

Comparación técnica, económica y ambiental de dos trenes tecnológicos para el tratamiento de las aguas residuales de los asentamientos no planificados “Miradores de la UIS”, “El Porvenir” y “Santos Bajo” en la ciudad de Bucaramanga, Colombia

Aider Ferney Vega Ordoñez, Brandon Esteban Mayorga Betancur

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD in Agriculture, Food and Rural Development - emphasis in Water management

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Doctor en Ingeniería, énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

**Dedicatoria**

A todos aquellos que aman la ingeniería.

### **Agradecimientos**

A nuestros padres y amigos sin ellos esto no hubiera sido posible.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
Antecedentes .....	14
1. Marco teórico .....	15
2. Objetivos .....	17
2.1 Objetivo General .....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Metodología .....	18
3.1 Etapa I: Caracterización de las variables requeridas para el predimensionamiento de los trenes de tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio .....	19
3.2 Etapa II: Predimensionamiento de las unidades que conforman los trenes de tratamiento de aguas residuales propuestos .....	20
3.2.1 Reactor UASB .....	21
3.2.2 Filtro percolador.....	26
3.2.3 Filtro anaerobio de flujo ascendente .....	30
3.2.4 Tanque de Contacto .....	33
3.3 Etapa III: Evaluación de los aspectos técnicos, ambientales y económicos de los trenes propuestos en el contexto de estudio .....	38
3.3.1 Aspectos técnicos.....	38
3.3.2 Aspectos de afectación ambiental.....	39
3.3.3 Aspectos económicos.....	40

4. Resultados y discusión.....	41
4.1 Etapa I: Caracterización de las variables requeridas para el predimensionamiento de los trenes de tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio. ....	41
4.2 Etapa II: Predimensionamiento de las unidades que conforman los trenes de tratamiento de aguas residuales propuestos.....	46
4.2.1 Reactor UASB.....	46
4.2.2 Filtro percolador.....	50
4.2.3 Filtro anaerobio de flujo ascendente.....	52
4.2.4 Tanque de contacto.....	54
4.3 Etapa III: Evaluación de los aspectos técnicos, ambientales y económicos de los trenes propuestos en el contexto de estudio.....	59
4.3.1 Aspectos técnicos.....	59
4.3.2 Aspectos ambientales.....	62
4.3.2.1 Índice de afectación ambiental.....	62
4.3.2.2 Potencial de reúso del biosólido.....	63
4.3.2.3 Recuperación de energía.....	63
4.3.2.4 Potencial de reúso del agua tratada.....	64
4.3.3 Aspectos económicos.....	65
5. Conclusiones.....	68
6. Limitaciones y recomendaciones.....	70
Referencias Bibliográficas.....	71

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Características de diseño para filtros percoladores con filtro plástico.....	29
Tabla 2 Propiedades físicas del medio filtrante tipo plástico para filtros percoladores.....	30
Tabla 3 Criterios de diseño para filtros anaerobios .....	33
Tabla 4 Caracterización del agua residual .....	42
Tabla 5 Parámetros fisicoquímicos y sus valores limite máximos permisibles en los vertimientos puntúales de Aguas Residuales Domésticas – ARD.....	44
Tabla 6 Tabla resumen Reactor UASB.....	46
Tabla 7 Resumen de los cálculos realizados para predimensionamiento de filtro percolador .....	50
Tabla 8 Parámetros y dimensiones calculadas de filtro anaerobio .....	52
Tabla 9 Tabla resumen Tanque de contacto .....	54
Tabla 10 Consumo energético por unidad .....	61
Tabla 11 Comparación técnica de los trenes de tratamiento de agua residual doméstica .....	62
Tabla 12 Índice de afectación ambiental .....	62
Tabla 13 Comparación m <sup>3</sup> de concreto y costos de construcción en trenes de tratamiento .....	65
Tabla 14 Comparación económica de los trenes de tratamiento.....	66

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Diagrama del proceso metodológico .....	18
Figura 2 Distribución de los habitantes actuales y proyectados por asentamiento.....	42
Figura 3 Vista frontal reactor UASB .....	49
Figura 4 Vista 3D reactor UASB .....	50
Figura 5 Vista frontal del filtro anaerobio .....	51
Figura 6 Vista 3D del filtro percolador.....	52
Figura 7 Vista frontal del filtro anaerobio .....	53
Figura 8 Vista 3D del filtro anaerobio .....	54
Figura 9 Tabla resumen Tanque de contacto .....	57
Figura 10 Vista 3D floculador hidráulico de flujo horizontal.....	57
Figura 11 Vista 3D modelo tren de tratamiento uno.....	58
Figura 12 Vista 3D tren de tratamiento dos .....	58

## Glosario

**Agua residual:** agua que procede de viviendas, poblaciones o zonas industriales y su calidad ha sido alterada por intervención humana

**Asentamiento:** lugar donde se establece una persona o una comunidad

**Indicador:** característica específica, observable y medible generalmente utilizada para evidenciar alteraciones, resultados y cualidades

## Resumen

**Título:** Comparación técnica, económica y ambiental de dos trenes tecnológicos para el tratamiento de las aguas residuales de los asentamientos no planificados “Miradores de la UIS”, “El Porvenir” y “Santos Bajo” en la ciudad de Bucaramanga, Colombia

**Autor:** Aider Ferney Vega Ordóñez y Brandon Esteban Mayorga Betancur\*\*

**Palabras Clave:** Mínimo tres, máximo ocho separadas por comas

**Descripción:** En los asentamientos no planificados el aumento de la población y el incremento del consumo de agua generan grandes problemas con la eliminación de aguas residuales domésticas. Estas aguas, en muchos casos, se vierten directamente en áreas abiertas o en los cuerpos hídricos cercanos. Esto expone a los habitantes a riesgos de salud debido a la contaminación del agua. Es por eso que la presente investigación tuvo como objetivo comparar técnica, económica y ambientalmente dos trenes tecnológicos para el tratamiento de las aguas residuales de los asentamientos no planificados “Miradores de la UIS”, “El Porvenir” y “Santos Bajo” en la ciudad de Bucaramanga, Colombia. La metodología para la realización del proyecto se dividió en tres etapas. Primero, se caracterizaron las variables requeridas para el predimensionamiento de los trenes de tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio; segundo, se predimensionaron las unidades que conforman los trenes de tratamiento de aguas residuales propuestos; tercero, se evaluaron los aspectos técnicos, ambientales y económicos de los trenes propuestos en el contexto de estudio. El tren uno está compuesto por: reactor UASB, filtro percolador y tanque de contacto de cloro, mientras que el tren dos está compuesto por reactor UASB, filtro anaerobio de flujo ascendente y tanque de contacto de cloro. Al comparar los aspectos técnicos se observó que el consumo energético del tren de tratamiento uno es mayor entre 0.5 a 1.5 KW/hab.año que el del tren dos. Al comparar los aspectos de afectación ambiental (malos olores, aerosoles, insectos y ruidos) se observó que tanto el tren uno como el tren dos poseen un valor medio de afectación. Al comparar los aspectos económicos se observó que los valores del Capital expenditures (CAPEX) y operating expenses or expenditure (OPEX) fueron mayores en el tren de tratamiento uno, mientras que en el caso del valor del CAPEX calculado en el proyecto fue mayor en el tren de tratamiento dos. Finalmente, el desarrollo de esta investigación aporta información valiosa para la toma de decisiones en la selección de una planta de tratamiento descentralizada para las aguas residuales domésticas de los asentamientos no planificados de la zona de estudio que contribuya a

---

\*\* Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera. PhD in Agriculture, Food and Rural Development - emphasis in Water management. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña.

el mejoramiento en la calidad de vida de los habitantes de la zona, de igual forma en una reducción en la carga contaminante del Río Suratá.

### Abstract

**Title: Technical, economic and environmental comparison of two wastewater treatment for the unplanned settlements “Miradores de la UIS”, “El Porvenir” and “Santos Bajo” in the city of Bucaramanga, Colombia\***

**Author(s): Aider Ferney Vega Ordóñez y Brandon Esteban Mayorga Betancur \*\***

**Key Words:** wastewater, treatment, unplanned settlements, economical, technical, environmental

**Description:** In unplanned settlements, population growth and increased water consumption create major problems with domestic wastewater disposal. These waters, in many cases, are discharged directly into open areas or into nearby water bodies. This exposes residents to health risks due to water contamination. The present research aims to compare technically, economically and environmentally two technological trains for the treatment of wastewater from the unplanned settlements “Miradores de la UIS”, “El Porvenir” and “Santos Bajo” in the city of Bucaramanga, Colombia. Project methodology was divided into three stages. First, the variables required for the pre-sizing of the wastewater treatment trains in the study area were characterized; second, the units that make up the proposed wastewater treatment trains were pre-sized; Third, the technical, environmental and economic aspects of the proposed trains in the study context were evaluated. Train one is composed of: UASB reactor, trickling filter and chlorine contact tank, while train two is composed of UASB reactor, anaerobic filter and chlorine contact tank. When comparing the technical aspects, it was observed that the energy consumption of treatment train one is greater between 0.5 to 1.5 KW/inhabitant.year than train two. When comparing the aspects of environmental impact (bad odors, aerosols, insects and noise) it was observed that both train one and train two have an average impact value. When comparing the economic aspects, it was observed that the values of Capital expenditures (CAPEX) and operating expenses or expenditure (OPEX) were higher in treatment train one, while in the case of the CAPEX value calculated in

---

\* Degree Work

\*\*Physic-mechanic Engineering Faculty. Civil Engineering School. Civil Engineering. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera. PhD in Agriculture, Food and Rural Development - emphasis in Water management. Co-director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Doctor en ingeniería énfasis en ingeniería sanitaria y ambiental.

the project was higher in treatment train two. Finally, the development of this research provides valuable information for decision-making in the selection of a decentralized treatment plant for domestic wastewater from unplanned settlements in the study area, contributing to the improvement in the life quality of the inhabitants of the area, as well as a reduction in the polluting load of the Suratá River.

### **Introducción**

La urbanización es una de las tendencias demográficas más importantes del siglo XXI, y el crecimiento es más rápido en los países de escasos recursos (United Nations, 2021). La mayor parte del crecimiento urbano está asociado a la rápida expansión de los centros urbanos más pequeños y de los desarrollos periurbanos. Gran parte de este crecimiento no está planificado y es informal, agravado por la poca capacidad reguladora de las autoridades gubernamentales, particularmente en esas áreas (Parkinson & Tayler, 2003). Los asentamientos no planificados se caracterizan en su mayoría por encontrarse en las periferias de las ciudades y en zonas con topografía compleja lo que dificulta la conexión de los sistemas de recolección de aguas residuales a los alcantarillados municipales. Esta combinación de factores provoca que, por lo general, las aguas residuales domésticas sean descargadas sin tratamiento a las fuentes hídricas superficiales cercanas (Parkinson & Tayler, 2003).

Según Zuluaga et al. (2019), Colombia se ve afectada por el fenómeno de los asentamientos no planificados debido a la desigualdad social presente en el país. En estos asentamientos con frecuencia los servicios básicos domiciliarios son deficientes. Tal es el caso de los asentamientos Miradores de la UIS, El Porvenir y Santos Bajo, ubicados en la ciudad de Bucaramanga, que no cuentan con conexiones al sistema de alcantarillado de la ciudad y vierten las aguas residuales sin tratamiento directamente al río Suratá, generando un alto impacto ambiental

Esta investigación nace de la necesidad de abordar la problemática del tratamiento de las aguas residuales domésticas en el contexto de los asentamientos no planificados: Miradores de la UIS, El Porvenir y Santos Bajo, en la ciudad de Bucaramanga, Colombia.

El propósito de esta investigación fue comparar técnica, económica y ambientalmente dos trenes tecnológicos para el tratamiento de las aguas residuales de estos asentamientos no planificados. Por lo tanto, se evaluaron un tren compuesto por un reactor UASB como tratamiento primario, un filtro percolador como tratamiento secundario y con cloración como método de desinfección, mientras que el segundo tren consistió en un reactor UASB como tratamiento primario, un filtro anaeróbico como tratamiento secundario y con cloración como método de desinfección, los cuales son propuestos por el proyecto “Desarrollo de estrategias para el manejo de aguas residuales en asentamientos periurbanos, con enfoques de sostenibilidad y economía circular, en la cuenca del río Alto Lebrija” adelantado por el grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Para desarrollar la investigación se plantearon tres objetivos específicos y en base a estos se dividió el proyecto en tres etapas: i) Caracterización de las variables requeridas para el predimensionamiento de los trenes de tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio; ii) Predimensionamiento de las unidades que conforman los trenes de tratamiento de aguas residuales propuestos; y iii) Evaluación de los aspectos técnicos, ambientales y económicos de los trenes propuestos en el contexto de estudio.

Finalmente, esta investigación aborda la problemática de las aguas residuales domésticas en los asentamientos Mirador de la UIS, El Porvenir y Santos Bajo, con el propósito de darle herramientas a la comunidad y a los entes interesados para que seleccionen el tren de tratamiento

que mejor se adapte a sus necesidades basados en las comparaciones de los aspectos técnicos, ambientales y económicos realizadas.

### **Antecedentes**

En años recientes, se ha incrementado la investigación sobre el diseño de plantas de tratamiento de agua residuales en asentamientos no planificados y la utilización de los recursos extraídos de las aguas servidas. Como muestra de ello, en India, Dasgupta et al. (2023), realizaron un trabajo para demostrar que los sistemas de tratamiento de aguas residuales in situ son técnicamente factibles en asentamientos no planificados. En Sudáfrica, se examinó el tratamiento de aguas negras y grises por medio de humedales artificiales (Davy et al., 2023) en un asentamiento informal en la ciudad de Johannesburgo. Por otra parte, en Uganda, se exploró la eficiencia de la eliminación de aguas residuales por medio de pozos sépticos y su efecto en la contaminación de fuentes de agua potable cercanas (Kagwisagye & Gill, 2011). Asimismo, en Indonesia, se identificaron sectores prioritarios para el desarrollo de un sistema descentralizado de tratamiento de agua potable que optimice la gestión de las aguas residuales (Sakti et al., 2023).

### **1. Marco teórico**

En las economías emergentes, las ciudades a menudo se convierten en centros de asentamientos no planificados que aumentan cerca de los drenajes de aguas pluviales. Estos asentamientos crean una problemática sobre la infraestructura existente y plantean un desafío para las entidades ambientales encargadas de garantizar una calidad adecuada del flujo de salida según las normas de descarga ambiental (Dasgupta et al., 2023). Estos asentamientos no planificados se definen según Skinner et al. (2014) como áreas o zonas que poseen una o más de estas características: mala calidad de la estructura de la vivienda, superpoblación, acceso inadecuado a agua potable, acceso inadecuado al saneamiento, situación residencial insegura.

Las aguas residuales domésticas son las aguas residuales de origen residencial y comercial que contienen residuos provenientes de actividades humanas como aguas del lavado de utensilios de cocina, aguas de lavadoras, aguas de baño y aguas negras como consecuencia del metabolismo humano (Mendoza & Restrepo, 2019). Existen dos grandes estructuras que intervienen en el manejo de aguas residuales: el alcantarillado y la planta de tratamiento de agua residual. El alcantarillado se define como conductos cerrados que se colocan en casas, bajo calles y vías, con el propósito de llevar las aguas residuales fuera del alcance de los habitantes de la zona de prestación del servicio (Wilderer, 2005). Por otro lado, las plantas de tratamiento de agua residual tienen la misión de retirar material contaminante, ya sea orgánico e inorgánico, el cual se puede encontrar en forma de partículas suspendidas y disueltas, en algunos casos ambas, principalmente para mejorar la calidad del agua basada en la normativa de descarga o para ser reutilizarse a futuro (Rodríguez et al., 2015). En los asentamientos no planificados, el aumento de la población,

combinado con el aumento del consumo de agua crean problemas generalizados de eliminación de aguas residuales (Parkinson & Tayler, 2003).

En muchos casos, en los asentamientos no planificados las aguas residuales son descargadas localmente en terrenos abiertos y baldíos, creando depósitos de agua estancada. Los niños y otras personas pueden entrar en contacto con agua contaminada, los riesgos para la salud aumentan por el hecho de que los sistemas de drenaje de aguas domésticas y superficiales se combinan invariablemente, los mosquitos y otras plagas se reproducen en desagües y estanques bloqueados propagando enfermedades. La falta de infraestructura y de sistemas eficaces de gestión de las aguas residuales ha dado lugar a una contaminación generalizada de las aguas superficiales y subterráneas y a un deterioro de las condiciones de salud ambiental (Parkinson & Tayler, 2003).

Este proyecto compara técnica, económica y ambientalmente, las diferentes alternativas de trenes tecnológicos. Con ayuda de esta comparación se tendrán los criterios, fundamentos y bases para elegir la opción más conveniente, brindando una solución a la problemática del vertimiento de aguas residuales domésticas (Escobar & Enrique, 2017). Además, un proyecto, como una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales descentralizada, se edifica con la apropiación por parte de los usuarios, así al momento de crearse una intervención en pro del mejoramiento de cada aspecto (social, ambiental, técnico y económico), se consolida la sostenibilidad del proyecto (Dávalos & Ibañez, 2018).

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Comparar técnica, económica y ambientalmente dos trenes tecnológicos para el tratamiento de las aguas residuales de los asentamientos no planificados “Miradores de la UIS”, “El Porvenir” y “Santos Bajo” en la ciudad de Bucaramanga, Colombia.

### **2.2 Objetivos Específicos**

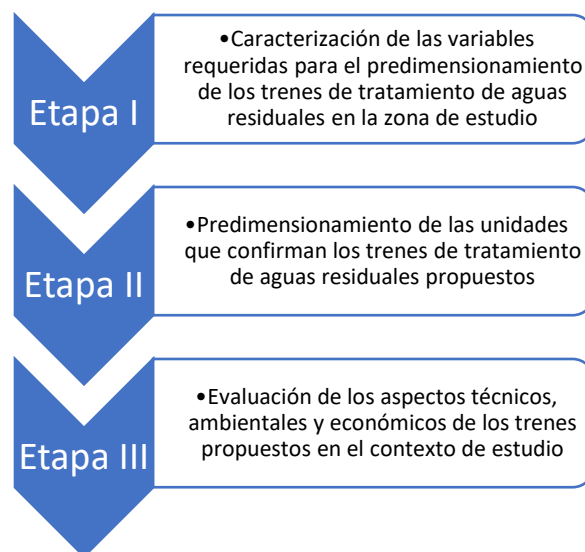
- Caracterizar las variables requeridas para el predimensionamiento de los trenes de tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio.
- Predimensionar las unidades tecnológicas que conforman los trenes de tratamiento de aguas residuales propuestos.
- Evaluar los aspectos técnicos, ambientales y económicos de los trenes propuestos en el contexto de estudio.

### 3. Metodología

Esta investigación se desarrolló en el marco del proyecto “Desarrollo de estrategias para el manejo de aguas residuales en asentamientos periurbanos, con enfoques de sostenibilidad y economía circular, en la cuenca del río Alto Lebrija” adelantado por el grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), en donde se enmarcan tres asentamientos no planificados ubicados en el área metropolitana de Bucaramanga (AMB): Miradores de la UIS, Porvenir y Santos Bajo, los cuales están ubicados en la parte noreste de la ciudad. El estudio se dividió en tres fases como se muestra en la Figura 1 y se describe a continuación.

#### Figura 1

*Diagrama del proceso metodológico*



### **3.1 Etapa I: Caracterización de las variables requeridas para el predimensionamiento de los trenes de tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio**

La caracterización detallada de las aguas residuales que se producen en los asentamientos, el censo poblacional, delimitación del asentamiento y el caudal fueron suministrados por el grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), producto del proyecto “Desarrollo de estrategias para el manejo de aguas residuales en asentamientos periurbanos, con enfoques de sostenibilidad y economía circular, en la cuenca del río Alto Lebrija”. Con los datos proporcionados se preparó una tabla con todos los parámetros requeridos para el predimensionamiento de las diferentes unidades de los trenes propuestos. Además, se realizaron los cálculos de caudales de diseño, caudal máximo horario, caudal máximo diario y caudal máximo mensual. Estos cálculos se hicieron siguiendo los lineamientos de la Resolución 0330 del 2017, sección 1, artículo 134, en donde se indican las variables a tener en cuenta para determinar el caudal medio de diseño; se usaron los valores de factor máximo horario, diario y mensual hallados en el artículo 166, Tabla 23, para calcular los caudales máximos horario, diario y mensual necesarios para el predimensionamiento de las unidades.

Según la información encontrada en el Acuerdo 011 del 2014 “Por el cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial de segunda generación del Municipio de Bucaramanga 2014-2027”, la zona en la que se establecieron los asentamientos es un predio rural. Para obtener los requerimientos de calidad de los efluentes de los sistemas de tratamiento para descargas superficiales y subsuperficiales se investigó en la página web de la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y se encontró que según la Resolución 631 del 2015 del

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en el artículo 8, se presentan los parámetros fisicoquímicos y sus valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas – ARD de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las Aguas Residuales no Domésticas – ARnD de los prestadores del servicio público de alcantarillado.

El cálculo de la población futura se hizo a partir de datos de la dinámica de crecimiento de la población en el período comprendido entre el 2010 y el 2023, obtenidos de talleres comunitarios realizados como parte del proyecto “Desarrollo de estrategias para el manejo de aguas residuales en asentamientos periurbanos, con enfoques de sostenibilidad y economía circular, en la cuenca del río Alto Lebríja”. Con estos datos se utilizó el método aritmético para proyectar la población a un periodo de diseño de 25 años, según recomendaciones de la Resolución 330 del 2017.

### **3.2 Etapa II: Predimensionamiento de las unidades que conforman los trenes de tratamiento de aguas residuales propuestos**

La investigación realizada en este proyecto y estudios previos del grupo GPH (UIS & AMB, 2023) ha identificado que, para las condiciones de la zona de estudio, dos sistemas de tratamiento descentralizado con potencial de aplicación serían: uno compuesto por un reactor UASB, filtro percolador, cloración y otro tren de tratamiento compuesto por reactor UASB, filtro anaerobio de flujo ascendente y cloración. Las condiciones de la zona y las características de las unidades que conforman estos dos trenes hacen que estas dos configuraciones sean las adecuadas para implementar una planta de tratamiento de aguas residuales en el lugar de estudio.

En esta etapa de la metodología se dimensionaron las unidades que conforman los trenes de tratamiento de agua residual doméstica planteados, en esta no se tuvieron en cuenta el predimensionamiento de unidades de pretratamiento, ya que, aunque son de necesarias en

cualquier planta de tratamiento de aguas residuales, el predimensionamiento de estas unidades no se encuentran dentro de los alcances de esta investigación.

### **3.2.1 Reactor UASB**

Con la información recopilada en la Fase I, asociada a las características del agua residual, y siguiendo el procedimiento propuesto por Chernicharo (2022), se realizaron los cálculos que se describen a continuación:

**Dimensión del módulo del reactor UASB.** Para realizar el cálculo del volumen del reactor se usó la ecuación (1) y se tomó un Tiempo de retención hidráulica dado por la Resolución 330 del 2017, debido a que la temperatura del agua residual se encuentra entre 20 a 26 °C se tomó un valor del rango entre 6 a 9h, para este caso fue de 7.4h esto para cumplir de manera satisfactoria con la resolución mencionada.

$$V_{REACTOR} = Q * TRH \quad (1)$$

Donde:

Vreactor: volumen del reactor [m<sup>3</sup>]

Q: caudal máximo mensual [m<sup>3</sup>/h]

TRH: Tiempo de retención hidráulico [h]

Profundidad: La profundidad de cada módulo según la Resolución 330 del 2017 debía encontrarse entre 4.5 y 6 metros.

**Verificación de cargas aplicadas en el afluente.** Para realizar el cálculo de la carga afluente de DQO, Carga hidráulica volumétrica y carga orgánica volumétrica que ingresa al reactor UASB se usaron las ecuaciones (2), (3) y (4) respectivamente.

Carga DQO en afluente promedio:

$$Carga\ DQO = DQO * Q \quad (2)$$

Donde:

DQO: Demanda química de oxígeno [kg/m<sup>3</sup>]

Q: Caudal máximo mensual [m<sup>3</sup>/h]

Carga hidráulica volumétrica:

$$CHV = \frac{Q}{V_{reactor}} \quad (3)$$

Donde:

CHV: Carga hidráulica volumétrica [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>\*h]

Q: Caudal máximo mensual [m<sup>3</sup>/h]

V<sub>reactor</sub>: Volumen del reactor [m<sup>3</sup>]

Carga orgánica volumétrica

$$COV = \frac{Q * DQO}{V_{reactor}} \quad (4)$$

Donde:

COV: Carga orgánica volumétrica [kgDQO/m<sup>3</sup>\*h]

DQO: Demanda química de oxígeno [kg/m<sup>3</sup>]

Q: Caudal máximo mensual [m<sup>3</sup>/h]

V<sub>reactor</sub>: Volumen del reactor [m<sup>3</sup>]

**Eficiencia de remoción.** Para realizar el cálculo de la eficiencia de remoción tanto de DQO como de DBO del reactor se utilizaron las ecuaciones (5) y (6) respectivamente.

Eficiencia de remoción DBO

$$EDBO = 100 * (1 - 0.68 * TRH^{-0.35}) \quad (5)$$

Donde:

EDBO: Eficiencia de remoción de DBO [%]

TRH: Tiempo de retención hidráulico [h]

Eficiencia de remoción DQO

$$EDQO = 100 * (1 - 0.70 * TRH^{-0.5}) \quad (6)$$

Donde:

EDQO: Eficiencia de remoción de DQO [%]

TRH: Tiempo de retención hidráulico [h]

Para hallar la estimación de concentración DBO en efluente final se usó la ecuación (7)

$$C_e = DBO - \frac{EDBO * DBO}{100} \quad (7)$$

Donde:

Ce: Estimación de concentración de DBO en efluente final [mgDQO/l]

DBO: Demanda química de oxígeno [kg/m<sup>3</sup>]

EDBO: eficiencia de remoción DQO [%]

**Producción teórica de metano.** Para realizar el cálculo de la producción teórica de metano presente en el reactor UASB se usó la ecuación (8)

$$DQO_{CH_4} = Q * (DQO - C_e) - 0.21 * DQO \quad (8)$$

Donde:

DQO<sub>CH<sub>4</sub></sub>: Producción teórica de metano [KgDQO/h]

Q: Caudal máximo mensual [m<sup>3</sup>/h]

DQO: Demanda química de oxígeno [kg/m<sup>3</sup>]

Ce: Estimación de concentración de DBO en efluente final [mgDQO/l]

**Producción volumétrica de metano.** Para realizar el cálculo de la producción volumétrica de metano presente en el reactor UASB se usó la ecuación (9)

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{P * 64} \quad (9)$$

$$\frac{0.0826 * (273 + Temp)}$$

Donde:

Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>: Producción volumétrica de metano [m<sup>3</sup>/h]

DQO<sub>CH<sub>4</sub></sub>: Producción teórica de metano [KgDQO/h]

P: Presión atmosférica de zona de estudio [atm]

Temp: Temperatura zona de estudio. [°C]

**Producción del Biogás.** Para realizar el cálculo de la producción del biogás presente en el reactor UASB se usó la ecuación (10)

$$Q_g = \frac{Q_{CH_4}}{0.7} * \frac{1000l}{1m^3} \quad (10)$$

Donde:

Qg: Producción del Biogás: [l/h]

QCH<sub>4</sub>: Producción volumétrica de metano [m<sup>3</sup>/h]

**Velocidad de flujo ascendente.** Para realizar el cálculo de la velocidad de flujo ascendente presente en el reactor UASB se usó la ecuación (11)

Velocidad de flujo ascendente:

$$Velocidad_{flujo\ ascendente} = \frac{Q}{A_{reactor}} \quad (11)$$

Donde:

A<sub>reactor</sub>: Área del reactor [m<sup>2</sup>]

Q: Caudal medio mensual, caudal máximo diario o caudal pico temporal [m<sup>3</sup>/h]

**Sistema de distribución.** El sistema de distribución es el encargado de conducir el afluente de las aguas residuales domésticas adentro del reactor UASB y se calculó con las ecuaciones 12 a 16.

Numero de distribuidores en el reactor:

$$\#Distribuidores = \frac{Área\ reactor\ [m^2]}{Área\ de\ influencia\ [m^2]} \quad (12)$$

Numero de distribuidores por módulo:

$$\#Distribuidores\ modulo = \frac{\#Distribuidores}{\#Modulo} \quad (13)$$

Numero de tuberías por módulo:

$$\#Tuberías = \sqrt{\#Distribuidores\ modulo} \quad (14)$$

Numero de distribuidores tubería por módulo

$$\#distribu\ x\ tub = \sqrt{\#Distribuidores\ modulo} \quad (15)$$

Separación tuberías y distribuidores (S):

$$S = \frac{\text{largo [m]}}{\# \text{ tuberías} + 1} \quad (16)$$

**Dimensionamiento colector de gas.** Las medidas buscadas para el colector de gas fueron longitud y ancho. En el caso de la longitud del colector esta se tomó como la misma medida del largo del reactor, esto se hace necesario para que el colector recolecte gas a lo largo del módulo reactor. El Ancho superior del colector se tomó según criterios de diseño de Chernicharo (2022). Para realizar el cálculo del área se usó la ecuación (17).

$$\text{Áreacolector} = \text{Long}_{\text{colector}}[\text{m}] * \text{Ancho}_{\text{colector}}[\text{m}] \quad (17)$$

**Dimensionamiento de las aberturas del compartimiento del sedimentador.**

Número de aberturas:

El número de aberturas se tomó según lineamientos de diseño del autor propuesto por Chernicharo (2022).

Ancho de aberturas:

Se tomó considerando el cumplimiento de los rangos de las velocidades de entrada al sedimentador recomendadas por Chernicharo (2022).

Área de aberturas: Para el cálculo del área de las aberturas se usó la ecuación (18)

$$A = \text{Long}_{\text{colector}}[\text{m}] * \# \text{ Abertura}[\text{m}] * \text{ancho}_{\text{abertura}}[\text{m}] \quad (18)$$

Velocidad de ingreso al sedimentador: Para el cálculo de las velocidades de ingreso al sedimentador se usó la ecuación (19)

$$\text{Velocidad} = \frac{Q}{\text{área}_{\text{aberturas}}} \quad (19)$$

Donde:

Área aberturas: Área de abertura del sedimentador [m<sup>2</sup>]

Q: Caudal medio mensual, caudal máximo diario o caudal pico temporal. [m<sup>3</sup>/h]

**Dimensionamiento compartimiento sedimentador:**

Ancho compartimiento sedimentador:

Para el cálculo del ancho del compartimiento sedimentador se usó la ecuación (20).

$$Ancho_S = Ancho_{reactor} - Ancho_{supC} - ancho_{pared} \quad (20)$$

Donde:

Ancho S: Ancho sedimentador [m]

Anchoreactor: Ancho del reactor UASB [m]

Anchosupc: Ancho superior del colector de gas. [m]

Anchopared: Ancho de la pared del sedimentador. [m]

Área total sedimentador:

Para el cálculo del ancho del área del sedimentador se usó la ecuación (21).

$$Área_{sed} = Ancho_{sed} * Largo_{reactor} * \#Modulos \quad (21)$$

Donde:

Área Sed: Área sedimentador [m<sup>2</sup>]

Anchosed: Ancho del sedimentador [m]

Largoreactor: Largo del reactor UASB [m]

#Modulos: Numero de módulos del reactor UASB.

Velocidad tasa de carga superficial:

Para el cálculo de la velocidad tasa de carga superficial se usó la ecuación (22).

$$V_{tasacargasuperficial} = \frac{Q}{área_{sedimentador}} \quad (22)$$

Donde:

Área sedimentador: Área del sedimentador [m<sup>2</sup>]

Q: Caudal medio mensual, caudal máximo diario o caudal pico temporal. [m<sup>3</sup>/h]

### 3.2.2 Filtro percolador

Con la caracterización de las aguas residuales obtenida en la Fase I, se realizó el predimensionamiento de esta unidad, teniendo como referentes las propuestas de diferentes autores (Von Sperling, (2007); Chernicharo (2007) y Romero (2000)) y el Reglamento Técnico del Sector

de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000. La unidad se dimensionó con el criterio de alcanzar una efectividad de remoción de DBO del 75% aproximadamente para esta unidad, este valor se tomó teniendo en cuenta investigaciones hechas por los autores mencionados anteriormente en los que se destacan valores de efectividad alrededor del 75%.

Para el diseño de filtro percolador se usó el método propuesto por Romero (2000); que cita a Germain (1966) el cual plantea la ecuación (23):

$$S_a = \frac{S_o + RS_e}{1 + R} \quad (23)$$

$S_a$ : DBO del afluente al filtro, incluyendo recirculación [mgDBO/L]

R: relación de recirculación.

$S_e$ : DBO del efluente. [mgDBO/L]

$S_o$ : DBO del afluente al filtro, sin recirculación. [mgDBO/L]

Para la relación de recirculación se tomó un valor de 1 para según lineamientos del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

En diseño, generalmente se necesita hallar la carga hidráulica, para lo cual el método propone la ecuación (24):

$$q = \left[ \frac{KD}{\ln\left(\frac{S_a}{S_e}\right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (24)$$

K: constante de tratabilidad

D: profundidad del filtro. [m]

n: coeficiente dependiente del medio de soporte, que, según Germain (1996), es igual a 0.5 para medio plástico.

Según Germain (1966) la constante de tratabilidad K es igual a 2.21 para aguas residuales domésticas a 20°C, siendo que la temperatura para este diseño es de 24.8, el método propone la ecuación (25) para hallar la nueva constante K:

$$K_T = K_{20}(1.035)^{T-20} \quad (25)$$

Donde:

T: temperatura tomada para el diseño. [°C]

K<sub>20</sub>: constante de tratabilidad para aguas residuales domésticas a 20°C.

Para la profundidad del filtro, D, se tomó el valor de 3.2 m. cumpliendo con el rango establecido por la normativa vigente (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017) la cual dicta una profundidad mínima de 3.0 m.

El área superficial (A) está dada por la ecuación (26):

$$A = \frac{Q + Q_R}{q} \quad (26)$$

A: área superficial. [m<sup>2</sup>]

Q: caudal de aguas residuales precedente del efluente primario. [m<sup>3</sup>/día]

Q<sub>R</sub>: caudal de recirculación que para este diseño es el mismo del caudal anteriormente mencionado (recirculación = 1). [m<sup>3</sup>/día]

Con el área superficial se pudo hallar el diámetro de cada filtro.

Finalmente se adoptó la geometría de cada filtro con forma cilíndrica de diámetro 5.64 m y una altura de 3.2 m.

La carga orgánica volumétrica (COV) está dada por la ecuación (27):

$$COV = \frac{S_o * Q}{2 * \pi * \left(\frac{D_f}{2}\right)^2 * D} \quad (27)$$

Donde:

D: altura del filtro. [m]

$D_f$ : diámetro de filtro. [m]

$S_o$ : DBO del afluente al filtro, sin recirculación. [mg DBO/L]

Q: caudal de aguas residuales procedente del efluente primario. [m<sup>3</sup>/día]

Según literatura consultada (Metcalf & Eddy, 1996), entre la parte inferior del distribuidor y la superficie del medio filtrante debe existir un espacio libre de entre 150 y 225 mm. En cuanto a la velocidad de rotación de giro de los distribuidores, el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico sugiere 10 rpm para sistemas de distribución de dos brazos.

En la Tabla 1 se muestran los criterios de diseño para filtros percoladores con medio filtrante en plástico.

**Tabla 1**

*Características de diseño para filtros percoladores con filtro plástico*

<b>Medio filtrante</b>	<b>Plástico</b>
Carga hidráulica [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día]	14.0 – 84.2
Carga orgánica, [kgDBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> .d]	0.5 – 1.6
Profundidad [m]	3.0 – 12.2
Tasa de recirculación	1.0 – 2.0
Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> [%]	65.0 – 80.0

La Tabla 2 presenta las propiedades físicas del medio filtrante tipo plástico para filtros percoladores.

**Tabla 2***Propiedades físicas del medio filtrante tipo plástico para filtros percoladores*

<b>Tipo de medio</b>	<b>Tamaño nominal, mm</b>	<b>Densidad, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Área superficial relativa, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup></b>	<b>Relación de vacíos, %</b>
<b>Desordenado</b>	Varios	32.04–64.08	82-115	<95
<b>(plástico)</b>	Varios	48.06–80.10	138-164	<94

### 3.2.3 Filtro anaerobio de flujo ascendente

Para el diseño del filtro anaerobio se utilizó el modelo propuesto en Chernicharo (2007). Además, se usaron datos como el caudal medio y concentración de DBO<sub>5</sub> de afluencia, obtenidos del proyecto de investigación, adelantado por el grupo GPH de la UIS.

Esta unidad será alimentada por un tubo madre entrante el cual se dividirá en la parte inferior del filtro (falso fondo); allí el caudal será repartido en 3 tubos de diámetro inferior al anterior, los cuales recorrerán la parte central y los laterales del tanque asegurando una distribución uniforme del caudal en el filtro.

Según Chernicharo (2007), los filtros anaeróbicos deben diseñarse con un tiempo de retención hidráulico entre 5 y 10 horas cuando se utiliza el caudal medio para el diseño. Para este caso se tomaron 6 horas (0.25 días).

El volumen del filtro se determina mediante la ecuación (28):

$$V = Q * t \quad (24)$$

V: volumen del filtro. [m<sup>3</sup>]

Q: caudal medio de diseño o afluencia. [m<sup>3</sup>/día]  
 t: tiempo de retención hidráulica. [horas]

Según lineamientos dados en Chernicharo (2007) se debe adoptar una altura para el medio filtrante (h1), falso fondo (h2), profundidad libre al canal de recogida de efluentes (h3); además, los filtros anaerobios deben diseñarse con alturas de material filtrante entre 0.80 y 3.00 m. La profundidad del falso fondo depende de la tubería a usar.

Después se calculó del área del filtro anaerobio (A) y se dividió en 2 debido a que se diseñaron 2 unidades de filtro anaerobio para efectos de mantenimiento u otros inconvenientes que puedan presentarse en el tren de tratamiento, usando la expresión propuesta por el autor.

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

Donde:

A: área del filtro anaerobio. [m<sup>2</sup>]  
 H: altura total del filtro. [m]  
 V: volumen del filtro. [m<sup>3</sup>]

Para el cálculo del volumen del material filtrante (V<sub>fil</sub>) el modelo propone la ecuación (30).

$$V_{fil} = A * h1 \quad (30)$$

h<sub>1</sub>: altura del medio filtrante. [m]  
 A: área del filtro anaerobio. [m<sup>2</sup>]

Se verificó la tasa hidráulica con la ecuación (31):

$$HLR = \frac{Q_{medio}}{A} \quad (31)$$

Donde

Q<sub>medio</sub>: caudal medio de afluencia. [m<sup>3</sup>/día]  
 A: área del filtro anaerobio. [m<sup>2</sup>]

El resultado obtenido se ajusta a los rangos propuestos por Chernicharo (2007) para diseño de filtros anaerobios. Luego, se hizo lo propio con la tasa de carga orgánica aplicada promedio al filtro anaeróbico ( $L_{V1}$ ) y al medio filtrante ( $L_{V2}$ ).

$$L_{V1} = \frac{Q_{medio} * (S_0/1000)}{V_1} \quad (32)$$

$V_1$ : volumen del filtro. [ $m^3$ ]

$Q_{medio}$ : caudal medio de afluencia. [ $m^3/día$ ]

$S_0$ : DBO del afluente al filtro, sin recirculación. [mg DBO/L]

Posterior a eso, se determinó la tasa de carga orgánica al medio filtrante ( $L_{V2}$ ).

$$L_{V2} = \frac{Q_{medio} * (S_0/1000)}{V_2} \quad (33)$$

$V_2$ : volumen del medio filtrante. [ $m^3$ ]

$Q_{medio}$ : caudal medio de afluencia. [ $m^3/día$ ]

$S_0$ : DBO del afluente al filtro, sin recirculación. [mg DBO/L]

Para la determinación de dimensiones del filtro se estimaron 2 filtros de sección cuadrada.

Para la estimación de la eficiencia del filtro anaerobio (E) se utiliza la ecuación (34):

$$E = 100 * (1 - 0.87 * t^{-0.50}) \quad (34)$$

E: eficiencia de remoción del filtro. [%]

t: tiempo de retención hidráulico. [horas]

Teniendo la eficiencia de la unidad se calculó la concentración de DBO en el efluente final ( $DBO_{ef}$ ).

$$DBO_{ef} = S_0 - (E * S_0)/100 \quad (35)$$

E: eficiencia de remoción [%]

$S_o$ : DBO del afluente al filtro, sin recirculación. [mg DBO/L]

Los criterios de diseño para filtro anaerobio aplicado para efluentes de reactor UASB se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Criterios de diseño para filtros anaerobios*

<b>Criterio de diseño</b>	<b>Rango de valores</b>
Medio filtrante	Roca
Altura de medio filtrante [m]	0.8 a 3.0
Tiempo de retención hidráulica [horas]	5.0 a 10.0
Tasa de carga superficial [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d]	6.0 a 10.0
Tasa de carga orgánica [Kg DBO/m <sup>3</sup> .d]	0.15 a 0.5
Carga orgánica en el medio filtrante [Kg DBO/m <sup>3</sup> .d]	0.25 a 0.75

### **3.2.4 Tanque de Contacto**

Con la información recopilada en la Etapa I, asociada a las características del agua residual, y siguiendo el procedimiento propuesto por Bautista y Romero (2006), se realizaron los cálculos que se describen a continuación:

**Dosis de cloro.** Los rangos de dosis de cloro, para este caso, Hipoclorito de sodio o cloro líquido en aguas residuales se tomaron según Environmental Protection Agency (1999)

**Volumen del tanque de contacto.** Para este tipo de tanques se debe emplear un tipo de sistema que garantice un tiempo de retención hidráulica mínimo según Great Lakes - upper

Mississippi river (2014). Por tal motivo se diseñó como un floculador hidráulico de flujo horizontal y el volumen se calculó mediante la ecuación (36).

$$V_{REACTOR} = Q * TRH \quad (36)$$

Donde:

Vreactor: volumen del reactor [m<sup>3</sup>]

Q: caudal máximo mensual [m<sup>3</sup>/s]

TRH: Tiempo de retención hidráulico [s]

### Medidas del tanque.

Profundidad: Se tomó el valor recomendado por el Título C de la Resolución 330 del 2017, Ficha técnica C.F.1 profundidades.

Área; Para realizar el cálculo del área del tanque de contacto se usó la ecuación (37).

$$\text{Área} = \frac{\text{Volumen [m}^3\text{/h]}}{\text{profundidad [m]}} \quad (37)$$

Largo-ancho: Para realizar el cálculo del largo y el ancho del tanque de contacto se usó la ecuación (38).

$$\text{Ancho} = \text{Largo} = \sqrt{\text{área}} \quad (38)$$

Velocidad en recta: Se recomienda por norma según el Título C de la Resolución 330 del 2017 en Ficha técnica C.F.1 velocidades entre 0.1 y 0.6 m/s.

Longitud del recorrido: Para realizar el cálculo de la longitud de recorrido del tanque de contacto se usó la ecuación (39).

$$\text{Long recorrido} = V * TRH \quad (39)$$

Donde:

V: velocidad [m/s]

TRH: Tiempo de retención hidráulico [s]

Número de recorridos: Para realizar el cálculo del número de recorridos del tanque de contacto se usó la ecuación (40).

$$\# \text{ Recorridos} = \frac{\text{Long recorrido}}{\text{Largo}} \quad (40)$$

Donde:

#Recorridos: Numero de recorridos

Long recorrido: Longitud total de recorrido en el tanque [m]

Largo: Largo total del tanque. [m]

Separación entre paredes: Para realizar el cálculo de la separación entre paredes del tanque de contacto se usó la ecuación (41).

$$S1 = S2 = \frac{\text{largo}}{\# \text{ Recorridos}} \quad (41)$$

Donde:

S1: Separación entre pantallas [m]

S2: Separación entre pantalla y pared [m]

#Recorridos: Número de recorridos

Largo: Largo total del tanque. [m]

Área entre pantallas: Para realizar el cálculo del área entre pantallas del tanque de contacto se usó la ecuación (42).

$$\text{Área entre pantallas} = S1 * \text{Profundidad} \quad (38)$$

Donde:

Área entre paredes: área entre las pantallas del tanque [m<sup>2</sup>]

S1: Separación entre paredes [m]

Profundidad: Profundidad del tanque [m]

Perímetro mojado: Para realizar el cálculo del perímetro mojado entre pantallas del tanque de contacto se usó la ecuación (43).

$$\text{Perímetro mojado} = 2 * \text{Profundidad} + S1 \quad (43)$$

Donde:

Perímetro mojado: perímetro mojado entre las pantallas del tanque. [m]

S1: Separación entre pantallas [m]

Profundidad: Profundidad del tanque [m]

Radio Hidráulico: Para realizar el cálculo del radio hidráulico del tanque de contacto se usó la ecuación (44).

$$\text{Radio hidráulico} = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} \quad (44)$$

Donde:

Área: área entre las pantallas del tanque [m<sup>2</sup>]

S1: Separación entre paredes [m]

Perímetro: perímetro mojado entre las pantallas del tanque. [m]

Velocidad en curva: Para realizar el cálculo de la velocidad entre curvas del tanque de contacto se usó la ecuación (45).

$$V = \frac{Q}{S2 * Profundidad} \quad (45)$$

V: Velocidad entre curvas [m/s]

S2: Separación entre pantalla y pared [m]

Q: Caudal máximo mensual [m<sup>3</sup>/h]

**Pérdidas:** Para realizar el cálculo de las pérdidas del tanque de contacto en rectas y en curvas se usaron las ecuaciones (46) y (47) respectivamente.

Perdida en vueltas de 180°:

$$hv = 0.124 + 3.104 * \left(\frac{S1}{S2}\right)^{35} * \left(\frac{v^2}{2 * g}\right) \quad (46)$$

Donde:

hv: Pérdidas en curvas de 180° [m]

S1: Separación entre pantallas [m]

S2: Separación entre pantalla y pared [m]

v: velocidad en curva [m/s]

g: gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Perdida en recta:

$$hf = \frac{v^2 * n^2 * L}{R^{\frac{3}{4}}} \quad (47)$$

Donde:

hf: Pérdidas en rectas [m]

R: radio hidráulico [m]

L: longitud total de recorrido [m]

v: velocidad en recta. [m/s]

n: coeficiente de rugosidad.

Para el valor de n (coeficiente de rugosidad) se usó el valor promedio de la sección uniforme de acuerdo con las recomendaciones de Bautista y Romero (2006).

Pérdidas totales: Para realizar el cálculo de las pérdidas totales del tanque de contacto se usó la ecuación (48).

$$HT = hv + hf \quad (48)$$

Donde:

HT: pérdidas totales [m]

hv: pérdidas en curva [m]

hf: pérdidas en recta [m]

Gradiente de velocidad: Para realizar el cálculo del gradiente de velocidad se usó la ecuación (49).

$$G = \sqrt{\frac{\text{Peso específico} * HT}{vd * TRH}} \quad (49)$$

Donde:

HT: pérdidas totales [m]

vd: viscosidad dinámica [N-s/m<sup>2</sup>]

TRH: Tiempo de retención hidráulica [s]

### **3.3 Etapa III: Evaluación de los aspectos técnicos, ambientales y económicos de los trenes propuestos en el contexto de estudio**

En esta etapa se evaluaron los aspectos técnicos, ambientales y económicos de las unidades que conforman los trenes de tratamiento de agua residual doméstica planteados.

#### **3.3.1 Aspectos técnicos**

En relación con los aspectos técnicos, se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes, el consumo energético y el nivel de complejidad técnico. La estimación de estas variables se hizo basada en la revisión de recomendaciones de diferentes autores (Von Sperling, 2007; Torres, 2000; Valencia, 2002; Chernicharo, 2007; Rodríguez, 1983; Romero, 2000, Metcalf, 2001) y normativa vigente (RAS 2000). Para evaluar la eficiencia de remoción de cada tren de tratamiento, se tomaron valores coherentes de remoción reportados por la literatura para los principales contaminantes: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Amoníaco (NH<sub>3</sub>), Nitrógeno Total (Total N), Fósforo Total (Total P) y Coliformes.

El consumo energético es otro aspecto que se evaluó dentro de este análisis. En una planta de tratamiento de aguas residuales se usan diferentes equipos que, en su mayoría funcionan con energía eléctrica, lo cual marca un consumo en cada tren que puede ser cuantificable; para evaluar este parámetro se consultaron estudios realizados por Von Sperling (2007), Chernicharo (2007) y Metcalf & Eddy (2001) en donde se encontraron valores de consumo en unidades de KW/habitante. año. Se analizaron estos valores y se cuantificó un nivel de consumo energético por tren.

Además, se consultó el consumo eléctrico aproximado de los equipos usados en el filtro percolador, ya que es la unidad que por su composición consume más energía, y según especificaciones de los fabricantes se calculó un consumo en unidades KW/hab. año.

En cuanto al nivel de complejidad técnico, se buscó información relacionada a la complejidad de operación de las diferentes unidades que componen los dos trenes de tratamiento propuestos, los problemas asociados al funcionamiento y mantenimiento de estas unidades y su periodicidad, a la facilidad de llevar a cabo estos trabajos, al tiempo que se toman y a la accesibilidad de insumos necesarios para el correcto funcionamiento de la unidad, de según estudios realizados Von Sperling (2007) y Chernicharo (2007).

### ***3.3.2 Aspectos de afectación ambiental***

Los aspectos de afectación ambiental evaluados en los dos trenes de tratamiento de agua residual fueron: Índice de afectación ambiental, potencial de reúso del biosólido, recuperación de energía y potencial del reúso del agua tratada.

Para el caso del índice de afectación ambiental se recopiló la información obtenida en Von Sperling (2007) en una tabla donde se muestran los criterios de malos olores, ruidos, aerosoles e insectos y su clasificación entre medio, bajo y alto para cada unidad de los trenes de tratamiento de agua residual.

Para el caso de los aspectos de potencial de reúso del biosólido se recopiló información de Von Sperling (2007) y del Decreto 1287 del 2014 en el cual se establecen lineamientos para la utilización de biosólidos producidos por los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Para el índice de recuperación de energía se recopiló información de Chernicharo et al (2019).

Sobre el potencial del reúso del agua tratada se recopiló información de Von Sperling (2007) en donde se muestra el potencial de reúso del agua residual según el nivel de tratamiento de la planta (primario, secundario y terciario).

### ***3.3.3 Aspectos económicos***

Los valores teóricos de CAPEX y OPEX para cada unidad de los trenes de tratamiento se obtuvieron de diversos libros, normas, artículos y estudios publicados por (Sperling, 2007; MATII,).

Para el cálculo de los valores de CAPEX de las unidades predimensionadas (reactor UASB, filtro percolador, filtro anaerobio, tanque de contacto de cloro) se realizó el procedimiento que se muestra a continuación.

Para realizar el cálculo de cantidades se usaron las medidas del predimensionamiento de las unidades obtenidas en la Etapa II de la investigación, con estas se realizó el cálculo del volumen de cada unidad en m<sup>3</sup>. Se consideró que estas fueron diseñadas completamente en concreto. Para del reactor UASB se dividió el cálculo en: muros estructurales laterales, muros estructurales frontales, losa de soporte y separador sólido-líquido-gas. Para el filtro percolador se dividió el cálculo en: muro perimetral, vigas de soporte tipo 1 y tipo, placa base. Para el filtro anaerobio se dividió el cálculo en: muro estructural, vigas en base, placa base. Finalmente, para el tanque de contacto se dividió el cálculo en: muros estructurales laterales, muros estructurales frontales, losa de soporte y pantallas. Posteriormente con el cálculo del volumen se realizó el cálculo del costo total en pesos colombianos del concreto y finalmente con este valor se calculó el costo en USD/hab.año.

#### **4. Resultados y discusión**

##### **4.1 Etapa I: Caracterización de las variables requeridas para el predimensionamiento de los trenes de tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio.**

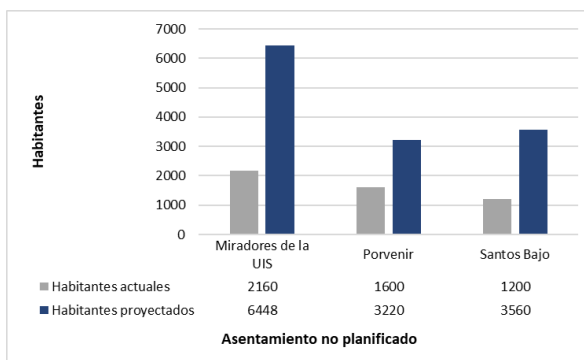
Se encontró que en la zona de estudio existen aproximadamente 1240 usuarios o viviendas en los tres asentamientos, estimando una media de 4 personas por vivienda, teniendo como resultado una población de 4960 habitantes en la zona. Para el cálculo de la población futura se planteó un tiempo de proyección de 25 años, usando el método aritmético, según la Resolución 330 del 2017, este abarca desde el 2023 hasta el 2048; se menciona que también se hizo el análisis de la población futura usando el método geométrico, pero se descartó este modelo ya que la población calculada rondaba los 4 millones de personas para los tres asentamientos, calculo que se consideró no ajustado a la realidad. La figura 2 muestra la distribución de usuarios y habitantes actual y proyectado a 25 años por asentamiento por el método aritmético.

La caracterización del agua residual a tratar se muestra en la Tabla 4, en esta se observa la relación DBO/DQO, la cual según Cisterna (2010) si se encuentra en valores menores a 2.5, se puede tratar por medio de sistemas biológicos, mientras que si esta relación se encuentra entre rangos entre 2.5 y 5, se recomienda el uso de sistemas de lechos bacterianos específicamente para su tratamiento, por otro lado Von Serling (2014) recomienda que para relaciones DBO/DQO menores a 2.5 se use tratamiento biológico, para relaciones entre 2.5 y 4, se use tratamiento biológico con pruebas para validar su aplicación, mientras que para relaciones por encima de 4 recomienda el uso de tratamiento físico-químico. El agua residual domestica de la zona de estudio posee una relación de DBO/DQO con valores que oscilan entre 0.30 y 0.38 por tanto, aunque se realizó el predimensionamiento de las unidades biológicas se recomienda realizar nuevamente la

toma de muestras para verificar que tipo de tratamiento debería ser el más adecuado a utilizar en el agua residual domestica de esta zona.

## Figura 2

*Distribución de los habitantes actuales y proyectados por asentamiento*



## Tabla 4

*Caracterización del agua residual*

Fecha	10/21/23	10/22/23	10/23/23
Q [L/s]	5.14	4.76	4.80
DQO [mg/L O <sub>2</sub> ]	239	397	465
DBO <sub>5</sub> [mg/L O <sub>2</sub> ]	92	131	141
DBO/DQO	0.38	0.32	0.30
Sólidos	280	263	235
Suspendidos			
Totales [mg/L]			

<b>Nitrógeno</b>	4	13	3
------------------	---	----	---

**Amoniacal [mg/L**

**N-NH3]**

<b>Nitrógeno Total</b>	11	21	9
------------------------	----	----	---

**Kjeldhal [mg/L N]**

<b>Nitratos [mg NO-3-</b>	0.02	0.07	0.05
---------------------------	------	------	------

**N/L]**

<b>Nitritos [mg NO-2-</b>	0.004	0.001	0.002
---------------------------	-------	-------	-------

**N/L]**

<b>Grasas y Aceites</b>	8	16	17
-------------------------	---	----	----

**[mg/L]**

<b>Ortofosfatos [mg/L</b>	1.2	0.3	0.7
---------------------------	-----	-----	-----

**P-PO4-3]**

<b>Fósforo Total</b>	2.3	0.8	1.6
----------------------	-----	-----	-----

**[mg/L P]**

<b>Sólidos Totales</b>	1414	948	812
------------------------	------	-----	-----

**[mg/L]**

<b>Coliformes Totales</b>	160000	280000	110000
---------------------------	--------	--------	--------

**[NMP/100mL]**

<b>pH</b>	8.02	7.91	8.03
-----------	------	------	------

<b>T [°C]</b>	25.9	25.6	24.8
---------------	------	------	------

El Acuerdo 011 del 2014 “Por el cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial de segunda generación del Municipio de Bucaramanga 2014-2027”, dicta que la zona en la que se establecieron los asentamientos es un predio rural. Por lo tanto, la Tabla 5 incluye los parámetros fisicoquímicos y sus valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas – ARD, los cuales son requerimientos de calidad de los efluentes de los sistemas de tratamiento para descargas superficiales y subsuperficiales en zonas rurales.

**Tabla 5**

*Parámetros fisicoquímicos y sus valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas – ARD*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Aguas residuales domésticas - de viviendas unifamiliares o bifamiliares</b>
<b>Generales</b>		
<b>pH</b>	Unidades de pH	6,00 a 9,00
<b>DQO</b>	mg/L O <sub>2</sub>	200
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mg/L O <sub>2</sub>	
<b>SST</b>	mg/L	100
<b>SSED</b>	mg/L	5
<b>Grasas y Aceites</b>	mg/L	20
<b>SAAM</b>	mg/L	-
<b>Hidrocarburos</b>		-
<b>HTP</b>	mg/L	-

<b>Compuestos de fósforo</b>		-
<b>Ortofosfatos</b>	mg/L	-
<b>Fósforo Total</b>	mg/L	-
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>		-
<b>Nitratos</b>	mg/L	-
<b>Nitritos</b>	mg/L	-
<b>Nitrógeno Amoniacal</b>	mg/L	-
<b>Nitrógeno Total</b>	mg/L	-

Los caudales de diseño calculados para llevar a cabo el predimensionamiento fueron:

Caudal medio de diseño: 23.96 L/s  
 Caudal máximo horario: 91.23 L/s  
 Caudal máximo diario: 68.11 L/s  
 Caudal máximo mensual: 39.89 L/s

Al comparar los datos de la caracterización del agua residual de la zona de estudio mostrados en la tabla 4, con los parámetros mostrados en la tabla 5, se observó que los parámetros de DQO y SST se encuentran por encima de los valores máximos admisibles por la resolución 631 del 2015, mientras que los parámetros de pH y grasas-aceites se encuentran dentro de los límites máximos permisibles dados por la resolución, esto denota que aunque algunos valores se encuentran dentro de los rangos permisibles, se hace necesario el tratamiento de las aguas residuales ya que no todos los parámetros se encuentran dentro de los máximos permisibles para su vertimiento puntual.

## 4.2 Etapa II: Predimensionamiento de las unidades que conforman los trenes de tratamiento de aguas residuales propuestos

El predimensionamiento de las unidades de los trenes de tratamiento de agua residual doméstica arrojó los resultados que se presentan a continuación.

### 4.2.1 Reactor UASB

En la Tabla 6 se observan los resultados del predimensionamiento del reactor UASB.

**Tabla 6**

*Tabla resumen Reactor UASB*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Caudal máximo mensual [m <sup>3</sup> /h]	143.6
Volumen MODULO Reactor UASB [m <sup>3</sup> ]	540.80
Profundidad [m]	5
Carga DQO en afluente promedio (lo) [kg/h]	66.77
Carga hidráulica volumétrica (CHV) [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> *h]	0.13
Carga orgánica volumétrica (COV) [kgDQO/m <sup>3</sup> *h]	0.06
Eficiencia de remoción de DBO [%]	74.51
Eficiencia de remoción de DQO [%]	66.47
Velocidad flujo ascendente (caudal medio mensual) [m/h]	0.6
Velocidad flujo ascendente (caudal máximo diario) [m/h]	1.1
Velocidad flujo ascendente (caudal pico temporal) [m/h]	1.5
Número de distribuidores	110.00

Numero de tuberías x modulo	8.00
Numero de distribuidores x tubería x modulo	8.00
Numero de distribuidores x modulo	64.00
Separación tuberías [m]	1.20
Separación distribuidores [m]	1.20
Longitud cada colector [m]	10.40
Longitud total colectores [m]	20.80
Ancho superior colector [m] (c)	0.25
Área parte superior colector gas [m <sup>2</sup> ]	5.20
Numero aberturas sedimentador	2
Ancho compartimiento sedimentador [m]	10.10
Área total sedimentador [m <sup>2</sup> ]	210.08
Velocidad tasa carga superficie (caudal med mensual) [m/h]	0.68
Velocidad tasa carga superficie (pico temporal) [m/h]	1.56
Velocidad tasa carga superficie (caudal máx diario) [m/h]	1.17
Estimación de concentración de DBO en efluente final [mgDBO/l]	35.94
Producción teórica de metano [KgDQO/h]	30.36
Producción volumétrica de metano [m <sup>3</sup> /h]	11.62
Producción del biogás [l/h]	16610

### Dimensiones del módulo del reactor UASB:

Los valores del volumen, profundidad, eficiencia de remoción, velocidad de flujo ascendente y sistema de distribución cumplen satisfactoriamente con los rangos dados por la Resolución 330 del 2017.

Debido a que la temperatura del agua residual se encontró entre 20 a 26 °C, se tomó un valor del rango entre 6 a 9h para el TRH, para este caso fue de 7.4h para cumplir de manera satisfactoria con los requerimientos de velocidad de flujo ascendente de la resolución ya mencionada. La profundidad del reactor debe encontrar entre 4.5 y 6 metros según la Resolución, para este caso se optó por tomar 5 metros para que se cumplan con los requerimientos de eficiencia de remoción de esta.

Los valores calculados de eficiencia de remoción se encuentran en el DBO entre 65 y 80% y en el DQO entre 60 y 80%. Estas altas eficiencias muestran que el efluente del reactor tendrá baja contaminación orgánica.

Las velocidades de flujo ascendente se encuentran dentro de los rangos para el caudal medio entre a 0.5 y 0.7 m/h, para el caudal máximo: entre a 0.9 y 1.1 m/h, y para los picos temporales: menor o iguales a 1.5 m/h. Estos rangos de velocidades son ideales para que el proceso de separación líquido, sólido gas se realice correctamente además para conservar en suspensión el manto de lodo que se encuentra en el reactor (Tilley et al. 2018).

Según Chernicharo (2022) Debido al COV calculado, el área del sistema de distribución debía encontrarse entre 0.5 a 2m<sup>2</sup>. En este caso se seleccionó el valor de 2 m<sup>2</sup> esto para tener el mínimo número de tuberías de distribución, abaratando los costos en la etapa de construcción.

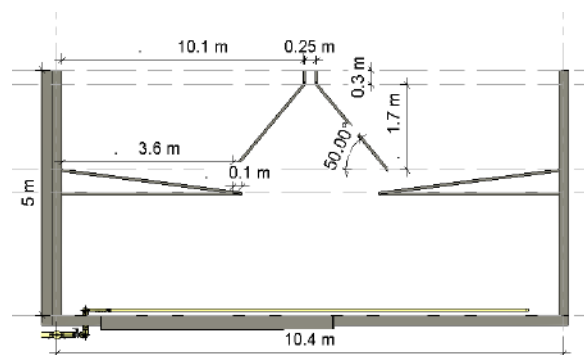
Los valores de cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas se encuentran por debajo de los valores teóricos encontrados en CONAGUA (2015) lo que muestra la baja carga de DQO que presenta el agua residual doméstica de la zona de estudio.

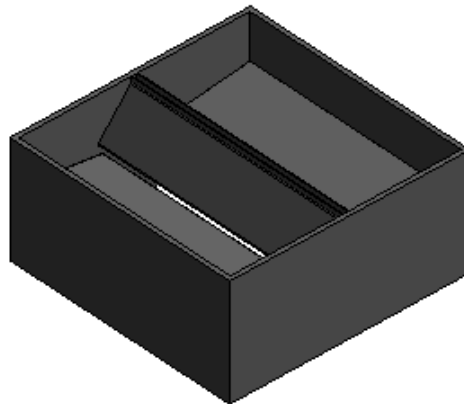
En cuanto a las medidas obtenidas para el colector de gas y el sedimentador se tomaron para cumplir con los criterios de los rangos de las velocidades tanto de tasa de entrada al sedimentador como de tasa de carga superficial. Estos valores cumplen con los criterios de diseño según Chernicharo (2022).

En la tabla 6 se observa que la producción teórica de biogás es de 16610 [l/h], según Burbano (2006) para la producción de 1 KW/h de corriente eléctrica es necesario 700 l/h de consumo de biogás, mostrando que sería posible producir 23.73 KW/h con el reactor UASB predimensionado. Según UPME el consumo mensual de electricidad de un hogar promedio en Colombia es de 157 KW/h, mostrando así que no sería posible alimentar un hogar promedio con la producción de biogás del reactor UASB predimensionado. En las Figuras 3 y 4 se observa el reactor UASB modelado en el software Revit 2023.

### Figura 3

*Vista frontal reactor UASB*



**Figura 4***Vista 3D reactor UASB***4.2.2 Filtro percolador**

La Tabla 7 muestra los parámetros calculados y las dimensiones del filtro percolador obtenido.

**Tabla 7***Resumen de los cálculos realizados para predimensionamiento de filtro percolador*

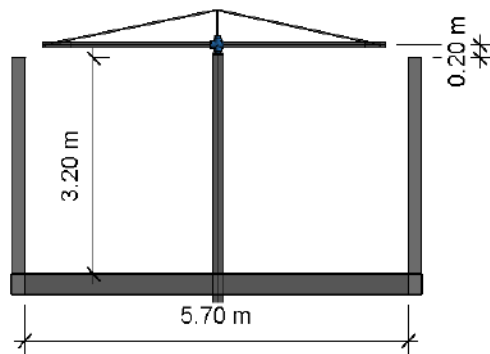
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Caudal medio de diseño [m <sup>3</sup> /día]	2069.75
Concentración DBO del afluente [mg DBO/L]	358.94
Temperatura mínima registrada [°C]	24.80
Coefficiente de retorno	0.80
Tasa de recirculación	1.00

Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub>	75.00
[%]	
K, constante de tratabilidad para 24.8 °C	2.61
Concentración DBO <sub>5</sub> al filtro, con recirculación [mg/L]	22.47
Carga hidráulica [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia]	82.88
Carga orgánica volumétrica [kg DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> .dia]	0.50
Concentración DBO <sub>5</sub> Efluente [mg/L]	8,99
Velocidad de rotación del distribuidor [rpm]	10.00
Dimensiones de filtro percolador	
Altura de cada filtro [m]	3.20
Diámetro de cada filtro [m]	5.64

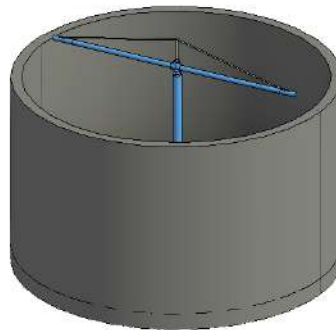
En las Figuras 5 y 6 se muestra el modelo del filtro percolador con sus dimensiones finales.

### Figura 5

*Vista frontal del filtro anaerobio*

**Figura 6**

*Vista 3D del filtro percolador*



#### **4.1.3 Filtro anaerobio de flujo ascendente**

Las dimensiones finales de cada filtro anaerobio se resumen en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Parámetros y dimensiones calculadas de filtro anaerobio*

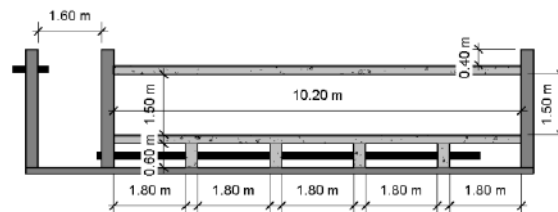
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Altura de falso fondo (h2) [m]	0.60
Altura de la pérdida de carga y nivel del agua (h3) [m]	0.40
Altura total del filtro [m]	2.50

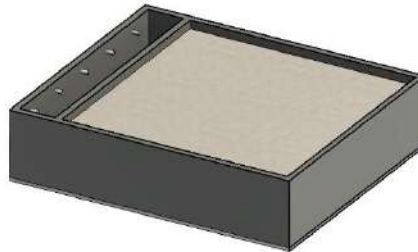
Ancho de cada filtro [m]	10.15
Largo de cada filtro [m]	10.20
Altura de cada filtro [m]	2.50
Área de cada filtro anaerobio [m <sup>2</sup> ]	103.50
Tiempo de retención hidráulico [horas]	6.00
Tasa de carga hidráulica [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d]	10.00
Tasa de carga orgánica (filtro) [kgDBO/m <sup>3</sup> .d]	0.15
Tasa de carga orgánica (medio filtrante) [kgDBO/m <sup>3</sup> .d]	0.25
Eficiencia [%]	64.48
DBO efluente [mg/L]	12.77

Las Figuras 7 y 8 muestran el modelo de filtro anaerobio con sus dimensiones finales.

### Figura 7

*Vista frontal del filtro anaerobio*



**Figura 8***Vista 3D del filtro anaerobio***4.2.4 Tanque de contacto**

En la Tabla 9 se observan los resultados obtenidos para el tanque de contacto.

**Tabla 9***Tabla resumen Tanque de contacto*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Caudal máximo mensual [m <sup>3</sup> /h]	143.6
Dosis de cloro [mg/L]	5
Tiempo de contacto [min]	15
Volumen tanque [m <sup>3</sup> ]	36.00
Ancho [m]	6.00
Largo [m]	6.00
Longitud de recorrido [m]	90.00
Número de recorridos corregido	12.00
S1 (Separación entre paredes) [m]	0.40
S2 (Separación entre pantalla y pared) [m]	0.40

Área entre pantallas [m <sup>2</sup> ]	0.40
Perímetro mojado [m]	2.40
Radio Hidráulico [m]	0.17
Velocidad Curva [m/s]	0.10
Hv (pérdidas en curva) [m]	0.13
Hf (pérdidas en recta) [m]	0.07
HT (pérdidas totales) [m]	0.19
Gradiente de velocidad [s <sup>-1</sup> ]	44.83

En la Tabla 8 se observan los resultados del predimensionamiento del tanque de contacto de cloro, estos cumplen dentro de los rangos dados por la normativa vigente en Colombia Resolución 330 del 2017, Título C.F.1.

El valor de la dosis de Hipoclorito de sodio o cloro líquido que se observa en la tabla 8 se tomó según Environmental Protection Agency (1999) para ser aplicada en la desinfección de aguas residuales domésticas.

El volumen calculado del tanque, además del número de recorridos dentro mismo y la separación entre las pantallas se calculó para cumplir con el tratamiento del caudal de agua residual doméstica de la zona de estudio además de cumplir con el tiempo de contacto requerido para la desinfección de este. El tiempo de contacto que se observa en la tabla 8 fue tomado según Great Lakes - upper Mississippi river (2014).

La profundidad recomendada por norma es de entre 1 y 2 metros. Para este caso el valor seleccionado busca cumplir dicha recomendación, además de cumplir con las velocidades tanto en recta como en curva y de abaratar costos de construcción. La velocidad tanto en recta como en

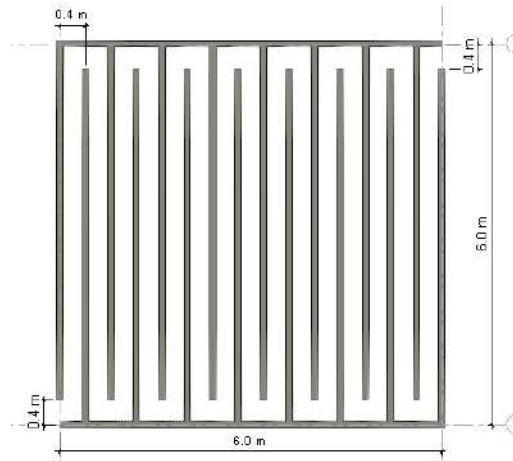
curva seleccionada para el tanque de contacto se tomó dentro del rango de la norma para cumplir de manera satisfactoria con el mezclado del caudal con el Hipoclorito de sodio. Las pérdidas de carga hidráulica calculadas se presentan de manera distinta en dos zonas del floculador, una en los tramos rectos y otra en los giros de 180°. Para este caso las pérdidas fueron mayores en los giros de 180 grados, debido a que en estas se presentan pérdidas por el choque del caudal contra las pantallas para realizar el mezclado con el Hipoclorito de sodio, además de la fricción de las partículas de agua con el material, mientras que en la parte recta solo se presentan las pérdidas provocadas por fricción entre las partículas de agua y la fricción con el material (Bautista et al. 2006).

Un gradiente de velocidad adecuado en el tanque de contacto genera la agitación correcta para que ocurra la mezcla del caudal con el Hipoclorito de sodio y se tenga una correcta desinfección de este. En el floculador hidráulico de flujo horizontal del proyecto el gradiente dentro del rango normativo es provocado por las pantallas que posee, estas por medio del choque contra el caudal controlan la velocidad del fluido tanto en recta como en curva.

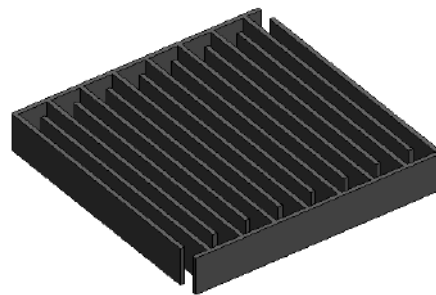
En las Figuras 9 y 10 se observa el floculador hidráulico de flujo horizontal modelado en el software Revit 2023.

**Figura 9**

*Vista planta floculador hidráulico de flujo horizontal*

**Figura 10**

*Vista 3D floculador hidráulico de flujo horizontal*

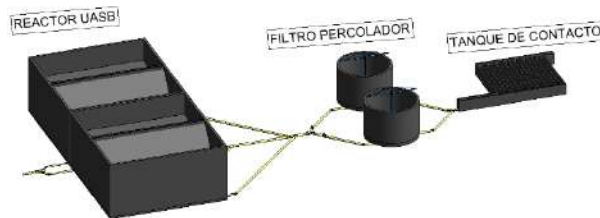


Finalmente se presentan los modelos de los dos trenes de tratamiento de agua residual doméstica con las unidades calculadas anteriormente.

### Tren de tratamiento de agua residual doméstica uno

#### Figura 11

*Vista 3D modelo tren de tratamiento uno*



El área necesaria para desarrollar el predimensionamiento del tren de tratamiento de agua residual uno es de 1484 m<sup>2</sup>.

### Tren de tratamiento de agua residual domestica dos

#### Figura 12

*Vista 3D tren de tratamiento dos*



El área necesaria para desarrollar el predimensionamiento del tren de tratamiento de agua residual uno es de 1480 m<sup>2</sup>.

El modelado de los trenes permite observar que para la construcción del tren de tratamiento de agua residual uno se necesitan 4 m<sup>2</sup> más de área que para la construcción del tren de tratamiento de agua residual dos.

### **4.3 Etapa III: Evaluación de los aspectos técnicos, ambientales y económicos de los trenes propuestos en el contexto de estudio**

#### **4.3.1 Aspectos técnicos**

Se analizaron los aspectos técnicos de los dos trenes de tratamiento propuestos, se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes, el consumo energético y el nivel de complejidad técnico. La eficiencia de remoción de cada unidad ha sido estudiada por diversos autores en donde se hallaron resultados similares en la eficiencia de remoción de algunos contaminantes y algunas disparidades en otros, esto debido a que el campo o la zona de estudio de las diferentes investigaciones fue diferente, los métodos fueron diferentes y la tecnología usada también lo fue. Para sintetizar los resultados de la investigación realizada se elaboró la Tabla 10 en donde se organizó toda la información hallada.

Para hacer la correcta evaluación de eficiencia de remoción de cada tren se estudiaron a diversos autores como Metcalf & Eddy (1995), Rodríguez (1983), Chernicharo (2007), Romero (2000), Valencia (2002) y Von Sperling (2007) los cuales hicieron investigaciones sobre la efectividad de las unidades estudiadas en este proyecto de investigación, allí se encontraron valores de eficiencia de remoción similares para cada unidad; dentro de lo investigado se encontró también que Von Sperling (2007) hizo un estudio en el cual analizó el comportamiento de dos configuraciones de tren de tratamiento compuestas, la primera, por Reactor UASB + Filtro percolador y la segunda por Reactor UASB + Filtro anaerobio; allí se estudió que porcentaje de contaminantes como DBO, DQO, SST, NH<sub>3</sub>, Total N y Total P fueron removidos. Se decidió usar estos valores para hacer el análisis de la eficiencia de remoción de los dos trenes ya que, además, estos valores no estaban muy lejanos de lo encontrado en los demás estudios. Para determinar el

valor de remoción de contaminantes usando la cloración como método de desinfección se investigó a Romero (2000).

La diferencia entre las dos configuraciones radica en el tratamiento secundario, especialmente asociada a la dificultad operativa que pueda presentar cada tren. Para el caso del tren de tratamiento que incluye el filtro anaerobio, este filtro está compuesto por un medio filtrante (roca), una tubería de distribución interna, vigas de soporte y muros de concreto. Esta unidad tiene una entrada de caudal por gravedad y un efluente que no necesita de ayuda mecánica para salir de la unidad, su flujo es ascendente, su funcionamiento está ligado al caudal de entrada y no se necesita de tecnología compleja para que esta unidad funcione.

Para el caso del tren de tratamiento que incluye un filtro percolador, este filtro está compuesto por un medio filtrante (plástico), muros de concreto y diferentes unidades mecánicas. Esta unidad es de flujo descendente por lo que necesita de un equipo mecánico que impulse el caudal hasta la parte superior del filtro desde donde será distribuido el caudal en el medio filtrante. Además, para asegurar uniformidad en la filtración de las aguas residuales se debe tener un distribuidor, el cual está formado por dos brazos montados sobre un pivote central, que giran en un plano horizontal. Los brazos son huecos y cuentan con una serie de boquillas por las cuales se distribuye el agua residual sobre el medio filtrante. El movimiento del distribuidor puede estar gobernado por la reacción dinámica de la descarga del agua residual en su salida por las boquillas, o por un motor eléctrico, siendo esta última opción lo más recomendado. Adicionalmente, esta unidad cuenta con un sistema de recirculación que consiste en tomar el caudal de efluente y llevarlo a punto de entrada de la unidad, para este movimiento de aguas se debe tener otro sistema eléctrico que facilite esta operación. Estos mecanismos no son tecnología difícil de manipular ni de alto

nivel de complejidad, pero si agregan un componente extra a la unidad que no tiene el filtro anaerobio, por lo que el nivel de complejidad técnico fue un aspecto en el que se denotó una mayor simplicidad en el tren dos ya que este tiene dentro de sus componentes el filtro anaerobio, aunque la diferencia en cuanto a complejidad de operación y mantenimiento entre los dos trenes es un similar, la investigación demostró que es más complejo el tren uno que el tren dos.

El consumo energético fue la variable que mostró una desventaja por parte del tren uno ya que este tiene dentro de sus unidades al filtro percolador, esto debido a que este filtro tiene dentro de sus componentes unos equipos que funcionan con energía eléctrica. Los resultados de la investigación se sintetizaron en la Tabla 10.

La complejidad técnica de cada unidad fue estudiada por Von Sperling (2007) y Chernicharo (2007). Particularmente estos autores encontraron que las configuraciones tomadas para este proyecto de investigación tienen una complejidad técnica media alta.

**Tabla 10**

*Consumo energético por unidad*

TRENES	CONSUMO ENERGÉTICO [KW/hab]	REFERENCIA
1	0.5 - 1	Chernicharo (2007)
	1.5	Metcalf & Eddy (2001)
	0	Von Sperling (2007)
2	0	Von Sperling (2007)
	0	Chernicharo (2007)

**Tabla 11**

*Comparación técnica de los trenes de tratamiento de agua residual doméstica*

Trenes	Eficiencia de remoción							Consumo	Complejidad
	DBO	DQO	SST	NH <sub>3</sub>	Total	Total	Coliformes	Energético	Técnica
	(%)	(%)	(%)	(%)	N(%)	P(%)	(%)	[KW/hab]	(O&M)
1	80-93	73-88	87-93	<50	<60	<35	99	0.5-1.5	Media-Alta
2	75-87	70-80	80-90	<50	<60	<35	99	0	Media-Alta

### 4.3.2 Aspectos ambientales

#### 4.3.2.1 Índice de afectación ambiental

Dentro del marco del proyecto se estudió como parámetro de evaluación el índice de afectación ambiental encontrando que, en general, no hay una clara diferencia que demuestre una ventaja de un tren sobre otro; sub-parámetros como malos olores, ruidos, aerosoles e insectos fueron calificados con un impacto de bajo a medio en general, mostrando una leve ventaja el tren dos, ya que tanto el reactor UASB como el filtro anaerobio tienen una calificación de bajo impacto en el sub-parámetro aerosoles, ventaja que no es tan relevante en la calificación global pero que vale la pena denotar. La Tabla 12 muestra un resumen de lo mencionado según Von Sperling (2007).

**Tabla 12**

Índice de afectación ambiental

Tren	Unidad	Índice afectación ambiental				Índice final
		Mal olor	Ruido	Aerosoles	Insecto	

<b>1</b>	Reactor UASB	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio- Bajo
	Filtro percolador	Medio	Medio	Medio	Medio	
	Cloración	-	-	-	-	
<b>2</b>	Reactor UASB	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio- Bajo
	Filtro anaerobio	Medio	Medio	Bajo	Medio	
	Cloración	-	-	-	-	

#### 4.3.2.2 Potencial de reúso del biosólido

Dentro de esta investigación se encontró que no existe una diferencia entre la producción de lodos de un tren y el otro. Esto debido a que la unidad con mayor producción de lodos es el reactor UASB y este es un componente de ambos trenes.

El Decreto 1287 del 2014 establece criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Allí se dictan lineamientos para los diversos usos que se le pueden dar a estos subproductos de una PTAR, categorizan los lodos y también se limita el uso de este para diferentes áreas.

Dentro de los potenciales usos que se le pueden dar a los biosólidos generados en una PTAR, están la agricultura, se puede usar como abonos orgánicos o fertilizantes para zonas verdes, separadores viales, jardines, o como insumo en la fabricación de materiales de construcción.

#### 4.3.2.3 Recuperación de energía

La recuperación de energía en forma de gas metano se produce en el reactor UASB, teniendo en cuenta que los dos trenes tienen dentro de su configuración esta unidad, no hay diferencia en este parámetro entre el tren uno y el tren dos.

Aunque el gas metano que se produce en esta unidad puede ser transformado en energía como se mencionó anteriormente esta no sería suficiente para alimentar un hogar promedio en Colombia ya que Según UPME el consumo mensual de electricidad de un hogar promedio en Colombia es de 157 KW/h y como se observar en la tabla 5 la producción teórica de biogás es de 16610 [l/h], según Burbano (2006) para la producción de 1 KW/h de corriente eléctrica es necesario 700 l/h de consumo de biogás, por tanto, se producirían 23.73 KW/h con el reactor UASB predimensionado, energía insuficiente para alimentar un hogar colombiano promedio.

#### **4.3.2.4 Potencial de reúso del agua tratada**

Al evaluar el potencial de reúso del agua tratada se observó según Silva et al. (2008) que el agua residual domestica puede ser utilizada en diversa aplicación según el tipo de tratamiento utilizado, en el caso de que donde el tren de tratamiento cuenta con un tratamiento secundaria en la planta esta podrá ser utilizada en aplicaciones de riego si se cuenta con desinfección posterior a este, este es el caso específico de los dos trenes de tratamiento predimensionados, donde se cuenta con tratamiento secundario con un filtro percolador en el tren de tratamiento uno y un filtro anaerobio en el tren de tratamiento dos, además de que ambos cuentan con el un tanque de contacto como método de desinfección, provocando que el efluente de ambas plantas puede ser usado en aplicaciones de riego, esto sin generar diferencia significativa entre el potencial de reúso del agua tratada de un tren o del otro. El agua del efluente de los trenes de tratamiento propuestos en ningún caso será apta para el consumo humano.

### 4.3.3 Aspectos económicos

Los valores calculados de cantidades en m<sup>3</sup> de concreto de 3000 PSI y costos de construcción en USD/Hab.año se muestran para cada tren de tratamiento de agua residual en la Tabla 13.

**Tabla 13**

*Comparación m<sup>3</sup> de concreto y costos de construcción en trenes de tratamiento*

<b>TRENES</b>	<b>Descripción componentes</b>	<b>unidad</b>	<b>m<sup>3</sup> concreto 3000 PSI</b>	<b>Costos de construcción [USD/Hab.año]</b>
<b>1</b>	Reactor UASB, filtro percolador, tanque contacto		189.6	\$1.08.
<b>2</b>	Reactor UASB, filtro anaerobio, tanque contacto		200.3	\$1.14.

En la Tabla 13 es posible observar que la cantidad de m<sup>3</sup> de concreto de 3000 psi necesarios para la construcción del tren de tratamiento dos es 10.7 m<sup>3</sup> más que para el tren de tratamiento uno. También se observa que, en cuanto a los costos de construcción el tren de tratamiento dos es 0.06 USD/Hab.año más caro que el tren de tratamiento uno, esto se debe a la diferencia entre los filtros que posee cada tren. El tren uno posee un filtro percolador, mientras que el tren dos posee un filtro anaerobio, este último tiene un volumen de concreto mayor que el filtro percolador, generando un incremento en la cantidad de m<sup>3</sup> de concreto de 3000 PSI y por tanto un incremento en el costo de construcción en USD/Hab.año.

Finalmente, con la información calculada, en la Tabla 14 se puede observar la comparación económica tanto teórica como la que se realizó por medio de cálculos de los dos trenes de tratamiento de agua residual, al observar esta tabla se nota que CAPEX teórico es mayor en el tren de tratamiento uno, mientras que en el caso del valor del CAPEX calculado este es mayor en el tren dos.

**Tabla 14**

*Comparación económica de los trenes de tratamiento*

<b>Tren</b>	<b>OPEX</b> [US\$/Hab,año]	<b>CAPEX</b> [US\$/Hab,año]	<b>REFERENCIA</b>
<b>Tren 1</b>	2.0 - 3.0	25 - 35	Von Sperling
<b>Tren 2</b>	1.5 - 2.2	20 - 30	Von Sperling
<b>Tren 1</b>	-	\$1.07	Elaboración propia
<b>Tren 2</b>	-	\$ 1.14	Elaboración propia

En la Tabla 14 se puede notar que la diferencia entre el CAPEX teórico y el CAPEX calculado es de 21.07 USD/Hab.año para el caso del tren uno y 18.86 USD/Hab.año para el tren dos. Esta diferencia radica en que, para la presente investigación el alcance es un predimensionamiento de los trenes, lo cual deja al proyecto en una fase muy temprana de desarrollo, y no incluye en los costos de construcción aspectos como: diseño estructural, arquitectónico, hidráulico, de herramientas y maquinarias de construcción, estudios de suelos, estudios topográficos, excavación o terraplén según sea el caso, licencias para la construcción, de contratación, profesionales como ingenieros civiles, sanitarios o arquitectos, mano de obra,

provocando así las diferencias significativas entre el valor teórico y el valor calculado del proyecto.

## 5. Conclusiones

Se caracterizaron las variables requeridas para el predimensionamiento de las unidades que componen los trenes de tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio. La caracterización de estas variables como topografía, tipo y uso de suelo, valores máximos de contaminantes, población futura, calidad del agua, caudal y temperatura fue apropiada para comprender el área de estudio del proyecto y llevar a cabo la investigación.

Se predimensionaron las unidades tecnológicas que conforman los trenes de tratamiento de aguas residuales propuestos. Este predimensionamiento se logró realizar cumpliendo los lineamientos del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000 y la Resolución 330 de 2017. Así mismo, el predimensionamiento de las unidades cumple con el tratamiento del volumen del caudal de las aguas residuales domésticas de los asentamientos en la zona estudio. El predimensionamiento del tren de tratamiento uno ocupa un área de 1484 m<sup>2</sup>, 4 m<sup>2</sup> mayor que el tren de tratamiento dos.

El tren de tratamiento de agua residual uno fue diseñado para generar un efluente con DQO de 38.9 mg/l, DBO<sub>5</sub> de 8.9 mg/l, SST de 24.5 mg/l. El efluente del tren de tratamiento de agua residual dos tendría DQO de 46.7 mg/l, DBO<sub>5</sub> de 12.8 mg/l y SST de 34.3 mg/l. Los valores obtenidos en ambos trenes se encuentran por debajo de los valores máximos permisibles según la Resolución 330 del 2017. El tren de tratamiento uno tiene un consumo de energía de entre 0.5 a 1.5 KW/hab.año mientras que, el tren de tratamiento no requiere energía. Ambos trenes de tratamiento poseen en promedio un valor medio para el índice de afectación ambiental.

Al evaluar los aspectos económicos se encontraron valores teóricos de literatura del CAPEX para el tren de tratamiento uno de 25-35 US\$/hab.año y para el tren de tratamiento dos

de 20-30 US\$/hab.año, mientras que los valores de CAPEX calculados para las unidades predimensionadas en el proyecto para el tren uno y tren dos fueron de 1.07 US\$/hab.año y 1.14 US\$/hab.año respectivamente. Esta diferencia presentada entre los valores del CAPEX teórico y el CAPEX calculado es debido a que en este proyecto no se tiene un diseño completo de los trenes, por tanto, no se tienen en cuenta ciertos aspectos como: diseño estructural, arquitectónico, hidráulico, herramientas y maquinarias de construcción, estudios de suelos, estudios topográficos, excavación o terraplén licencias de construcción y mano de obra, abaratando así el valor del CAPEX calculado para el proyecto.

Finalmente, los resultados obtenidos con esta investigación podrían ser compartida con la comunidad para que sean ellos de manera informada los que tomen la decisión de cual tren de tratamiento se ajusta más a su necesidad.

## **6. Limitaciones y recomendaciones**

Una de los condicionantes que limitó el alcance de la investigación es la desactualizada legislación colombiana para temas de tratamiento de aguas residuales; en temas como el reúso de agua residuales domésticas tratadas no se encontró una normatividad que dictara lineamientos para ello o guiara a los usuarios a hacer un correcto reúso de estas aguas. Esto, debido a que la normativa vigente fue registrada hace más de 20 años y en ese transcurso de tiempo se ha avanzado mucho técnica y tecnológicamente en esta área.

Además, se tomó más tiempo de lo planeado en el estudio de literatura sobre plantas de tratamiento de aguas residuales descentralizadas ya que no se encontró información sobre diseños de las unidades propuestas en este proyecto y para este tipo de PTARs o en zonas similares a las que esta investigación estudió. Tampoco se encontró literatura actualizada que detallara el consumo energético de estas unidades por lo que fue difícil pronosticar un consumo aproximado real.

Otro aspecto importante de recalcar como una limitante es que este proyecto de investigación abarcaba el predimensionamiento de las unidades de los trenes de tratamiento, no se tuvieron en cuenta componentes externos a las unidades que puedan hacer parte del tratamiento de las aguas residuales como es el caso del bombeo necesario para la recirculación de biomasa en el filtro percolador.

Se recomienda que, para futuras investigaciones similares, se haga uso de dispositivos tecnológicos que permitan obtener en detalle las pendientes del terreno. En esta investigación se obtuvo esta información con ayuda del perfil de elevación de Google Earth Pro ®, sin embargo, esta útil herramienta cuenta con una baja precisión.

### Referencias Bibliográficas

- Bautista, L., Romero A. (2006). Análisis de un floculador hidráulico de flujo horizontal. Revista escuela colombiana de ingeniería, (No.62).
- Burbano, A. (2006). Utilización del metano generado en un reactor anaerobio como fuente de energía en una industria de gaseosas. Tesis de pregrado. Universidad de la Salle.  
[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/ing\\_ambiental\\_sanitaria/article/1173/&path\\_info=T41.06\\_B891u.pdf](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/ing_ambiental_sanitaria/article/1173/&path_info=T41.06_B891u.pdf)
- Chernicharo, C. (2022). Principios del tratamiento biológico de aguas residuales: Reactores anaerobios. Editorial Universidad de Nariño. <http://sired.udenar.edu.co/id/eprint/7458>
- Chernicharo, C., Ribeiro, T. (2019). Anaerobic reactors for sewage treatment: Design, construction and operation. Editorial IWA. <https://doi.org/10.2166/9781780409238>.
- Comisión nacional de agua. (2015). Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: reactores anaerobios de flujo ascendente. Editorial Secretaría de medio ambiente y recursos naturales.
- Dasgupta, P., Kumar, V., Malik, A., & Kumar, M. (2023a). Wastewater Treatment Systems for City-Based Municipal Drains for Achieving Sustainability. *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), 585–606. <https://doi.org/10.1007/S43615-022-00163-Z/FIGURES/8>.

Dávalos, S., & Ibañez, S. (2018). Evaluación técnica, ambiental, social y económica de la planta de tratamiento de agua residual ginebra (valle del cauca). UNIVERSIDAD DEL VALLE.

Escobar, F., & Enrique, F. (2017). Estudio de la viabilidad técnico-económica para la implementación de un sistema de tratamiento de las aguas residuales domésticas en cotecmar sede Mamonal. UNIVERSIDAD DEL NORTE.

Great lakes - upper Mississippi River. (2014). Recommended standards for wastewater facilities: Policies for the design, review, and approval of plans and specifications. Health Research, Inc.

Huang, X., Guida, S., Jefferson, B., & Soares, A. (2020). ARTICLE Economic evaluation of ion-exchange processes for nutrient removal and recovery from municipal wastewater. <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0054-x>.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.09.005>.

Mendoza, A., & Restrepo, D. (2019). Evaluación de Bacterias con Posible Potencial Biorremediador Presentes en el Sistema de tratamiento de aguas residuales el Salguero de Valledupar en el año 2019.

Metcalf & Eddy (1995) Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización.

Tercera edición. Volumen II. McGraw-Hill, Inc. ISBN: 0-07-041690-7 ISBN: 84-481-1727-1 (Vol. I) ISBN: 84-481-1612-7 (Obra completa) Depósito legal: M. 24.848-1995

Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS – 2000. Sección II. Título E

Ministerio de vivienda ciudad y territorio. (2017). Resolución 330 del 2017. Diario oficial 50.267.

Parkinson, J., & Tayler, K. (2003). Decentralized wastewater management in peri-urban areas in low-income countries. *Environment and Urbanization*, 15(1), 75–90.  
<https://doi.org/10.1177/095624780301500119>.

UPME. Primer balance de Energía Útil para Colombia y cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética. (2019).  
[https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance\\_energia\\_util/BEU-Residencial.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Residencial.pdf).

Rodríguez, J., García, C., & Pardo, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46), 149–164.  
<https://doi.org/10.14483/UDISTRITAL.JOUR.TECNURA.2015.4.A03>.

Silva, J., Torres, P., Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347-359. Retrieved July 30, 2024, from

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-99652008000200020&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652008000200020&lng=en&tlng=es).

Skinner, R., French, M., Acioly Jr, C., & Reid, J. (2014). A practical guide to designing, planning, and executing citywide slum upgrading programmes. Nairobi. [www.unhabitat.org](http://www.unhabitat.org).

Sperling, M., Andreoli, C., Fernandes, F. (2007). Biological wastewater treatment series: Sludge treatment and disposal. Editorial IWA.

Sperling, M. (2007). Biological wastewater treatment series: Wastewater Characteristics, treatment, and disposal. Editorial IWA. <https://doi.org/10.2166/9781780402086>.

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., y Zurbrügg, C. (2018): Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento . Dübendorf (Suiza). Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (Eawag), 2da. Edición.

UIS, & amb. (2023). Documento de análisis del impacto de los vertimientos de aguas residuales de asentamientos periurbanos no planificados sobre el servicio hidrológico de suministro de las cuencas receptoras en tres comunidades caso de estudio.

United Nations. (2021). Population, Environment and Development The Concise Report. Department of Economic and Social Affairs.

United States Environmental Protection Agency. (1999). Folleto informativo de tecnología de agua residuales desinfección con cloro. EPA.

Valencia, N., & De Velásquez, T. (2002). Avances en la desinfección de aguas residuales para eliminar huevos de helmintos y otros microorganismos. *Rev. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS*, 67-73.

Wilderer, P. A. (2005). Sustainable water management in rural and peri-urban areas: What technology do we need to meet the UN Millennium Development Goals? *Water Science and Technology*, 51(10), 1–6. <https://doi.org/10.2166/WST.2005.0344>.

Zuluaga, L. M., Adolfo, +, & Vargas, G. (2019). La (in)justicia espacial y la producción social de los asentamientos informales en Colombia<sup>1</sup> \*. *Revista Colombiana de Geografía* |, 29, 118–132. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.73099>