	2,5
2.Dimensiones		
Altura del medio de soporte	m	2,12
Altura útil	m	3
Altura del falso fondo	m	0,88
Diámetro del tanque	m	2,5
Área superficial	m ²	4,91
Volumen del medio de soporte	m ³	10,41
Volumen útil	m ³	14,73

3. Parametros hidráulicos de diseño		
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	44,00
Carga orgánica volumétrica	Kg DBO/m ³ d	2,11
Velocidad ascensional	m/h	0,86
TRH medio de soporte	h	1,16
Eficiencia	%	19,09

Fuente: Planos hidráulicos y memorial de cálculo PTAR San Francisco

El tiempo de retención hidráulico fue de 1,16 horas que no cumple con el límite de 4 a 10 horas (Goncalves et al., 2001). La carga orgánica volumétrica con un valor de 2,11 kg/m³d, el cual está por fuera del límite 0,25 a 0,75 kg/m³d (Chernicharo, 2007). La carga hidráulica volumétrica de 44 m³/m²d está por fuera del límite de 15 m³/m²d (Goncalves et al., 2001). Según los resultados obtenidos se espera que estas unidades tengan problemas hidráulicos. Los datos que se registran en la (Tabla 21) son los resultados de la evaluación según la metodología de CONAGUA, en base a datos que fueron obtenidos en campo por la ingeniera residente, los muestreos y mediciones de rutina realizados en el transcurso del arranque la PTAR.

Tabla 21. Evaluación del FAFA San Francisco

Parámetro	Unidades	Valor	Observación
1. Calculo de la altura del medio de soporte			
Altura del falso fondo	m	0,88	Tomado del plano
Altura del borde libre	m	0	
Altura útil	m	3,1	
Altura del medio de soporte	m	2,22	Estimado
2. Calculo del volumen del medio de soporte			
Diámetro del filtro	m	2,9	
Área superficial	m ²	6,61	
Volumen del medio de soporte	m ³	14,66	
Volumen útil	m ³	20,48	
3. Caudal de trabajo			
Caudal máximo diario	L/s	3,55	Tomado del registro
Caudal promedio diario	L/s	2,27	Tomado del registro
4. Características del agua residual			
DBO ₅ afluente	mg/L	101,5	Dato de muestreo
5. Calculo de parámetros hidráulicos			
TRH máximo	h	1,15	
TRH promedio	h	1,79	
Velocidad flujo ascendente máxima	m/h	1,93	

Velocidad flujo ascendente promedio	m/h	1,24	
Carga hidráulica superficial máxima	m ³ /m ² d	46,44	
Carga hidráulica superficial promedio	m ³ /m ² d	29,69	
Carga orgánica volumétrica DBO ₅ máxima	kg/m ³ d	2,12	
Carga orgánica volumétrica DBO ₅ promedio	kg/m ³ d	1,36	
Eficiencia	%	18,78	

Los tiempos de retención hidráulicos que fueron hallados no corresponden a lo que se espera en un diseño que cumpla con los criterios ya establecidos por diversos estudios como el del autor brasileño Goncalves que establece un valor de 4 a 10 horas (Goncalves et al., 2001), ninguno de los parámetros hidráulicos está dentro de lo esperado; para lo que se estima una eficiencia del 18,7% que se evidencia con la baja remoción que consiguieron en el proceso de operación (Tabla 11).

6.3.6 FAFA del corregimiento de la Piñuela

En el municipio de la Piñuela, se presentaron inconvenientes para conseguir los documentos de diseño, a pesar de esto se logró encontrar a uno de los ingenieros que hizo parte del equipo de diseño de dicha PTAR, quien facilito el caudal de diseño de la planta: Los planos fueron compartidos por uno de los constructores y los resultados obtenidos en base a esos datos se registran en la Tabla 22.

Tabla 22. Diseño de formulación FAFA La Piñuela

Parámetro	Unidades	Valor
1.Características del agua residual		
DBO ₅ afluente	mg/L	210
Caudal de diseño	L/s	2
2.Dimensiones		
Altura del medio de soporte	m	3,85
Altura útil	m	4,45
Altura del falso fondo	m	0,6
Ancho del tanque	m	2,03
Largo del tanque	m	4,3
Área superficial	m ²	8,73
Volumen del medio de soporte	m ³	33,61
Volumen útil	m ³	38,84
3.Parametros hidráulicos de diseño		
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	19,80

Carga orgánica volumétrica	Kg DBO/m ³ d	1,08
Velocidad ascensional	m/h	0,21
TRH medio de soporte	h	4,67
Eficiencia	%	59,73

Fuente: Planos hidráulicos y memorial de diseño PTAR La Piñuela

Los parámetros hidráulicos evaluados en este caso, están muy cercanos de dar cumplimiento a lo esperado, el tiempo de retención hidráulico con un valor de 4,67 horas que está dentro del rango de 4 a 10 horas (Goncalves et al., 2001), la carga hidráulica superficial con un valor de 19,80 m³/m²d, está muy cercano a cumplir el intervalo de 6 a 15 m³/m²d (Goncalves et al., 2001), a diferencia de los FAFAS de las demás PTAR. La carga orgánica volumétrica tiene un valor de 1,08 kg/m³d que está cerca al intervalo de 0,25 a 0,75 kg/m³d propuesto por Carlos Chernicharo (2007). Los resultados de la Tabla 23, fueron adquiridos de la evaluación en base a la metodología de CONAGUA, la finalidad del análisis, es la posibilidad de evaluar las dimensiones que se tienen en el plano, bajo los caudales de trabajo registrados en el transcurso de operación, ya que dichas dimensiones no se pudieron estimar en campo (Ramírez et al., 2021).

Tabla 23. Evaluación del FAFAS La Piñuela

Parámetro	Unidades	Valor	Observación
1.Calculo de la altura del medio de soporte			
Altura útil del filtro	m	4,45	
Altura del falso fondo	m	0,6	Tomado del plano
Altura del borde libre	m	0	
Altura del medio de soporte	m	3,85	Estimado
2.Calculo del volumen del medio filtrante			
Ancho del tanque	m	2,03	
Largo del tanque	m	4,30	
Área superficial	m ²	8,73	
Volumen del medio de soporte	m ³	33,61	
Volumen útil	m ³	38,84	
3. Caudal de trabajo			
Caudal máximo	L/s	4,23	Registro
Caudal promedio	L/s	3,60	Tomado del registro
4.Características del agua residual entrante			
DBO ₅ afluente	mg/L	210	Tomado del registro
5.Calculo de parámetros hidráulicos			
TRH máximo	h	2,21	
TRH promedio	h	2,59	

Velocidad flujo ascendente máxima	m/h	1,74	
Velocidad flujo ascendente promedio	m/h	1,48	
Carga hidráulica superficial máxima	m ³ /m ² d	41,87	
Carga hidráulica superficial promedio	m ³ /m ² d	35,63	
Carga orgánica volumétrica DBO ₅ máxima	kg/m ³ d	8,79	
Carga orgánica volumétrica DBO ₅ promedio	kg/m ³ d	7,48	
Eficiencia	%	41,44	

Para ningún parámetro hidráulico el filtro anaerobio de flujo ascendente está dentro de los intervalos que se consideran adecuados para el diseño y el funcionamiento propuestos por Goncalves (2001) con el TRH promedio se consigue una eficiencia de 41,4% que es muy similar al rendimiento que mostro el filtro en campo según el muestreo. Cabe resaltar la diferencia en los resultados entre la Tabla 22 y Tabla 23, con una leve variación en los caudales de ingreso.

6.4 Resultados metodología de diseño propuesta FAFA

6.4.1 FAFA municipio de San Vicente de Ferrer

Los resultados conseguidos según la metodología Tabla 7, se evaluaron para las mismas características iniciales de caudal de diseño encontradas para la planta construida de 16,64 L/s; se estimó una configuración de 2 módulos en paralelo y algunas dimensiones de asumieron teniendo en cuenta los volúmenes de las unidades instaladas de UASB en el municipio; estos resultados se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Resultado diseño propuesto FAFA San Vicente de Ferrer

Parámetro	Unidades	Valor
1.Características del agua residual afluyente		
Caudal de diseño	L/s	16,64
DBO ₅	mg/L	109
2.Parametros hidráulicos		
Tiempo de retención hidráulico	h	7
3.Dimensiones		
Volumen útil	m ³	419
Numero de módulos	#	2
Volumen útil por modulo	m ³	210
Altura del falso fondo	m	0,3
Altura del borde libre	m	0,2
Altura del medio de soporte	m	4
Altura útil	m	4,5

Área superficial	m ²	46,6
Volumen del medio de soporte	m ³	186,4
Verificación		
% volumen del medio de soporte	%	44,44
Caudal de diseño por modulo	L/s	8,32
TRH volumen útil por modulo	h	7,00
TRH en el medio de soporte	h	6,22
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	15,43
Carga orgánica volumétrica	kg/m ³ d	0,42
Velocidad ascensional	m/h	0,64
Volumen lecho plástico RAS	m ³	143,77
Continuación		
Ancho del tanque	m	6
Largo del tanque	m	7,8
4. Características del lecho filtrante		
Área superficial de contacto	m ² /m ³	100
Área total de contacto	m ²	18637
Volumen unitario de roseta	m ³	0,0012
Porcentaje de vacíos en el lecho	%	80
Volumen de soporte en el lecho	m ³	149,1
Cantidad de rosetas por modulo	#	155307
5. Eficiencia		
Eficiencia lecho	%	65,12
DBO efluente TRH lecho	mg/L	38,02

En este aspecto, se inició con un TRH de 7 h, que se considera adecuado para los volúmenes que se esperaban, los criterios hidráulicos evaluados quedaron con un TRH en el lecho de 6,22 h, una COV de 0,42 kg/m³d, una velocidad ascensional de 0,6 m/h y en este caso para la CHS que era un factor limitante en el diseño, puesto que era el que se salía de rango con mayor facilidad. El resultado hallado fue 15,43 m²/m³d; mientras que los valores reales obtenidos para el diseño en la (Tabla 12), dieron unos criterios que se salían del rango esperado. El TRH de 5,22 h estaba muy bien, pero es más pequeño que el adquirido con la presente metodología; además de una CHS de 0,07 m³/m²d y una carga orgánica volumétrica de 2,08 kg DBO/m³d que no cumplen.

Bajo estas nuevas condiciones el volumen útil de la unidad pasa de 158,4 m³ y un volumen de lecho de 158,4 m³ a volúmenes de 210 m³ y 186,4 m³ respectivamente, para unas dimensiones de 6 m de ancho por 7,8 m de largo en comparación de las 6 m de ancho y 8 de largo que se tenían, en este caso se aumentó un poco la altura a 4,5 m en comparación con los 4,3 m originales. Las eficiencias obtenidas fueron de 65,12 % relacionadas en gran medida con el aumento del tiempo de retención hidráulico, originalmente la eficiencia estaba alrededor de 60%, sin embargo, en la

práctica se evidenciaron los bajos rendimientos (Tabla 8), esperados desde el diseño ya que incumplían varios parámetros (Tabla 12).

6.4.2 FAFA municipio Santo Domingo

Los resultados derivados según la metodología propuesta (Tabla 7), se evaluaron para las mismas características iniciales de caudal de diseño encontradas para la planta construida y se muestran en la (Tabla 12). Los filtros anaerobios de Santo Domingo se diseñaron en este caso buscando las mismas condiciones del actual construido para una configuración en serie, pero también se propuso una configuración en paralelo (Tabla 25).

Tabla 25. Resultado de diseño propuesto FAFA Santo domingo

Parámetro	Unidades	Valor serie	Valor paralelo
1.Características del agua residual afluyente			
Caudal de diseño	L/s	11,66	11,66
DBO ₅	mg/L	109	109
2.Parametros hidráulicos			
Tiempo de retención hidráulico	h	10	6,5
3.Dimensiones			
Volumen útil	m ³	420	273
Numero de módulos	#	2	2
Volumen útil por modulo	m ³	209,9	136,4
Altura del falso fondo	m	0,2	0,2
Altura del borde libre	m	0,25	0,25
Altura del medio de soporte	m	2,8	4
Altura útil	m	3,25	4,45
Área superficial	m ²	64,6	30,7
Volumen del medio de soporte	m ³	180,8	122,6
Verificación			
Porcentaje Volumen lecho	%	43,1	44,9
Caudal de diseño por modulo	L/s	11,66	5,83
TRH volumen útil por modulo	h	5,00	6,50
TRH en el medio de soporte	h	4,3	5,8
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	15,60	16,43
Carga orgánica volumétrica	kg/m3d	0,61	0,45
Velocidad ascensional	m/h	0,65	0,68
Volumen lecho plástico RAS	m ³	201,48	100,74
Continuación			
Ancho del tanque	m	7,5	4,1
Largo del tanque	m	8,6	7,5

4. Características del medio de soporte			
Área superficial de contacto	m ² /m ³	100	100
Área total de contacto	m ²	18082	12263
Volumen unitario de roseta	m ³	0,0012	0,0012
Porcentaje de vacíos en el lecho	%	80	80
Volumen de soporte en el lecho	m ³	145	98
Cantidad de rosetas	#	150683	102189
5. Eficiencia			
Eficiencia	%	58,08	64,01
DBO ₅ efluente	mg/L	45,69	39,23

Bajo las dos consideraciones los criterios hidráulicos como TRH, COV y CHS están bajo límites positivos recomendados en comparación con los valores reales que se obtuvieron en el diseño original (Tabla 25), en este caso la configuración en paralelo presenta unos mejores resultados, en especial las dimensiones que se dejan llevar hasta un volumen en concordancia con el del UASB existente, ya que el volumen útil es más grande en el modelo en serie con 420 m³, mientras el modelo en paralelo se tiene un volumen de 136,4 m³, el diseño existente tiene un volumen de 262,4 m³.

Debido a la gran diferencia obtenida, se sigue comparando la propuesta en paralelo con el diseño existente; el tiempo de retención hidráulico se fijó en 5,8 h, mientras el diseño actual tiene un tiempo de 4,13 h, una carga orgánica volumétrica de 0,45 kg DBO/m³d mientras el real construido tiene 0,43 kg DBO/m³d. En este caso la diferencia no es notoria y se encuentran dentro del rango. La carga hidráulica superficial es de 16,43 m³/m²d un poco por encima mientras que el diseño original está 0,09 m³/m²d muy por debajo del límite necesario de 6 m³/m²d, los parámetros obtenidos de la evaluación en campo Tabla 15 difieren mucho más con una CHS de 19,32 m³/m²d, un TRH de 3,53 h y una COV de 0,74 kg/m³d. Las eficiencias esperadas son de 64,01 % mientras que el filtro actual diseñado tiene una eficiencia del 93%, en la práctica se evidencia que estas eficiencias tan altas no se obtienen, por lo cual el modelo que se plantea en este estudio presenta mejores condiciones.

6.4.3 FAFA del corregimiento de Buenos Aires

Los resultados que se muestran en la Tabla 26 se consiguieron bajo la metodología propuesta de diseño (Tabla 7), para realizar la comparación con los datos existentes, se procuró seguir los mismos parámetros iniciales como: Caudal, DBO₅ afluente y las dimensiones de la unidad anterior al FAFA, en este caso un tanque séptico.

Tabla 26. Resultado de diseño propuesto FAFA Buenos Aires

Parámetro	Unidades	Valor
1. Características del agua residual afluyente		
Caudal de diseño	L/s	1
DBO ₅	mg/L	70
2. Parametros hidráulicos		
Tiempo de retención hidráulico	h	4,7
3. Dimensiones		
Volumen útil	m ³	17
Numero de módulos	#	1
Volumen útil por modulo	m ³	16,9
Altura del falso fondo	m	0,2
Altura del borde libre	m	0,2
Altura del medio de soporte	m	2,2
Altura útil	m	2,6
Área superficial	m ²	6,5
Volumen del medio de soporte	m ³	14,3
Verificación		
% Volumen medio filtrante	%	84,6
Caudal de diseño por modulo	L/s	1
TRH volumen útil por modulo	h	4,70
TRH medio de soporte	h	4,0
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	13,28
Carga orgánica volumétrica	kg/m ³ d	0,42
Velocidad ascensional	m/h	0,55
Volumen lecho plástico RAS	m ³	17,28
Continuación		
Ancho del tanque	m	2,6
Largo del tanque	m	2,5
4. Características del lecho filtrante		
Área superficial de contacto	m ² /m ³	100
Área total de contacto	m ²	1432
Volumen unitario de roseta	m ³	0,0012
Porcentaje de vacíos	%	80
Volumen de soporte en el lecho	m ³	11
Cantidad de rosetas	#	11931
5. Eficiencia		
Eficiencia lecho	%	56,37

DBO ₅ efluente TRH lecho	mg/L	30,54
DBO ₅ efluente TRH útil	mg/L	28,09

El TRH se fijó en 4,7 h con el fin de guardar proporción con el volumen de la unidad anterior del FAFA, y poniendo total atención al cumplimiento de todos los parámetros hidráulicos de revisión como: TRH en el medio de soporte, la COV, la CHS y la velocidad ascensional; de este modo desde el diseño se espera que no haya problemas hidráulicos. En el caso del diseño actual construido, ninguno de estos parámetros está dentro del rango recomendado (Tabla 16) y logra una eficiencia de 11,69%, mientras el diseño propuesto logra una eficiencia de 56,37% cumpliendo todos los parámetros, con lo cual las dimensiones deben ser de 2,6 m de altura útil, un ancho de 2,6 m y un largo de 2,6 m, esta última medida difiere de los 1,47 m que tiene el tanque actual construido.

6.4.4 FAFA del municipio de San Francisco

Los resultados recopilados en la Tabla 27, son el producto de la aplicación de la metodología propuesta (Tabla 7), para lo cual se siguieron algunas condiciones de diseño similares con la formulación de la construcción existente; se comparan con el diseño formulado y el diseño actual bajo condiciones de operación (Tabla 21).

Tabla 27. Resultado de diseño propuesto FAFA San Francisco

Parámetro	Unidades	Valor
1. Características del agua residual afluyente		
Caudal de diseño	L/s	5
DBO ₅	mg/L	101,5
2. Parametros hidráulicos		
Tiempo de retención hidráulico	h	7,5
3. Dimensiones		
Volumen útil	m ³	135
Numero de módulos	#	2
Volumen útil por modulo	m ³	67,5
Altura del falso fondo	m	0,2
Altura del borde libre	m	0,25
Altura del medio de soporte	m	4,5
Altura útil	m	4,95
Área superficial	m ²	13,6
Volumen del medio de soporte	m ³	61,4
Verificación		
Porcentaje Volumen lecho	%	45,5
Caudal de diseño por modulo	L/s	2,5
TRH volumen útil por modulo	h	7,50

TRH en el medio de soporte	h	6,8
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	15,84
Carga orgánica volumétrica	kg/m ³ d	0,36
Velocidad ascensional	m/h	0,66
Volumen lecho plástico RAS	m ³	43,20
Continuación		
Ancho del tanque	m	2,6
Largo del tanque	m	5,2
4. Características del lecho filtrante		
Área superficial de contacto	m ² /m ³	100
Área total de contacto	m ²	6136
Volumen unitario de roseta	m ³	0,0012
Porcentaje de vacíos	%	80
Volumen de soporte en el lecho	m ³	49
Cantidad de rosetas	#	51136
5. Eficiencia		
Eficiencia	%	66,68
DBO ₅ efluente	mg/L	33,82

En el presente diseño lo que se buscó fue el cumplimiento de todos los criterios de diseño TRH de 6,8 h, CHS de 15,84 m²/m³d, COV de 0,36 kg/m³d y velocidad ascensional de 0,66 m/h, con el fin de evitar problemas hidráulicos en el FAFA, mientras que el diseño de formulación previo a la construcción no cumple con ningún parámetro, con resultados como: el TRH de 1,16 h, la CHS de 44 m³/m²d y la COV de 2,11 m³/m²d; los parámetros analizados bajo condiciones de operación no se tienen en cuenta ya que son similares a los del diseño de formulación.

La eficiencia obtenida con la metodología propuesta logra un valor de 66,68 %, que se considera el estándar, mientras la eficiencia real de formulación es de 19,09%, esta última concuerda con la eficiencia real de operación que se obtuvo en el muestreo; en base a esto se puede mencionar que el diseño propuesto presenta mejores condiciones, en este caso se aumentó el volumen, pero siguen estando en proporción con las dimensiones del reactor UASB que antecede el FAFA.

6.4.5 FAFA del municipio de Granada

Los resultados obtenidos en la Tabla 28, fueron obtenidos siguiendo la metodología que se propuso para la presente investigación (Tabla 7), para buscar condiciones similares a la formulación de la PTAR actual construida, se tomó como base el caudal de diseño estimado y algunas dimensiones de la unidad que antecede en este caso el sedimentador primario.

Tabla 28. Resultado de diseño propuesto FAFA Granada

Parámetro	Unidades	Valor
1. Características del agua residual afluyente		
Caudal de diseño	L/s	26,2
DBO ₅	mg/L	121
2. Parámetros hidráulicos		
Tiempo de retención hidráulico	h	4,7
3. Dimensiones		
Volumen útil	m ³	443
Numero de módulos	#	2
Volumen útil por modulo	m ³	221,7
Altura del falso fondo	m	0,2
Altura del borde libre	m	0,25
Altura del lecho	m	2,9
Altura útil	m	3,35
Área superficial del tanque	m ²	66,2
Volumen del lecho filtrante	m ³	191,9
Verificación		
Porcentaje Volumen lecho	%	43,3
Caudal de diseño por modulo	L/s	13,1
TRH volumen útil por modulo	h	4,70
TRH en el medio de soporte	h	4,1
Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d	17,11
Carga orgánica volumétrica	kg/m ³ d	0,71
Velocidad ascensional	m/h	0,71
Volumen lecho plástico RAS	m ³	226,37
Continuación		
Ancho del tanque	m	7,5
Largo del tanque	m	8,8
4. características del lecho filtrante		
Área superficial de contacto	m ² /m ³	100
Área total de contacto	m ²	19188
Volumen unitario de roseta	m ³	0,0012
Porcentaje de vacíos	%	80
Volumen de soporte en el lecho	m ³	154
Cantidad de rosetas	#	159898
5. Eficiencia		
Eficiencia	%	56,87
DBO ₅ efluente TRH lecho	mg/L	52,19

Los parámetros hidráulicos que se estimaron en este caso cumplen con lo que se recomienda; con este diseño se evidencia que la CHS es la que más varía con los cambios de volumen, por lo cual en este caso, dieron unas dimensiones más grandes de lo esperado, sin embargo esto se explica, con que estas unidades en el tren de tratamiento para la PTAR del municipio de Ganada se instalaron como único tratamiento secundario. Las dimensiones obtenidas fueron: ancho de 7,5 m y largo de 8,8 m, que difieren en el ancho con 3,8 m y en el largo con 5,8 m (Tabla 19), a pesar de esto, el modelo que se propone presenta mejores condiciones ya que el actual modelo construido incumple varios parámetros hidráulicos, que en la operación se han visto reflejados en el bajo rendimiento.

6.4.6 FAFA del corregimiento de La Piñuela

Los resultados que se muestran en la Tabla 29 se obtuvieron siguiendo la metodología propuesta, la información de diseño fue difícil de conseguir debido a la poca disposición de las entidades relacionadas con la PTAR, sin embargo, con la poca información lograda se buscó replicar las condiciones básicas de diseño buscando mejorar el cumplimiento de los parámetros hidráulicos.

Tabla 29. Resultado del diseño propuesto FAFA La Piñuela

Parámetro	Unidades	Valor
1.Características del agua residual afluyente		
Caudal de diseño	L/s	2
DBO ₅	mg/L	210
2.Parametros hidráulicos		
Tiempo de retención hidráulico	h	6,5
3.Dimensiones		
Volumen útil	m ³	47
Numero de módulos	#	1
Volumen útil por modulo	m ³	46,8
Altura del falso fondo	m	0,2
Altura del borde libre	m	0,25
Altura del medio filtrante	m	4
Altura útil	m	4,45
Área superficial	m ²	10,5
Volumen del lecho filtrante	m ³	42,1
Verificación		
Porcentaje Volumen lecho	%	89,9
Caudal de diseño por modulo	L/s	2
TRH volumen útil por modulo	h	6,50
TRH en el lecho	h	5,8

Carga hidráulica superficial	$\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$	16,43
Carga orgánica volumétrica	$\text{kg}/\text{m}^3\text{d}$	0,86
Velocidad ascensional	m/h	0,68
Volumen lecho plástico RAS	m^3	34,56
Continuación		
Ancho del tanque	m	2
Largo del tanque	m	5,3
4. Características del lecho filtrante		
Área superficial de contacto	m^2/m^3	100
Área total de contacto	m^2	4207
Volumen unitario de roseta	m^3	0,0012
Porcentaje de vacíos	%	80
Volumen de soporte	m^3	34
Cantidad de rosetas	#	35056
5. Eficiencia		
Eficiencia lecho	%	64,01
DBO_5 efluente TRH lecho	mg/L	75,58

En el caso del filtro anaerobio de flujo ascendente que se tiene construido, se encontró según la Tabla 23, que ninguno de los parámetros hidráulicos, cumplen con lo establecido. El TRH es de 2,59 h, la velocidad de flujo ascendente es de 1,48 m/s, la CHS es de 35,63 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ y la COV es de 7,48 $\text{kg}/\text{m}^3\text{d}$. Con el diseño propuesto se logró cumplir con todos los parámetros hidráulicos, alcanzando un volumen que sigue conservando la proporción con el reactor UASB que lo precede. Los resultados hallados fueron un TRH por módulo de 6,5 h, una CHS de 16,43 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$, una COV de 0,86 $\text{kg}/\text{m}^3\text{d}$ y una velocidad ascensional de 0,68 h. Finalmente se logra una eficiencia de 64,01% para unas dimensiones obtenidas de ancho 2 m y largo 5,3 m, que difieren con el ancho de 2,03 m y 4,30 m del diseño original construido.

7. CONCLUSIONES

- La indagación y el acceso a la información respecto a la guía en el diseño de los filtros anaerobios de flujo ascendente son insuficientes, aun sabiendo que este tipo de tecnología para el tratamiento de las aguas residuales, es un modelo usado frecuentemente en Colombia para el tratamiento de aguas residuales domésticas.
- Los FAFA construidos en los trenes de tratamiento de las PTAR de estudio, cumplen con el TRH en las PTAR de los municipios de San Vicente y Santo Domingo, a pesar de esto, ninguno de los filtros analizados cumple con los demás parámetros hidráulicos de diseño (CHS, COV y velocidad ascensional), debido a esto, presentan un bajo rendimiento, y por ende se traduce en problemas operativos.
- El diseño de los FAFA se afronta desde una perspectiva muy superficial, pues las metodologías encontradas consideran aspectos muy básicos; el aditamento logrado presenta mayor información, además de que consiguió obtener buenas eficiencias, cumpliendo con todos los parámetros hidráulicos de control para los filtros anaerobios de todas las PTAR de estudio.
- La eficiencia depende directamente del TRH, siendo este el parámetro fundamental en el diseño de los FAFA, en muchas ocasiones estos valores sobrepasan lo que en teoría pueden alcanzar, además de esto el cumplimiento de los demás parámetros hidráulicos es omitido.
- Con relación a lo anterior, a pesar de tener un diseño adecuado en base a lo recomendado, las problemáticas constructivas pueden tener mucha influencia en que los filtros anaerobios no se desempeñen adecuadamente, por esto es importante mantener el medio de soporte en su lugar.
- Se identificó que los FAFA de las PTAR de estudio no alcanzan a tener un aporte considerable en la remoción de contaminantes del agua residual, relacionado con los bajos TRH utilizados en los diseños, por lo cual son las unidades que anteceden quienes realizan todo el trabajo.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía municipal de Cocorná. (2015). *Ajuste esquema de ordenamiento territorial*.
- Alcaldía municipal de San Francisco. (2019). *Plan de desarrollo "unidos por el cambio San Francisco* (p. 228).
- Alvarado, A. (2011). *Evaluación de materiales de desecho como medio filtrante en filtros anaerobios de flujo ascendente*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Batero, Y., & Cruz, E. (2007). *Evaluación de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA) con medio de soporte en guadua para la remoción de materia orgánica de un agua residual sintética*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Chernicharo, C. A. (2007). *Biological Wastewater Treatment series*. IWA Publishing.
- Comisión Nacional de Aguas. (2019). *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: filtros anaerobios de flujo ascendente* (p. 57).
- Concejo municipal San Vicente de Ferrer. (2017). *PBOT* (p. 369). <https://acortar.link/AMgPC>
- Córdova, R., Riera, M., Ronquillo, S., & Rodríguez, J. (2019). Evaluación de la arrancada de filtros anaerobios para el tratamiento de aguas residuales de café instantáneo. *CENIC Ciencia y Biología*, 50(1), 40 a 50.
- CORNARE, & Gobernación de Antioquia. (2011a). Evaluación y Zonificación de Riesgos por avenida torrencial inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de San Vicente de Ferrer. In 2012 (p. 113). CORNARE.
- CORNARE, & Gobernación de Antioquia. (2011b). *Evaluación y Zonificación de Riesgos por avenida torrencial inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de Santo Domingo*.
- CORNARE, & Gobernación de Antioquia. (2012a). *Evaluación y Zonificación de Riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de Ganada*.
- CORNARE, & Gobernación de Antioquia. (2012b). *Evaluación y Zonificación de Riesgos por avenida torrencial y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de San Francisco*.
- CORNARE, & Gobernación de Antioquia. (2012c). *Zonificación de riesgo por movimientos en masa inundación y avenidas torrenciales del municipio de San Luis*.
- DANE. (2005). *Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV)*.
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV)*.
- Dias, I., Ribeiro, A., Santos, A., Alves, L., & Mendes, M. (2017). Pós-tratamiento de efluentes de reactor UASB em escala real. *IV Congreso Nacional Educacao CONEDU*, 6.
- Diaz, M., Espitia, S., & Molina, F. (2002). *Digestión Anaerobia: Una aproximación a la tecnología* (Universidad Nacional de Colombia (ed.)).
- Drapcho, C., Nghiem, N., & Walker, T. (2020). *Biofuels Engineering Process Technology* (2nd ed.). McGraw-HILL Education.
- Galindo, A., Toncel, E., & Rincón, N. (2016). Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte. *UIS Universidad Industrial de Santander*, 29, 39–50.
- Goncalves, R., Andrade, C., Alem, S., Takayuk, M., & Ribiro da Carta, R. (2001). Post-tratamiento de efluentes de reactores anaerobios para reactores con biofilm. *PROSAB: Programa de Pesquisas Em Saneamento Básico*, 554.
- Laboratorio de análisis de aguas. (2014). *Sistema de gestión integral de CORNARE* (p. 21).
- Loosdrecht, M., Eikelboom, D., Gjaltema, A., Mulder, A., Tijhuis, L., & Heijnen, J. (1995).

- Biofilm structures. *Water Science and Technology*, 32(8), 35.
- López, C., Méndez, G., García, H., & Cervantes, F. (2008). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principio, modelación y diseño* (1st ed.). IWA Publishing.
- Metcalf, R., & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización* (3rd ed.). McGRAW-HILL Interamericana.
- Miki, M. (2010). Dilemas do UASB. *DAE*, 183(1504), 25–37.
- Reglamento tecnico del sector de agua potable y saneamiento basico, 150 (2000).
- Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, Pub. L. No. 0330, 182 (2017).
- Molina, F., Gonzales, E., & Gonzales, L. (2001). Evaluación microbiologica de un lodo durante un proceso de mejoramiento aplicando la técnica de lavado (presión selectiva). *Facultad de Ingeniería: Universidad de Antioquia*, 23, 20–27.
- Montoya, H. (2013). *Microbiología básica para el área de la salud y afines* (2nd ed.). Editorial Universidad de Antioquia.
- Orozco Jaramillo, A. (2014). *Bioingenieria de aguas residuales: teoría y diseño* (ACODAL (ed.); 2nd ed.).
- Padilla, E. (2010). *Evaluación de un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente para tratar agua residual de rastro*. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnologia del Estado de Jalisco.
- Qasim, S., & Zhu, G. (2018). *Wastewater Treatment and Reuse: Theory and Desing Examples* (1st ed.). Taylor & Francis Group.
- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales* (2nd ed.). UK: Reverte.
- Ramírez, L., Londoño, S., & Molina Pérez, F. (2021). *Informe de resultados: diagnostico PTAR La Pinuela* (p. 57).
- Rittman, B., & McCarty, P. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications* (2nd ed.). McGraw-HILL Education.
- Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales: teoria y principios de diseño* (3rd ed.). Escuela Colombiana de Ingenieria.
- Sperling, M. (1996). *Principios básicos do tratamento de esgotos* (2nd ed.). Universidade Federal de Minas Gerais.
- Sperling, M., & Chernicharo, C. A. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. IWA Publishing.
- Torres, P. (2012). Perspectiva del tratamiento anaerobio de aguas residuales domesticas en países en desarrollo. *EIA: Escuela de Ingeniería de Antioquia, 1794–1237*, 115–129.
- Vasquez Ruiz, L., Vargas Sampedro, J., Rodríguez, D. C., & Molina Pérez, F. (2020). *Informe diagnostico PTAR Buenos Aires - San Luis - Antioquia* (p. 39).
- Water Environment Federation. (2017). *Desing of Water Resource Recovery Facilities* (8th ed.). McGraw-HILL Education.
- Young, J. (1991). Factors affecting the desing and performance of upflow anaerobic filters. *Water Science and Tecnology*, 24(8), 133–155.