

Propuesta de Mejoras de Diseño Hidráulico de Dos Trenes de Tratamiento a Escala de Laboratorio, Para el Sistema de Aprovechamiento de Aguas Lluvias del Edificio E3T de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Colombia.

Carlos Eduardo León Oliveros, Anderson Arley Muñoz Muñoz

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Directora

Daniela Cristina Rey Romero

Msc. Planificación y Desarrollo de Recursos Hidráulicos

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Agradecimientos

Culminada esta etapa de mis estudios universitarios, quiero expresar de corazón mi sentimiento de enorme y perenne gratitud.

Primero que todo a Dios, por su infinita bondad y misericordia por haberme permitido con salud y con éxito desarrollar toda la carrera.

mis Padres, hermano y toda mi familia que de una u otra forma me brindaron incondicionalmente el apoyo para alcanzar esta meta.

A mis profesores, quienes me entregaron su sabiduría y experiencia convirtiéndose en guías para fortalecer mis principios y conocimientos.

Y a mis amigos y compañeros de carrera, con quienes compartí momentos de alegría y tristeza, derrotas y triunfos y toda clase de experiencias que también sirvieron para consolidar el propósito de conquistar este gran objetivo.

Hoy con el título en mano me invade la felicidad, el orgullo y la satisfacción por haber logrado una de mis más grandes metas: graduarme como Ingeniero Civil de una de las mejores Universidades del País, la Universidad Industrial de Santander-UIS.

Carlos Eduardo León Oliveros

A Dios, mi luz y mi guía, quien siempre me lleva de su mano, en quien encuentro refugio y paz.

A mi familia: mis padres y hermano. Ellos son el motor y el combustible de mi vida. Gracias por acompañarme en esta meta que, inicialmente parecía difícil y lejos de alcanzar, hoy con su esfuerzo, tiempo y dedicación lo logramos.

A mis compañeros, con quienes compartí este viaje y de quienes me llevo gratos recuerdos y experiencias. Aquellos amigos que se convirtieron en mi familia sin tener lazos de sangre, que me brindaron su apoyo, cariño y compañía.

A los docentes, quienes con sus conocimientos aportaron a mi formación como profesional pero además con sus experiencias me ayudaron a crecer como persona. 'Un título no hace a una persona profesional sino el deseo de superarse día a día, siempre respetando a los demás y sin sabotear a nadie'

Anderson Arley Muñoz Muñoz

Agradecer de manera especial a nuestra directora de proyecto la Ing. Daniela Cristina Rey Romero y nuestro codirector el Ing. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña quienes, con su constante guía, ayuda, conocimiento y dedicación fueron pieza clave para el desarrollo de este proyecto.

Tabla de contenido

	Pág.
1. Objetivos.....	15
1.1. Objetivo General.....	15
1.2. Objetivos específicos	15
2. Marco Teórico	16
2.1. Agua lluvia y sus características	16
2.2. Uso del agua lluvia.....	16
2.3. Tecnologías de tratamiento	18
2.3.1. Sedimentador:.....	18
2.3.2. Filtración lenta en arena:	19
2.3.3. Filtración por membrana:	20
2.4. Antecedentes	21
3. Metodología.....	23
3.1. Revisión de literatura	23
3.2. Montaje y puesta en operación de los prototipos.....	25
3.2.1. Descripción y montaje de los trenes de tratamiento.....	26
3.2.2. Filtro lento de arena.....	27
3.2.3. Membrana de Ultrafiltración.....	30

3.2.4.	Pruebas de flujo preliminares	32
3.2.5.	Muestreo.....	36
3.2.6.	Pruebas de flujo con agua cruda sintética	37
3.2.7.	Medición de los parámetros de calidad de agua lluvia.....	39
4.	Resultados y discusiones	41
4.1.	Desempeño de los trenes de tratamiento con las muestras de agua lluvia.....	41
4.2.	Pruebas de flujo con agua cruda sintética en FLA.....	43
4.2.1.	Pruebas de flujo (0 – 10 UNT).....	44
4.2.2.	Pruebas de flujo (10 – 20 UNT).....	47
4.2.3.	Pruebas de flujo (20 – 30 UNT):.....	49
4.3.	Pruebas de flujo con agua cruda sintética en MUF.....	52
5.	Conclusiones.....	55
	Referencias Bibliográficas	57

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Granulometría usada y espesores de capa para el lecho de filtrado.....	29
Tabla 2. Rangos de apertura de llave del tanque sedimentador.....	33
Tabla 3. Caudales de entrada con tanque sedimentador lleno.....	34
Tabla 4. Caudales de entrada con tanque sedimentador al mínimo.....	34
Tabla 5. Tiempos de operación del FLA.....	35
Tabla 6. Caudales de operación del FLA.....	35
Tabla 7. Caudales de filtración de la MUF.....	35
Tabla 8. Materiales utilizados para crear agua cruda sintética para el FLA.....	38
Tabla 9. Materiales utilizados para crear agua cruda sintética para la MUF.....	39
Tabla 10. Resultados promedio primer evento de lluvia.....	42
Tabla 11. Resultados promedio segundo evento de lluvia.....	43
Tabla 12. Resultados promedio pruebas de flujo FLA (0-10 UNT).....	46
Tabla 13. Resultados promedio pruebas de flujo FLA (10-20 UNT).....	47
Tabla 14. Resultados promedio pruebas de flujo FLA (20-30 UNT).....	50
Tabla 15. Resultados promedio pruebas de flujo MUF.....	52

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Ejemplo de filtro lento de arena domiciliario.....	20
Figura 2. Montaje de trenes de tratamiento a escala de laboratorio.....	23
Figura 3. Proceso de filtrado de literatura.....	25
Figura 4. Contenedor en vidrio para FLA.....	27
Figura 5. Estructura de falso fondo.....	28
Figura 6. Filtro lento de arena a escala de laboratorio.....	30
Figura 7. Membrana de ultrafiltración mini filtro cube.	31
Figura 8. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo para el efluente del FLA (0-10 UNT).	46
Figura 9. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo para el efluente del FLA (10-20 UNT).....	49
Figura 10. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo para el efluente del FLA (20-30 UNT).....	51
Figura 11. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo para el efluente de la MUF (0-30 UNT).....	54

Lista de anexos

Ver anexos adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Anexo A. Manual guía de operación y mantenimiento de los prototipos de tratamiento a escala de laboratorio.

Anexo B. Resultados individuales de pruebas de flujo para FLA y MUF.

Resumen

Título: Propuesta de mejoras de diseño hidráulico de dos trenes de tratamiento a escala de laboratorio, para el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del edificio E3T de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Colombia. *

Autores: Carlos Eduardo León Oliveros**

Anderson Arley Muñoz Muñoz**

Palabras Clave: Sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, agua cruda sintética, filtro lento de arena, membrana de ultrafiltración, turbiedad.

Descripción:

El presente proyecto hace parte de los estudios realizados por el grupo de investigación de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) para el sistema de aprovechamiento de agua lluvia del edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) del campus central de la Universidad Industrial de Santander (UIS), y se centró en definir las condiciones técnicas para el montaje, operación y mantenimiento de dos prototipos de tratamiento de agua a escala de laboratorio, un filtro lento de arena (FLA) y una membrana de ultrafiltración (MUF). Además, se analizó la eficiencia de dichas tecnologías con base en la remoción de la turbiedad en muestras de agua cruda sintética mediante pruebas de flujo, dichas muestras se prepararon para 3 rangos diferentes de turbiedad (0-10 UNT, 10-20 UNT y 20-30 UNT). Para el FLA se obtuvieron porcentajes de remoción más altos que para la MUF cuando se proporcionaron turbiedades mayores de 10 UNT en el afluente, valores entre 44% – 76% y entre 47% – 56% respectivamente, sin embargo, los resultados fueron inferiores a los reportados en la literatura para este tipo de tecnologías. Por lo tanto, se determinaron una serie de instrucciones y recomendaciones con las cuales se desarrolló un manual de operación y mantenimiento para el correcto uso de dichos prototipos en futuras investigaciones.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Directora Daniela Cristina Rey Romero. Codirector Edgar Ricardo Oviedo Ocaña.

Abstract

Title: Proposal for improvements in the hydraulic design of two laboratory-scale treatment trains, for the rainwater harvesting system of the E3T building at Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. *

Authors: Carlos Eduardo León Oliveros**

Anderson Arley Muñoz Muñoz**

Keywords: Rainwater harvesting systems, synthetic raw water, slow sand filter, ultrafiltration membrane, turbidity.

Description:

This project is part of the studies carried out by the GPH research group for the rainwater harvesting system of the E3T building at the UIS campus and focused on defining the technical conditions for the assembly, operation, and maintenance of two laboratory-scale water treatment prototypes, a slow sand filter (SSF) and an ultrafiltration membrane (UFM). In addition, the efficiency of these technologies was analyzed based on the turbidity removal in synthetic raw water samples through flow tests, these samples were prepared for 3 different ranges of turbidity (0-10 NTU, 10-20 NTU and 20 -30 NTU). SSF showed higher removal percentages than the UFM when the influent turbidities were greater than 10 NTU, values between 44% - 76% and between 47% - 56% respectively, however, the results were lower than those reported in the literature for these types of technologies. Therefore, there were determined some instructions and recommendations to create an operation and maintenance manual for the correct use of the prototypes in future investigations.

*Degree work

**Physico-mechanical Engineering Faculty, School of Civil Engineering. Director Daniela Cristina Rey Romero. Codirector Edgar Ricardo Oviedo Ocaña.

Introducción

La escasez de agua y el estrés hídrico no son problemas ajenos a ninguno de los cinco continentes y se han incrementado notablemente con el aumento acelerado de la población mundial. Aproximadamente 844 millones de personas en el mundo, la mayoría en países en desarrollo, no tienen acceso a una fuente de agua potable (World Health Organization & UNICEF, 2017). Ante esta problemática, una de las soluciones propuestas para mitigar el impacto que genera la falta del recurso hídrico, es la implementación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias. Estos sistemas consisten en recolectar la precipitación de manera efectiva durante los periodos de lluvia que se registran en la zona de interés, para su posterior tratamiento, debido a que, generalmente, los parámetros de calidad no se ajustan a los estándares para diferentes usos a los cuales podría destinarse (Helmreich & Horn, 2009).

La calidad del agua lluvia depende en gran medida de las fuentes de contaminación presentes en la zona de captación y en su perímetro. Los principales contaminantes en el agua lluvia son partículas sólidas, microorganismos patógenos, sustancias orgánicas y metales pesados provenientes de procesos de combustión, industrias de metales ferrosos y no ferrosos, plantas incineradoras, industrias de cemento o vidrio y el tráfico pesado (Xue & Kang, 2012). Gran parte de estos contaminantes son arrastrados durante los primeros intervalos de tiempo del evento de lluvia, es por eso por lo que, la intensidad de las precipitaciones es un factor clave en el desempeño del sistema de aprovechamiento (Helmreich & Horn, 2009).

Al emplear una tecnología de tratamiento es necesario identificar el uso final que tendrá el agua tratada, debido a que los requerimientos físicos, químicos y biológicos varían según su disposición. Para garantizar que la calidad del agua captada cumpla con los parámetros mínimos necesarios, se deben realizar procesos específicos de tratamiento que podrían variar de acuerdo con cada uso (Gómez & Silva, 2019).

Con el objetivo de contribuir al aprovechamiento del agua lluvia a nivel local, el grupo de investigación de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la UIS ha venido desarrollando proyectos de investigación sobre el tratamiento de estas aguas en el edificio de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones (E3T) del campus central de la UIS, el cual se destaca por ser una construcción verde con tecnologías sostenibles como la generación fotovoltaica y un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias, entre otras (Universidad Industrial de Santander, 2013). El sistema de recolección de aguas lluvias mencionado se pretende implementar para riego de techos verdes y descarga sanitaria, para lo cual cuenta con mecanismos de captación, conducción, almacenamiento y distribución, sin embargo, no está en funcionamiento actualmente (Chinchilla & Paredes, 2019).

En investigaciones previas realizadas por el grupo GPH se desarrolló una revisión bibliográfica sobre los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos importantes en la calidad del agua lluvia (Gómez & Silva, 2019), se realizó el dimensionamiento del tanque para almacenar el agua captada en el sistema de aprovechamiento del edificio E3T y se comparó su eficiencia con el tanque actual (Garzón Peña & Gualdrón Reyes, 2019). Se realizaron otras dos investigaciones donde se estudiaron varios parámetros de calidad en el agua lluvia captada en el edificio E3T (i. e. pH, turbiedad, color, conductividad eléctrica, hierro total, nitratos y nitritos, sulfatos, cloruros, dureza total, alcalinidad total, sólidos totales, plomo, coliformes totales y E. coli.), concluyendo

que es necesario someter esta agua a un tratamiento con el fin de emplearla en los usos mencionados anteriormente (Chinchilla & Paredes, 2019)(García & Rivera, 2020). Por lo tanto, en una de estas investigaciones se propusieron dos trenes de tratamiento para mejorar las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua; uno con un FLA y otro con una MUF. Además, cada uno de estos trenes propuestos cuenta con un desviador de primer flujo, un tanque sedimentador y una etapa de desinfección mediante cloración (García & Rivera, 2020).

Con el fin de avanzar en la posible implementación del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en el edificio de la Escuela E3T, en esta investigación se analiza el desempeño hidráulico de los dos trenes de tratamiento propuestos por García y Rivera (2020), mediante el montaje y pruebas de flujo de los prototipos a escala de laboratorio dentro de las instalaciones de la UIS. Los resultados de este estudio permitieron crear una guía de operación y mantenimiento que sirve como punto de partida para su análisis de eficiencia en futuras investigaciones.

1. **Objetivos**

1.1. **Objetivo General**

Proponer mejoras de diseño hidráulico de dos trenes de tratamiento a escala de laboratorio, para el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del edificio E3T de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

1.2. **Objetivos específicos**

Analizar el desempeño de los prototipos a escala de laboratorio en términos de parámetros hidráulicos.

Definir las condiciones de operación y mantenimiento requeridas para la puesta en marcha de los prototipos.

2. Marco Teórico

2.1. Agua lluvia y sus características

En términos generales, la calidad del agua lluvia está influenciada por las condiciones atmosféricas locales y la superficie sobre la cual el agua drena antes de ser captada (Hagemann, S.E., Gastaldini, 2016). Los factores atmosféricos como la presión, la humedad y la temperatura son, en gran parte, los responsables de la frecuencia, duración e intensidad de las precipitaciones, es por eso por lo que las lluvias pueden variar significativamente de un lugar a otro (Lani et al., 2018).

Las características de la precipitación también pueden influir en la cantidad de impurezas transportadas por el agua lluvia después de que pasa a través de una superficie de captación (Hagemann, S.E., Gastaldini, 2016). Por esta razón, las características del agua lluvia dependen totalmente de la zona donde se presenten las precipitaciones y de las fuentes de contaminación que estén en ella: en espacios rurales es más común que la calidad del agua recolectada sea mejor que en las grandes zonas urbanas donde abundan las industrias y se concentra una mayor población (Xue & Kang, 2012). La contaminación de la escorrentía de agua lluvia en áreas urbanas puede causar enriquecimiento de nutrientes y eutrofización en las aguas receptoras (Xu et al., 2020).

2.2. Uso del agua lluvia

Debido a la escasez del recurso hídrico, en diferentes regiones del mundo surge una solución que proporciona un alivio ante el déficit del suministro hídrico en estos lugares. Esta alternativa

consiste en implementar sistemas de aprovechamiento de agua lluvia los cuales se enfocan en la recolección, el transporte, el almacenamiento y el posible tratamiento de la escorrentía superficial generada por las precipitaciones (Helmreich & Horn, 2009).

El agua lluvia recolectada se puede implementar para uso agrícola en el riego de cultivos y para uso doméstico en el lavado de zonas cementadas como calles, pisos y fachadas, en la descarga sanitaria y para riego de jardines. Dependiendo del uso que se le dé, esta agua necesita cumplir con estándares de calidad mínimos (Helmreich & Horn, 2009). Globalmente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) es la encargada de generar guías que funcionen como base orientativa a todos los países. En el año 1976, la OMS adoptó la “Guidelines for drinking-water Quality”, la cual define de manera universal las bases necesarias para el establecimiento de legislaciones y estándares nacionales de seguridad hídrica (López, 2017). La cuarta edición de esta Guía expedida en el año 2011 se refiere al agua lluvia de manera independiente de los sistemas tradicionales de suministro y gestión del agua, concretamente en el punto 6.2: “Application of the guidelines in specific circumstances” (WHO, 2011). La sección 7.3.2 y 8.4.4 de la Guía detallan específicamente para el agua lluvia, tecnologías de tratamiento (microbiológico y químico respectivamente) (López, 2017). Por otro lado, en Colombia, la Resolución 2115 de 2007 expone las características que debe tener el agua para considerarse potable y a su vez se expidió “La ley 373 de 1.997 de uso eficiente del recurso hídrico”, que obliga a los proyectos de construcción a reciclar agua lluvia (Grupo EPM, 2016).

2.3. Tecnologías de tratamiento

Existen múltiples alternativas tecnológicas que permiten dar un tratamiento al agua lluvia recolectada. Dichas tecnologías varían según la etapa del proceso, el grado de remoción de contaminantes y el costo de implementación, operación y mantenimiento (García & Rivera, 2020). Algunas de las tecnologías empleadas en el tratamiento preliminar son: desviador de primer flujo y sedimentador (Helmreich & Horn, 2009). Para el tratamiento primario se tiene: filtración lenta en arena, coagulación/ floculación, humedales construidos, filtración por membranas y filtración mediante carbón activado. Para el proceso de desinfección existe: cloración y desinfección UV, entre los más utilizados (Helmreich & Horn, 2009). A continuación, se describen las tecnologías empleadas en los trenes de tratamiento que se analizaron en esta investigación.

2.3.1. *Sedimentador:*

Es una tecnología que está diseñada para eliminar sólidos suspendidos por sedimentación. La baja velocidad del flujo en un sedimentador permite que las partículas sedimentables se hundan, mientras los componentes que pesan menos que el agua flotan hacia la superficie. Diferentes tecnologías de tratamiento requieren sedimentación previa para funcionar de manera adecuada, por lo que esta tecnología es muy común, tanto en zonas rurales como en zona urbanas (Chamorro et al., 2019).

2.3.2. Filtración lenta en arena:

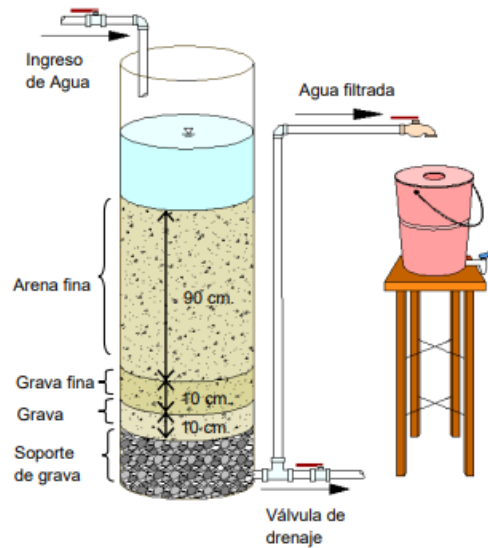
Es el sistema de tratamiento de agua más antiguo utilizado por la humanidad. Es relativamente sencillo y efectivo porque se basa en el proceso de purificación que se da en la naturaleza al atravesar el agua lluvia a través de los estratos de la corteza terrestre hasta encontrar los acuíferos (Lidia & Vargas, 2010). Los filtros lentos de arena (FLA) son habitualmente depósitos que contienen capas de arena graduada hasta una profundidad de 0.5 a 1.5 m, con la fracción más gruesa en la parte inferior y el nivel más fino en la parte superior (con partículas de tamaño efectivo de 0.15 a 0.3 mm) (Gómez & Silva, 2019).

Esta técnica de filtración es un tratamiento de bajo costo y fácil implementación, en donde el tratamiento se logra mediante un ecosistema controlado de microorganismos y filtración a través de la arena. La calidad del efluente está influenciada principalmente por el flujo del agua, la profundidad de la columna de arena y la granulometría del material utilizado (Huisman & Wood, 1974).

Uno de los aspectos más significativos a considerar sobre los FLA es la capa biológica que se forma en la superficie del lecho filtrante, debido a su importancia, se han realizado investigaciones sobre su formación y las condiciones bajo las cuales debe permanecer para garantizar la eficiencia del filtro. Al respecto, Lea (2014) concluyó que el tiempo de maduración de esta capa es de aproximadamente 30 días, asimismo recomienda que el agua cruda debe ser suministrada de forma continua con un régimen constante con periodos de pausa de mínimo 1 hora y máximo 48 horas, la temperatura debe ser ideal (i.e. 20 °C) para la formación de los microorganismos y además es preciso asegurar que reciba el oxígeno necesario para los procesos metabólicos. En la Figura 1 se puede observar un ejemplo de un FLA domiciliario.

Figura 1

Ejemplo de filtro lento de arena domiciliario.



Nota: Tomado de *Calidad del Agua en Sistemas de Abastecimiento en Poblaciones Rurales Dispersas* (p. 16) por Universidad Mayor de San Simón, 2008.

2.3.3. Filtración por membrana:

Este proceso puede definirse como la separación de materiales de un fluido pasando la mezcla a través de un medio poroso. Las membranas son películas delgadas de materiales sintéticos orgánicos o inorgánicos, que pueden producir una separación selectiva entre un fluido y sus componentes (Du et al., 2019).

Entre las ventajas del uso de la tecnología de membrana se destaca que es un proceso que requiere de poco espacio, opera grandes flujos a baja presión (solo los modelos más recientes) y generalmente no requiere de tratamiento químico (Katrivesis et al., 2021). Entre sus inconvenientes está la difusión de moléculas cerca de la superficie de la membrana, creando una

barrera que reduce el paso de fluido a través de la membrana y la eficiencia del tratamiento; fenómeno conocido como ensuciamiento de la membrana (membrane fouling). El tratamiento con flujo tangencial ayuda a prevenir este inconveniente, sin embargo, se recomienda limpieza periódica de la membrana para alargar su vida útil y mantener la efectividad del proceso (Choi et al., 2005).

2.4. Antecedentes

En este país, se han desarrollado proyectos relacionados con el aprovechamiento del agua lluvia en edificaciones institucionales. Por ejemplo, en el campus de la Universidad Pontificia Javeriana se realizaron diversos estudios con el fin de dar uso al agua lluvia para lavado de fachadas y zonas duras, descarga sanitaria y riego de zonas verdes (Borrero et al., 2007). En dichos estudios, se analizó la variabilidad de los parámetros según el punto donde se toma la muestra. Se recolectó en 10 puntos diferentes, entre los cuales se encuentran el sistema de drenaje de la cancha de fútbol, cubiertas de parqueaderos y edificios, sumideros y cajas de inspección. Se concluyó que efectivamente existen diferencias significativas entre la calidad de agua en un punto o en otro, resultando más contaminada la que tiene contacto con material orgánico, como la del sistema de drenaje de la cancha de fútbol (Solarte & González, 2012). Actualmente la Pontificia Universidad Javeriana reutiliza las aguas lluvias almacenándolas en tanques y en el humedal artificial, para el riego del Jardín Botánico (Grupo Energía Bogotá, 2015).

Otros antecedentes relevantes para este estudio son las investigaciones realizadas por Chinchilla y Paredes (2019) y, García y Rivera (2020), quienes basaron su estudio en la propuesta de alternativas de tratamiento que permitiesen la puesta en operación del sistema de recolección

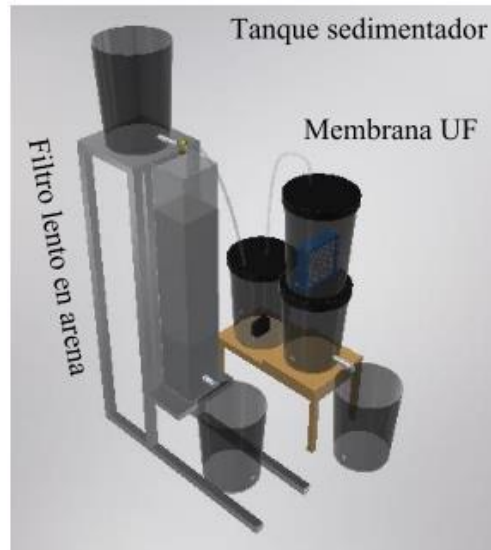
de aguas lluvias del edificio de E3T. Se evaluaron parámetros tales como, pH, turbiedad, color, conductividad eléctrica, hierro total, nitratos y nitritos, sulfatos, cloruros, dureza total, alcalinidad total, sólidos totales, plomo, coliformes totales y E. coli.

Según Chinchilla y Paredes (2019), 5 parámetros (pH, turbiedad, plomo, coliformes totales y E. coli.) de los 15 estudiados no cumplen con los requisitos propuestos por alguna de las normativas vigentes relacionadas a la calidad del agua lluvia. Mientras que García y Rivera (2020) afirman que el 74% de los parámetros caracterizados cumplen con los lineamientos, los 4 restantes (turbiedad, color, coliformes totales y E. coli.) incumplen los límites establecidos en las normativas consultadas. Los resultados obtenidos por estos autores demuestran que la calidad del agua lluvia recolectada no es apta para reutilización sin previo tratamiento (Chinchilla & Paredes, 2019) (García & Rivera, 2020).

La conclusión del estudio de García y Rivera (2020) derivó en la propuesta de dos trenes de tratamiento que operan en tres etapas (Figura 2); inicialmente un tratamiento preliminar que consta de un desviador de primer flujo que impide el paso de los primeros milímetros de precipitación, ya que estos son los que mayor grado de contaminación poseen y un tanque sedimentador para descartar las partículas no disueltas y sólidos suspendidos, un tratamiento primario que varía para los dos trenes, el primero con un método de filtración por cono de arena y el segundo por medio de una membrana de ultrafiltración, los cuales se encargan de eliminar las partículas en suspensión, y por último una etapa de desinfección mediante cloración, con el fin de eliminar microorganismos y bacterias que puedan representar riesgos a la salud (García & Rivera, 2020).

Figura 2

Montaje de trenes de tratamiento a escala de laboratorio.



Nota: Tomado de Propuesta de tecnologías para el tratamiento del agua en el sistema de aprovechamiento de agua lluvia del edificio de la escuela de Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones en el campus central de la Universidad Industrial de Santander (p. 47) por García & Rivera, 2020.

3. Metodología

3.1. Revisión de literatura

Se realizó una revisión bibliográfica a través de los buscadores Sciencedirect®, Scopus® y Google Scholar®, esta se compuso de 3 búsquedas cada una de ellas con un enfoque específico.

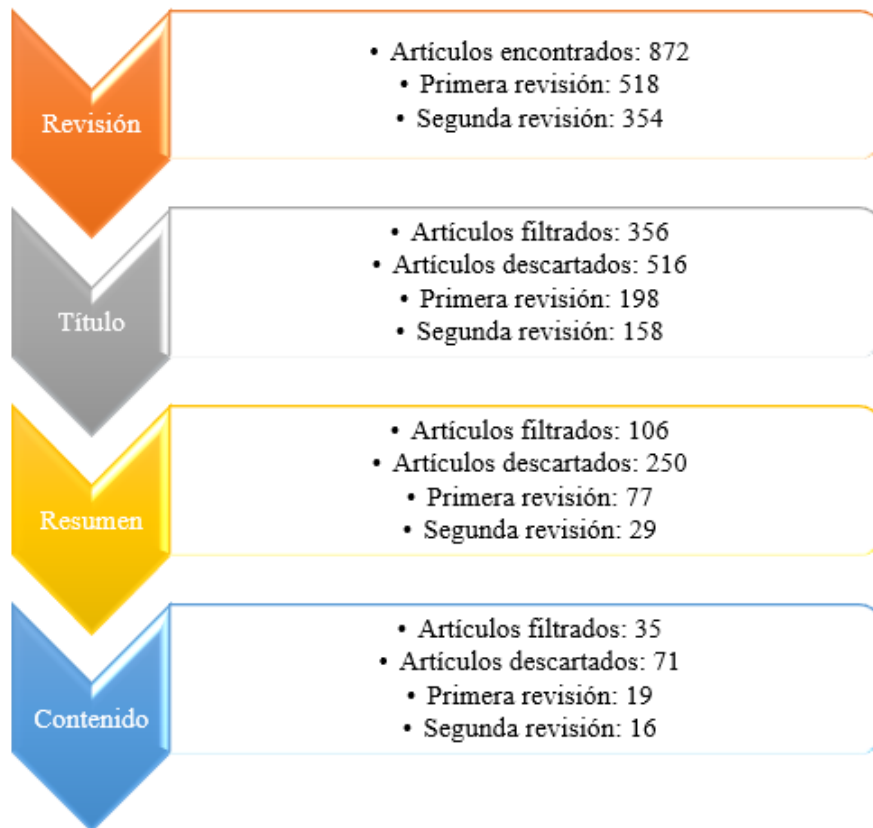
La primera, con el fin de afianzar los conceptos generales del tema de investigación y establecer un marco teórico sobre el cual se basó el proyecto: estudios relacionados con los tipos de tratamiento utilizados en la presente investigación y los parámetros de calidad que se analizaron, para tal fin se utilizaron palabras claves como “slow sand filter”, “ultrafiltration membrane”, “turbidity”, “efficiency” y las posibles combinaciones entre ellas. La segunda se enfocó en los montajes de trenes de tratamiento a escala de laboratorio, con el objeto de conocer los posibles inconvenientes de su implementación y aspectos para tener en cuenta durante este estudio, se utilizaron las palabras claves de la primera búsqueda y adicionalmente “institutional building”, “campus university”, “treatment technologies” y/o “laboratory prototypes”. Por último, se realizó la revisión de los 4 artículos hechos por los estudiantes de la Universidad Industrial de Santander y el grupo GPH en investigaciones previas. Además, se estudiaron los manuales guía de operación y mantenimiento de la MUF proporcionados por la empresa alemana Martin Systems.

Para las dos primeras búsquedas se hizo un filtrado de los documentos de tal manera que se simplificara la cantidad de información a la necesaria para esta investigación. Este proceso se describe a continuación.

- Por título: Se seleccionaron los artículos que tenían relación con las palabras claves de cada búsqueda.
- Por resumen: Después de escoger los títulos se procedió a la lectura de sus respectivos resúmenes, donde se eligieron aquellos que tenían información acorde con los objetivos de esta investigación y/o aportaban información complementaria para estos.
- Por contenido: Se seleccionaron los artículos que tuvieran información específica sobre los temas de interés para esta investigación.

Figura 3

Proceso de filtrado de literatura.



3.2. Montaje y puesta en operación de los prototipos

La primera actividad que se realizó fue una visita al laboratorio con el fin de hacer un reconocimiento de los materiales que conformaban los dos prototipos y del estado de estos. Esta inspección permitió inventariar las piezas existentes y compararlas con las necesarias descritas en

diseño propuesto por García y Rivera (2020). Basado en lo observado, se prosiguió a hacer una lista de los accesorios faltantes para su adquisición.

Además de esto, se hizo un reconocimiento de la zona de captación, la cual se encontraba con escombros y al aire libre haciéndola propensa a fuentes de contaminación. Esta zona se había intervenido mediante un cerramiento en hoja metálica y estacas de madera, sin embargo, una parte de este se encontraba colapsada y requirió ser instalada nuevamente.

3.2.1. Descripción y montaje de los trenes de tratamiento

Los prototipos de los trenes de tratamiento cuentan con tres etapas: sedimentación, filtración y desinfección. Para la primera de estas se utilizó un recipiente cilíndrico plástico de 18 L de volumen que funciona como tanque sedimentador en el cual se espera sean removidas las partículas o sólidos suspendidos de mayor tamaño. Este tanque es compartido entre ambos trenes de tratamiento y su efluente fluye a cada uno de ellos mediante una conexión tipo “Y” de ½ pulgada de PVC. La segunda etapa es el eje central del tren de tratamiento y consta de un FLA para el primer tren de tratamiento y una MUF para el segundo. Para la tercera etapa, cada tren de tratamiento incluye una etapa de cloración, sin embargo, esta etapa no fue objeto de estudio durante esta investigación. La construcción de cada una de las tecnologías de tratamiento empleadas en la etapa de filtración se describe detalladamente a continuación:

3.2.2. Filtro lento de arena

Para la construcción del contenedor del FLA se emplearon cuatro placas de vidrio de 17.8x120x0.6 cm para las paredes y una placa de 17.8x17.8x0.6 cm para la base. En una de las caras se hizo un agujero de ½ de pulgada de diámetro y a 9 cm de altura de la base se ubicó en él una llave de salida del flujo ya filtrado. Este contenedor fue construido por integrantes del grupo GPH.

Figura 4

Contenedor en vidrio para FLA.



Debido a la altura a la que se instaló la llave de salida se consideró necesaria la implementación de un falso fondo que garantizara la retención del material granular para evitar al máximo la pérdida de este. Para esto se optó por utilizar acero 304 (alimentos) ya que generaba un grado de resistencia alto y no alteraba las muestras de agua filtrada.

Figura 5

Estructura de falso fondo.



Debido a que la llave de salida del filtro no se instaló a nivel de la base del contenedor se dedujo que habría un volumen de agua que quedaría empozado en el fondo el cual podría generar problemas operativos y de detrimento de la calidad del efluente. Para evitar esta situación, se propuso instalar un sistema de drenaje; para lo cual se realizó un agujero de 8 mm de diámetro en una esquina del falso fondo y se instaló una manguera del mismo diámetro, dejando así una vía de acceso a la zona de empozamiento, permitiendo mediante principio de sifón, el vaciado ocasional de la zona cuando se necesite hacer una limpieza o mantenimiento del filtro.

El material granular utilizado para construir el filtro se seleccionó mediante el tamizaje en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la UIS. Parte de este proceso lo realizaron García y Rivera (2020) quienes empaclaron el material en costales de fibra y los almacenaron en el

laboratorio de Hidráulica de la UIS; sin embargo, el material disponible no fue suficiente para alcanzar el espesor mínimo de las capas granulares, por lo que fue necesario adquirir más. Este material fue sometido a un lavado con el fin de eliminar partículas extrañas contenidas en él (i. e. polvo, arcillas, residuos orgánicos, etc.).

Posteriormente se procedió a depositar el material granular, quedando la grava en el fondo y la arena en la parte superior. En la Tabla 1 se observan los diámetros de partícula y espesores de las capas de material granular.

Tabla 1

Granulometría usada y espesores de capa para el lecho de filtrado.

Capa de material	Diámetro de las partículas (mm)	Espesor de la capa (cm)
Arena	0.15 – 0.30	47
Gravilla	1.6 – 2.1	24
Grava	9.52 – 25.4	4

Por último, se llenó el filtro con agua de la red domiciliaria hasta 5 cm por encima de la superficie de arena, esto para garantizar la supervivencia de los microorganismos que crecerán y serán los encargados de eliminar los patógenos presentes en el agua a tratar. Para que esta capa microbiológica fuese lo suficientemente madura, se dejó el filtro lleno durante 30 días para luego comenzar con las pruebas de flujo. En la Figura 6 se puede observar el filtro ya construido a escala de laboratorio.

El proceso de ensamblaje y los materiales utilizados para la construcción del FLA se describen con más detalle en el manual guía de operación y mantenimiento de los prototipos (Anexo A).

Figura 6

Filtro lento de arena a escala de laboratorio.



3.2.3. Membrana de Ultrafiltración

La tecnología de tratamiento usada para filtración en el segundo tren de tratamiento es un “mini filtro CUBE®” fabricada por la empresa alemana Martin-Systems (Figura 7) de dimensiones 250x75x260 mm. Este se basa en un sistema de membranas de ultrafiltración sumergibles, las

cuales tienen poros con un tamaño nominal de 35 nm creando una barrera física contra patógenos como helmintos, protozoos, bacterias y algunos virus (Martin Systems, 2005). Para dar uso a la membrana se deben realizar dos procesos previos, la instalación y la activación.

Figura 7

Membrana de ultrafiltración mini filtro cube.



La instalación de la membrana se realizó utilizando dos baldes plásticos de 18 L de capacidad dispuestos uno encima del otro: el primero, colocado en la parte superior para ubicar el módulo de filtración, con un tubo de 8 mm ubicado en la parte inferior en el que se conecta la membrana y por el cual sale el agua filtrada, a este también se le insertó un tubo de PVC en la parte superior con el fin de controlar el nivel del agua en la parte más alta; el otro debajo del

primero, con una llave de paso de aluminio con diámetro de ½ pulgada en la parte baja para recolectar las muestras de agua filtrada y un agujero de 8mm en la tapa del balde por el cual entra el agua proveniente de la membrana. Esta instalación fue realizada por el grupo GPH.

El proceso de activación de la membrana se realiza para limpiarla y eliminar posibles contaminantes patógenos en ella y además garantizar el flujo completo a través de la membrana. Para conseguirlo se debe sumergir el módulo en una solución de hipoclorito de sodio durante 3 horas, en el balde donde se instala. Desde que se activó la membrana con la solución, esta se dejó sumergida en agua potable todo el tiempo hasta su posterior uso, siguiendo las recomendaciones del fabricante. El proceso de instalación y activación de la MUF se describen con más detalle en el Anexo A.

3.2.4. Pruebas de flujo preliminares

El primer objetivo de estas pruebas fue determinar los caudales y volúmenes de agua requeridos por cada tren para operar de manera eficiente durante el proceso de tratamiento. Además, se usaron para verificar que no existían fisuras, fugas o fallas en el sistema. Para esto, se inició la operación de los dos prototipos de manera conjunta usando agua potable. Para los caudales afluentes de cada sistema se tomaron volúmenes de un litro (1 L) con ayuda de un recipiente plástico graduado en cada una de las ramificaciones de la “Y” y, mediante un cronómetro, se midió el tiempo de llenado. El volumen de agua requerido para realizar una corrida en ambos trenes fue de 43 L.

El segundo objetivo de las pruebas preliminares fue definir los posibles caudales de entrada desde el tanque sedimentador a cada uno de los sistemas de tratamiento. Para tal fin, se definieron tres diferentes rangos de apertura de la llave del tanque desde la posición inicial (llave cerrada) hasta la posición final (llave totalmente abierta). Se pudo observar que la llave no daba una vuelta completa (360°) respecto de su posición inicial, por lo que se determinaron los posibles rangos de apertura de la llave con base en la fracción de vuelta en la que se colocaba la llave. La Tabla 2 muestra estos rangos.

Tabla 2

Rangos de apertura de llave del tanque sedimentador.

Nivel de apertura	Fracción de vuelta
Llave totalmente abierta	3/4 (270°)
Llave semiabierta	1/2 (180°)
Llave parcialmente abierta	1/4 (90°)

Basado en estos rangos, se calcularon los diferentes caudales de entrada ofrecidos por cada nivel de apertura. Además, se tuvo en cuenta que el caudal de entrada a los trenes también se ve afectado por la carga hidráulica generada cuando el tanque sedimentador está totalmente lleno y en su nivel mínimo (cuando la lámina de agua se encuentra a la misma altura que la llave de salida). Los caudales que se obtuvieron bajo las diferentes condiciones de operación se presentan en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3

Caudales de entrada con tanque sedimentador lleno.

Nivel de apertura	Caudal [L/h]
Llave totalmente abierta	86.4
Llave semiabierta	46.8
Llave parcialmente abierta	10.8

Tabla 4

Caudales de entrada con tanque sedimentador al mínimo.

Nivel de apertura	Caudal [L/h]
Llave totalmente abierta	57.6
Llave semiabierta	38.4
Llave parcialmente abierta	4.43

Teniendo los valores de caudal de entrada posibles, se continuó con la evaluación de cada tecnología de tratamiento de manera individual con el fin de conocer parámetros hidráulicos para cada uno. Los resultados obtenidos para el FLA se presentan en las Tablas 5 y 6, mientras que los resultados de la MUF se observan en la Tabla 7.

Tabla 5*Tiempos de operación del FLA.*

Parámetro analizado	Tiempo [min]
Llenado del filtro	47
Vaciado del filtro sin la zona de empozamiento	13
Vaciado de la zona de empozamiento	4
Tiempo de retención hidráulica	15

Tabla 6*Caudales de operación del FLA.*

Parámetro analizado	Caudal [L/h]
Caudal mínimo del efluente	12.6
Caudal máximo del efluente	75.8
Caudal promedio del efluente	37

Tabla 7*Caudales de filtración de la MUF.*

Parámetro analizado	Caudal [L/h]
Caudal mínimo del efluente	1.07
Caudal máximo del efluente	7.64
Caudal promedio del efluente	5.54

Observando los resultados obtenidos en cuanto a la tasa de filtración de cada tecnología, se optó por alimentar cada sistema de manera individual con el efluente proporcionado por el tanque sedimentador lleno y la llave de este parcialmente abierta, es decir, un caudal de 10.8 L/h. En un estudio similar se evidencia cómo los caudales de entrada deben ser regulados y disminuidos al punto de un flujo laminar con el fin de evitar la re-suspensión de partículas (Temesgen et al., 2015).

3.2.5. Muestreo

El muestreo de agua lluvia se realizó con el fin de probar el desempeño de los trenes con el agua lluvia recolectada en una de las cajas de inspección del sistema de aprovechamiento en el edificio E3T. A esta caja llegan 5 tuberías de las cuales una funciona como medio de conducción al tanque de almacenamiento, una para la liberación de presión, una que transporta aguas grises que no está en uso y dos tuberías ubicadas en sentido norte – sur y sur – norte, que transportan el agua lluvia proveniente de las áreas de captación, de la cual se tomaron las muestras.

El muestreo se planificó para cinco (5) lluvias; sin embargo, debido a las pocas precipitaciones presentadas en la zona de estudio durante el desarrollo de la investigación, este solo se realizó durante dos (2) eventos de precipitación diferentes utilizando el mismo procedimiento para cada uno de ellos, el cual se detalla a continuación.

- Se calculó el volumen de agua lluvia requerido sumando la cantidad necesaria para cada uno de los trenes de tratamiento.

- Una vez iniciado el evento de precipitación se esperaron al menos 10 minutos para tomar la muestra, esto con el fin de eliminar los primeros milímetros de precipitación.
- Se utilizaron dos baldes de 18 L de capacidad para recolectar y transportar la muestra al laboratorio, en donde se almacenaron en tres tanques de 37 L cada uno.

Después de recolectar el agua lluvia durante cada uno de los eventos se procedió a realizar dos recorridos de agua lluvia en las dos tecnologías de tratamiento y se hicieron pruebas de turbiedad, pH y conductividad eléctrica antes y después de cada una de las corridas con el fin de observar la eficiencia de dichos prototipos en el tratamiento de agua lluvia; sin embargo, debido a la ausencia de precipitación en la zona de estudio durante el tiempo de investigación se optó por utilizar agua cruda sintética para tal fin.

3.2.6. Pruebas de flujo con agua cruda sintética

Para estas pruebas se utilizó agua cruda sintética preparada en el laboratorio GPH de la UIS mediante la toma de una muestra de suelo del perímetro del área de captación, la cual se mezcló con agua potable con el fin de simular la turbiedad presente en las muestras de agua lluvia que se recolectaron previamente. Se definieron tres rangos de turbiedad (0-10 UNT, 10-20 UNT y 20-30 UNT) basados en los resultados obtenidos de las muestras de agua lluvia para evaluar la capacidad del sistema frente a diferentes condiciones de calidad del agua y, para cada rango, se realizaron cinco pruebas de flujo continuo.

Las pruebas de flujo se hicieron durante 90 minutos cada una, debido a que con este tiempo se observaban valores de turbiedad casi constantes en el afluente tanto para el FLA como para la

MUF. Para los dos tratamientos, se tomaron muestras cada 5 minutos con el fin de analizar el comportamiento de la turbiedad con respecto al tiempo.

3.2.6.1. Pruebas de flujo a través del FLA. En cada prueba para el FLA se variaron los valores de turbiedad, manteniéndolos en el rango ya definido, con el objetivo de determinar los aspectos críticos del filtro tales como valor mínimo de turbiedad alcanzado y tiempo máximo de operación. Uno de los aspectos que se tuvo en cuenta durante las pruebas en el FLA, fue que el agua cruda sintética debía mezclarse constantemente en el tanque sedimentador debido a que la turbiedad de las muestras variaba drásticamente en apenas 5 minutos o menos, dejando turbiedades diferentes de las medidas al inicio de la prueba. Para conseguir la turbiedad deseada en cada uno de los rangos se utilizaron las cantidades que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Materiales utilizados para crear agua cruda sintética para el FLA.

Material	Rango de turbiedad [UNT]		
	0-10	10-20	20-30
Agua [L]	60	60	60
Suelo [g]	30	40	50

3.2.6.2. Pruebas de flujo a través de la MUF. En este tren de tratamiento, el contenedor donde fue instalada la membrana está directamente conectado con otro encargado de

almacenar el agua filtrada por el sistema. Para minimizar el error en los resultados se optó por trabajar el contenedor de la membrana de manera individual, de tal manera que el filtrado no se almacenara, sino que, por el contrario, fluyera, obteniendo así un valor de turbiedad independiente para cada tiempo; esta solución solo es recomendada con fines prácticos para conocer la eficiencia real de la MUF; para la correcta operación del tren de tratamiento, los dos recipientes deben estar conectados. Durante el proceso de estas pruebas de flujo se garantizó la operación de la membrana totalmente sumergida, con una lámina de agua sobre ella de 4 cm. Con el fin de simular la turbiedad en el agua cruda se utilizaron los materiales que se observan en la Tabla 9.

Tabla 9

Materiales utilizados para crear agua cruda sintética para la MUF.

Material	Rango de turbiedad [UNT]		
	0-10	10-20	20-30
Agua [L]	30	30	30
Suelo [g]	10	20	30

3.2.7. Medición de los parámetros de calidad de agua lluvia

La medición de los parámetros de calidad durante la presente investigación se realizó en el laboratorio del grupo GPH ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la UIS y para la presentación de los resultados se creó una nomenclatura para identificar cada muestra donde: AC significa agua

cruda, AFM1 y AFM2 es afluente del filtro y de la membrada en la primera y segunda corrida respectivamente; EM1, EM2, EF1 y EF2 representan el efluente de la membrana y del filtro durante el primer y segundo recorrido de agua lluvia respectivamente. Para cada una de las muestras se midió turbiedad, pH y conductividad eléctrica, excepto para las muestras AFM1 y AFM2, a las cuales solo se les midió la turbiedad con el fin de corroborar que los valores se encontraban dentro de los rangos analizados. En estos casos los resultados se presentan con la abreviatura NA (no aplica).

3.2.7.1. Turbiedad. Para la medición de la turbiedad se utilizó un turbidímetro Hach 2100q portable con el que cuenta el grupo GPH, el cual realiza mediciones precisas de turbiedad de forma sencilla. Inicialmente se enciende y se calibra el aparato con los botones dispuestos en él para este fin, posteriormente se utilizan las celdas que vienen en el kit para colocar las muestras de agua dentro del turbidímetro, y, por último, se presiona el botón de medición. El resultado obtenido aparece en pantalla en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).

3.2.7.2. pH y conductividad eléctrica. La medición de estos parámetros se realizó con un equipo multiparámetro portátil marca Mettler Toledo. Este dispositivo incorpora dos sensores individuales, cada uno asociado a un parámetro diferente, lo cual permite el funcionamiento del equipo de manera individual o conjunta para cada medición. Para este estudio se trabajó de manera conjunta ambos parámetros. El primer paso que se hizo fue la calibración del sensor de pH para luego hacer la limpieza de ambos sensores con agua

destilada. Cada medida se hizo de manera automática, es decir que, se sumergió cada sensor en un recipiente con la muestra de agua y se oprimió el botón destinado para hacer las lecturas, las cuales se manifestaban poco tiempo después en la pantalla del mecanismo.

4. Resultados y discusiones

4.1. Desempeño de los trenes de tratamiento con las muestras de agua lluvia

Con estos resultados se pudo evidenciar la poca eficiencia e incluso el incremento de la turbiedad y de la conductividad eléctrica por parte del FLA. La MUF tuvo un comportamiento casi constante durante el proceso de operación, como se puede observar en las Tablas 10 y 11. Por su parte, el filtro inicialmente presentó una eficiencia muy alta, reduciendo la turbiedad del efluente a 2.0 UNT (esto posiblemente debido a que se dejó durante más de un mes sumergido en agua potable). Con el recorrido del agua lluvia fue incrementando cada vez más el nivel de turbiedad. Para la segunda corrida del primer evento hay un aumento significativo en la turbiedad, esto se debe a las condiciones de operación con las que se trabajó, pues no se tuvieron en cuenta aspectos como los caudales de entrada y de salida, el vaciado del prototipo o el lavado del lecho filtrante. Antes del segundo evento de precipitación, además de no tener en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, el filtro permaneció sumergido en agua lluvia durante más de un día, lo que podría explicar el aumento considerable en la turbiedad.

Por otra parte, el incremento en la conductividad eléctrica se explica por el aumento en la concentración de iones de la muestra cuando entra en contacto con el medio filtrante (Maciel & Sabogal-Paz, 2020).

Tabla 10

Resultados promedio primer evento de lluvia.

Muestra	Turbiedad	pH	Conductividad eléctrica
primer evento	(UNT)		(μS/cm)
AC	15.2	7.71	87.6
AFM1	12.9	NA	NA
AFM2	11.4	NA	NA
EM1	9.2	7.7	89.3
EM2	10.4	7.8	87.3
EF1	2.0	7.8	334.7
EF2	35.8	8.0	109.9

Nota: AC: Agua cruda; AFM1 – AFM2: Afluente filtro y membrana (primera y segunda corrida); EM1 – EM2: Efluente membrana (primera y segunda corrida); EF1 – EF2: Efluente filtro (primera y segunda corrida); NA: No aplica.

Tabla 11*Resultados promedio segundo evento de lluvia.*

Muestra segundo evento	Turbiedad (UNT)	pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)
AC	11.3	7.84	88.8
AFM1	8.02	NA	NA
AFM2	8.0	NA	NA
EM1	5.8	7.8	80.0
EM2	5.5	7.9	85.6
EF1	15.0	8	145.2
EF2	36.7	7.9	103.8

Nota: AC: Agua cruda; AFM1 – AFM2: Afluente filtro y membrana (primera y segunda corrida); EM1 – EM2: Efluente membrana (primera y segunda corrida); EF1 – EF2: Efluente filtro (primera y segunda corrida); NA: No aplica.

4.2. Pruebas de flujo con agua cruda sintética en FLA

Después de realizar las pruebas de flujo con todos los rangos de turbiedad se optó por analizar los resultados de forma gráfica para cada uno de ellos, agrupando los resultados promedios obtenidos por rango de turbiedad en las 5 pruebas, los resultados individuales para cada una de las pruebas se observan en el Anexo B.

4.2.1. Pruebas de flujo (0 – 10 UNT)

Con el fin de definir las condiciones técnicas adecuadas para el funcionamiento del FLA, en cada una de estas pruebas se variaron algunas condiciones de operación.

Para la primera prueba se vació totalmente el filtro, incluyendo la zona de empozamiento, causando que al momento de llenarse nuevamente se re-suspendieran las partículas depositadas en el fondo. Además, se consideraron los caudales máximos de entrada y de salida, lo que posiblemente promovió el arrastre de partículas en la parte superior e inferior del lecho filtrante. El aumento en la curva de turbiedad (Figura 8) después de los 50 minutos se debe a que el tanque sedimentador se vació durante el ensayo, por lo que fue necesario llenarlo nuevamente para completar el tiempo de la prueba, ocasionando que los sólidos sedimentados en el fondo del recipiente se mezclaran con la muestra.

Para la segunda prueba se intentó controlar la re-suspensión de partículas vaciando el lecho filtrante y dejando llena la zona de empozamiento, adicionalmente el caudal de salida del filtro se disminuyó; los valores iniciales de turbiedad fueron mayores que los del afluente porque, al alimentar nuevamente el filtro, las partículas que conforman la capa superior de la arena se revuelven aumentando la cantidad de sólidos suspendidos en el agua.

En la tercera prueba se vació únicamente el lecho filtrante, sin embargo, a los 30 minutos de la prueba se aumentó el caudal de salida al máximo con el fin de observar el comportamiento de la turbiedad bajo esta condición, generando un pico en la gráfica. A partir de esto, se concluyó que no es recomendable utilizar un caudal de salida alto ya que la velocidad del efluente aumenta,

generando un mayor arrastre de partículas en el lecho filtrante y en el fondo de la zona de empozamiento.

Antes de la cuarta prueba se realizó un lavado del filtro con agua potable debido a los resultados obtenidos al final del tercer ensayo, por lo que se vació completamente el filtro (incluida la zona de empozamiento). Esto explica el aumento de la turbiedad durante los primeros minutos del experimento, posteriormente se trabajó con caudales de entrada y salida al mínimo y el tanque sedimentador se mantuvo lleno constantemente.

Para la quinta prueba se vació únicamente el lecho filtrante, los caudales de entrada y de salida se proporcionaron al mínimo y el tanque sedimentador se mantuvo lleno. Con estas condiciones de operación se consiguió un comportamiento más uniforme de la curva y un mayor porcentaje de remoción de partículas.

Con base en los resultados obtenidos durante los cinco ensayos se definió que las condiciones con las que se debe trabajar el filtro son las utilizadas en la última prueba. A continuación, en la Tabla 12 y la Figura 8, se muestran los resultados obtenidos durante las 5 pruebas para este rango de turbiedad.

Tabla 12

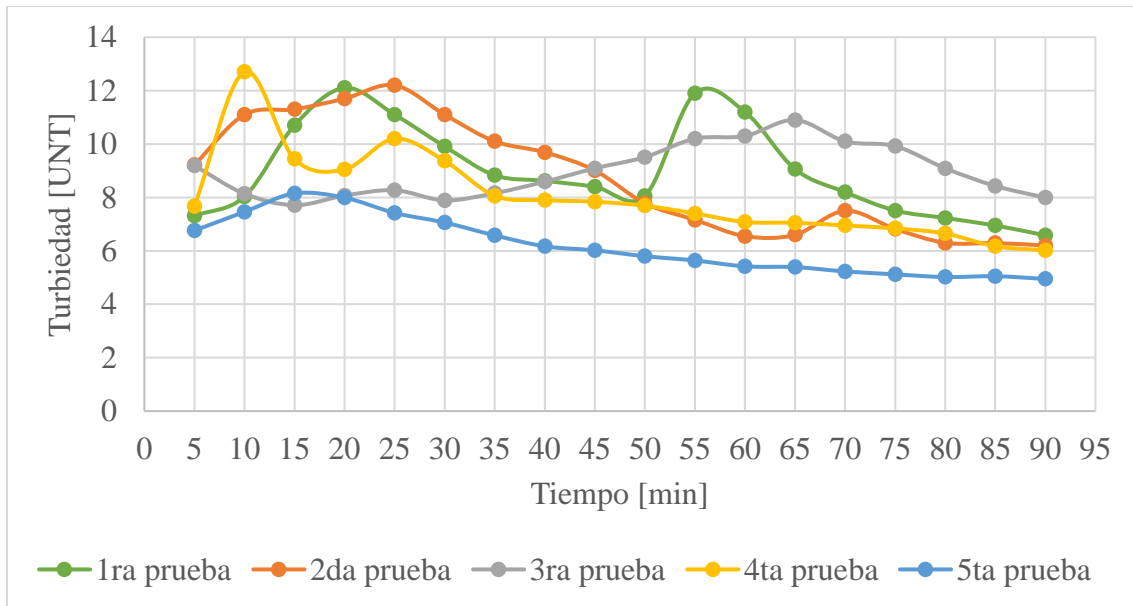
Resultados promedio pruebas de flujo FLA (0-10 UNT).

Muestra	Turbiedad [UNT]				
	Primera	Segunda	Tercera	Cuarta	Quinta
	prueba	prueba	prueba	prueba	prueba
AC	7.65	7.62	9.03	8.88	9.19
EF	8.98	8.70	8.98	8.00	6.18
%Remoción	NA	NA	0.61	9.83	32.76

Nota: AC: Agua cruda; EF: Efluente del filtro; NA: No aplica.

Figura 8

Variación de la turbiedad con respecto al tiempo para el efluente del FLA (0-10 UNT).



Según estos resultados se puede concluir que la tecnología de tratamiento del FLA no es eficiente en la remoción de turbiedades bajas (0-10 UNT) ya que durante las pruebas de flujo realizadas, el valor de turbiedad del efluente osciló en rangos mayores a los del afluente durante las 2 primeras pruebas y presentó remociones bajas durante las demás, lo cual es consistente con lo señalado en el estudio de Jenkins et al. (2011), en el cual se concluyó que los FLA para el hogar tienen mayor eficiencia para turbiedades altas, hasta 58 UNT. Otra posible explicación es por las variaciones de las condiciones de operación con las que se trabajó el filtro.

4.2.2. Pruebas de flujo (10 – 20 UNT)

La Tabla 13 contiene los promedios de la turbiedad presente en las muestras de agua cruda y en el efluente del filtro para cada una de las pruebas. En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos en las cinco pruebas con respecto al tiempo de ensayo para el rango 10 – 20 UNT.

Tabla 13

Resultados promedio pruebas de flujo FLA (10-20 UNT).

Muestra	Turbiedad				
	Primera prueba	Segunda prueba	Tercera prueba	Cuarta prueba	Quinta prueba
AC	19.4	18.6	18.7	14.7	16.7
EF	4.55	5.62	8.77	7.52	9.19
%Remoción	76.55	69.77	53.10	48.83	44.99

Nota: AC: Agua cruda; EF: Efluente del filtro.

En la gráfica de resultados (Figura 9) se puede observar un comportamiento heterogéneo durante la primera mitad del ensayo y uniformidad en los valores de turbiedad durante la segunda mitad. De lo cual se puede concluir que tras vaciar el lecho filtrante se requiere de un periodo de estabilización de aproximadamente 45 minutos, con el fin de obtener resultados homogéneos.

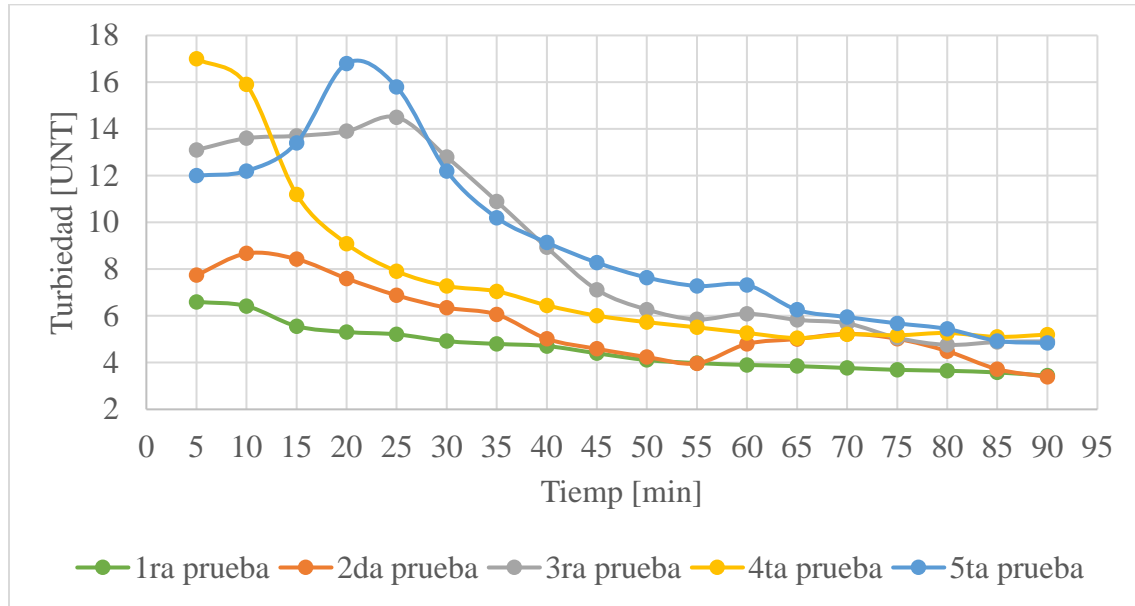
Para este rango de turbiedad, también se pudo evidenciar que el FLA empieza a eliminar un porcentaje mayor de la turbiedad contenida en las muestras de agua sintética, en comparación con los resultados obtenidos para 0 – 10 UNT. En este estudio se trabajó con agua cruda sintética con turbiedades de 14.7 – 19.4 UNT en el afluente, mientras que en el efluente se obtuvieron valores de turbiedad entre 5.7 - 9.2 UNT en promedio durante las 5 pruebas, representando porcentajes de eficiencia de remoción entre el 44% y el 77%. Sin embargo, estudios relacionados (Mun et al., 2012) (Freitas et al., 2021) (Rahman et al., 2021) muestran resultados de FLA domiciliarios entre el 75% y el 98% de remoción para muestras de agua con turbiedades similares a las utilizadas en estas pruebas. De acuerdo con estos estudios, los aspectos que determinan la eficiencia de los FLA son el tamaño de las partículas que conforman el lecho filtrante, el espesor de la capa de arena y el caudal de operación. Las condiciones de operación en todas las investigaciones mencionadas fueron similares a las de la presente investigación: grano de arena con un diámetro de 0.15 – 0.45 mm, con capas de arena con espesor entre 30 – 60 cm y caudales de entrada de 5 – 15 L/h por lo que se puede concluir que los resultados no son los esperados en términos de eficiencia.

Según King-Nyamador et al. (2021), la diferencia en los resultados se puede deber a los tiempos de retención hidráulica; esto es determinante porque a mayor tiempo de contacto entre el agua y la capa de arena hay mayores posibilidades de obtener remociones altas (Zhou et al., 2018). Para el presente estudio el tiempo de retención era de aproximadamente 15 minutos operando con

un flujo continuo, mientras que para King-Nyamador et al. (2021) los tiempos de retención fueron mayores a 1 hora.

Figura 9

Variación de la turbiedad con respecto al tiempo para el efluente del FLA (10-20 UNT).



4.2.3. Pruebas de flujo (20 – 30 UNT):

Los resultados de las 5 pruebas de flujo para el rango 20 – 30 UNT se presentan de la misma forma que los rangos anteriores y se pueden observar en la Tabla 14 y la Figura 10.

Tabla 14*Resultados promedio pruebas de flujo FLA (20-30 UNT).*

Muestra	Turbiedad				
	Primera prueba	Segunda prueba	Tercera prueba	Cuarta prueba	Quinta prueba
AC	28,97	27,80	26,97	26,93	27,20
EF	9,89	7,36	8,01	8,13	9,32
%Remoción	65,85	73,53	70,30	69,81	65,74

Nota: AC: Agua cruda; EF: Efluente del filtro.

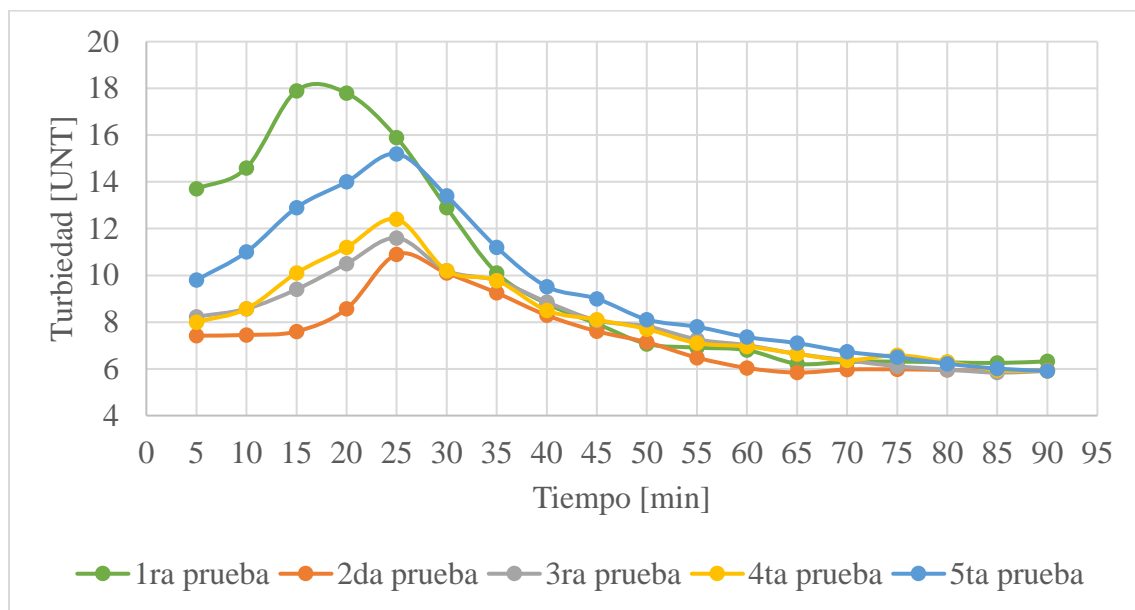
Para el rango más alto se obtuvieron los mejores resultados promedio en comparación con los otros dos intervalos de turbiedad, con porcentajes de remoción entre 65% – 74% coincidiendo con lo reportado por Jenkins et al (2011). Sin embargo, en investigaciones realizadas por Maciel y Sabogal-Paz (2020) y por Young-Rojanschi y Madramootoo (2014), bajo condiciones de operación similares y con rangos de turbiedad entre 20-50 UNT se obtuvieron porcentajes de remoción mayores al 80%. Estos porcentajes se pueden ver afectados por los valores de turbiedad reportados en los primeros 45 minutos de prueba, pues como se observa en la Figura 10, durante las 5 pruebas estos datos presentaron una distribución heterogénea, a diferencia de los minutos restantes. Una posible explicación para esto la dan Freitas et al. (2022), quienes expresan que al detener el flujo continuo durante el proceso de tratamiento, como sucedió en cada una de las pruebas cuando se vació el medio filtrante, se pueden generar vacíos en la capa de arena

ocasionando que se remueva el material, y que el flujo arrastre partículas de la parte superior de la capa.

Dados los resultados de los rangos de turbiedad entre 10 – 20 UNT y 20 – 30 UNT se recomienda proporcionar flujo continuo durante al menos 45 minutos antes de realizar medidas de turbiedad para conseguir una mejor remoción de partículas promedio. Una estrategia que se puede utilizar para evitar el desperdicio de recursos es recircular el agua filtrada durante este intervalo de tiempo.

Figura 10

Variación de la turbiedad con respecto al tiempo para el efluente del FLA (20-30 UNT).



4.3. Pruebas de flujo con agua cruda sintética en MUF

El análisis de los resultados obtenidos para las pruebas de la MUF se realizó de manera conjunta, es decir, la Tabla 15 muestra el promedio de los valores obtenidos en las 5 pruebas de cada uno de los rangos, tanto para el afluente como el efluente, mientras que en la Figura 11 se observa el comportamiento promedio de la turbiedad en cada intervalo de tiempo para los 3 rangos. Esto debido a que las condiciones de operación de la membrana no variaron durante la práctica; sin embargo, los resultados individuales por prueba y por rango se pueden detallar en el Anexo B.

Tabla 15

Resultados promedio pruebas de flujo MUF.

Muestra	Rango de turbiedad [UNT]		
	0-10	10-20	20-30
AC	8.65	18.26	27.52
EM	3.87	9.58	12.40
%Remoción	55.21	47.52	54.94

Nota: AC: Agua cruda; EF: Efluente del filtro.

Según estos resultados, se puede concluir que el porcentaje de remoción en los tres rangos de turbiedad es similar, obteniéndose valores promedio entre 47%-56%. Tras estudiar la literatura referente al tema se pudo evidenciar que existe poca información acerca del uso de las membranas en el tratamiento de agua lluvia o agua sintética, con condiciones de operación similares a las

utilizadas durante el presente proyecto. Ortiz (2021) estudió el comportamiento de las membranas de ultrafiltración para el tratamiento de aguas grises, las cuales se reportaron con niveles de turbiedad entre 4 – 41 UNT, y obtuvo remociones de turbiedad superiores al 99%. Vera et al. (2014) analizaron la capacidad de remoción de partículas en muestras de agua con turbiedades entre 28 – 30 UNT, obteniendo en el permeado turbiedades entre 0.2 – 0.3 UNT.

Según lo mencionado anteriormente, se puede concluir que el porcentaje de remoción obtenido con la MUF en la presente investigación no es el esperado. Esto se puede atribuir al contenido de materia orgánica e inorgánica en el agua sintética, pues es una de las principales razones por la cual se presenta ensuciamiento de la membrana, este fenómeno se ha estudiado durante mucho tiempo debido a la influencia sobre el rendimiento de esta (Kuo & Yuan, 2021). El ensuciamiento en las MUF produce taponamiento de los poros, reduciendo las tasas de flujo permeado y aumentando la presión transmembrana, efectos que disminuyen la efectividad en la remoción de partículas (Siagian et al., 2021). En investigaciones se encontró una gran diferencia entre el ensuciamiento causado por la materia orgánica y la materia inorgánica, la última es reversible mediante el proceso de retrolavado de la membrana, mientras que para la primera no se obtiene el mismo resultado (Ren et al., 2021).

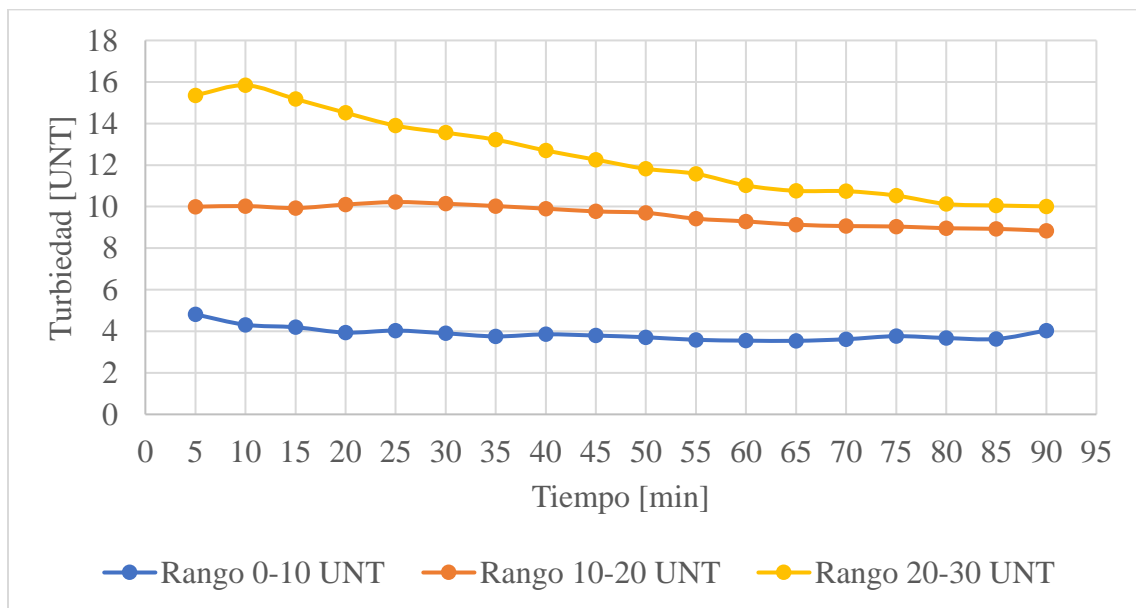
Richards et al. (2021) mencionan en su investigación que uno de los mecanismos más utilizados en el retrolavado de la membrana para eliminar la materia inorgánica se realiza invirtiendo el funcionamiento de la membrana, es decir, se toma el agua ya filtrada o potable en su defecto, y se impulsa una corriente con flujo elevado en sentido inverso de la filtración con el fin de retirar la capa de sólidos acumulada en las películas de la MUF. Mientras que el lavado de la materia orgánica se debe realizar con productos químicos como el hipoclorito o detergentes especializados para el lavado de las membranas (Busnadiago, 2013). La frecuencia del retrolavado

se debe determinar mediante la medición de los parámetros de operación de la membrana, como la presión transmembrana y tasa de flujo, esto debido a que varía en base a las condiciones con las que esta opera (Brover et al., 2022).

Durante la presente investigación se lavó la membrana después de las 5 pruebas por cada rango de turbiedad debido a que no se observó una variación significativa en los resultados a medida que se ejecutaban los ensayos, sin embargo, no se pudo calcular un tiempo estimado de lavado, pues debido al tipo de módulo utilizado no se contó con las herramientas necesarias para el cálculo de variables como la presión transmembrana, adicionalmente, el lavado se realizó sumergiendo y filtrando agua potable a través de la membrana, lo cual, se puede concluir que no es la manera óptima.

Figura 11

Variación de la turbiedad con respecto al tiempo para el efluente de la MUF (0-30 UNT).



En la Figura 11 se puede observar que el comportamiento de la turbiedad en el efluente es constante para los dos primeros rangos, obteniendo valores entre 3-5 UNT para el primero y de 8-11 UNT en el segundo, mientras que para el rango mayor se obtiene una curva decreciente con valores que oscilan entre 9-16 UNT, lo cual se puede deber a la sedimentación de las partículas en el recipiente que contenía la membrana, pues al ser el rango con mayor turbiedad buena parte de las partículas suspendidas se depositaban a pesar de ser mezcladas durante los ensayos.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos durante la presente investigación muestran que el tratamiento con el FLA tiene un mejor comportamiento a medida que la turbiedad del afluente es mayor. Los caudales de operación para el afluente y el efluente de este deben ser proporcionados al mínimo, buscando siempre trabajar con un flujo de tipo laminar, esto con el fin de evitar al máximo perturbar la conformación de la capa biológica en el material granular. Es importante que en posteriores usos del FLA se emplee una estrategia de recirculación de flujo durante los primeros 45 minutos de operación cada vez que se interrumpa el flujo continuo o se vacíe el lecho de filtración para su lavado, pues como se pudo observar, los mayores niveles de remoción se obtuvieron tras este intervalo de tiempo en la mayoría de las pruebas.

Con la MUF se evidenciaron resultados homogéneos para cualquier rango de turbiedad, sin embargo, el porcentaje de remoción obtenido durante los ensayos no es el adecuado según la

literatura. La membrana opera sumergida completamente con una lámina de 4 a 5 cm sobre su parte superior y el aspecto más importante que se debe tener en cuenta para poder mejorar su eficiencia es evitar el ensuciamiento o acumulación de materia orgánica e inorgánica en los poros. Se debe implementar un retrolavado de la membrana regularmente a medida que se observa una disminución en el rendimiento de esta. En caso de no recuperar el comportamiento inicial tras el retrolavado se debe realizar un lavado químico.

Referencias Bibliográficas

- Borrero, L., Andrés, J., Abello, T., Eduardo, A., Pinilla, C., Claudia, M., Robayo, E., Iván, J., González, V., & Andrea, P. (2007). *Aprovechamiento del agua lluvia para riego y lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá)*.
- Brover, S., Lester, Y., Brenner, A., & Sahar-Hadar, E. (2022). Optimization of ultrafiltration as pre-treatment for seawater RO desalination. *Desalination*, 524(December 2021).
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115478>
- Busnadiago, F. (2013). *Estudio del funcionamiento de sistemas de ultrafiltración con membranas en ETAP y EDAR* [Tesis de Maestría. Universidad de Valladolid].
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/6745>
- Chamorro, C., Hoepfner, L., Montañó, C., & Ríos, I. (2019). *Procesos de gestión : los edificios sostenibles frente a los edificios tradicionales*. 17, 177–203.
- Chinchilla, J., & Paredes, S. (2019). *Evaluación de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua en el sistema de aprovechamiento de aguas lluvia del edificio de la E3T en el campus central de la Universidad Industrial de Santander*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.
- Choi, H., Zhang, K., Dionysiou, D. D., Oerther, D. B., & Sorial, G. A. (2005). *Influence of cross-flow velocity on membrane performance during filtration of biological suspension*. 248, 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.08.027>
- Du, X., Xu, J., Mo, Z., Luo, Y., Su, J., Nie, J., & Wang, Z. (2019). *Science of the Total*

Environment The performance of gravity-driven membrane (GDM) filtration for roofing rainwater reuse : Implications of roofing rainwater energy and rainwater purification. 697.

Freitas, B. L. S., Terin, U. C., Fava, N. de M. N., & Sabogal-Paz, L. P. (2021). Filter media depth and its effect on the efficiency of Household Slow Sand Filter in continuous flow. *Journal of Environmental Management*, 288(October 2020).

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112412>

Freitas, B. L. S., Terin, U. C., Fava, N. M. N., Maciel, P. M. F., Garcia, L. A. T., Medeiros, R. C., Oliveira, M., Fernandez-Ibañez, P., Byrne, J. A., & Sabogal-Paz, L. P. (2022). A critical overview of household slow sand filters for water treatment. *Water Research*, 208(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117870>

García, A., & Rivera, M. (2020). *Propuesta de tecnologías para el tratamiento del agua en el sistema de aprovechamiento de agua lluvia del edificio de la escuela de Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones en el campus central de la Universidad Industrial de Santander*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.

Garzón Peña, N., & Gualdrón Reyes, N. (2019). *Propuesta del dimensionamiento del tanque de almacenamiento del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, campus central*.

Gómez, M., & Silva, M. (2019). *Propuesta de tecnologías para el tratamiento de aguas lluvias, como opción para su aprovechamiento en viviendas unifamiliares. Caso de estudio: Bucaramanga (Colombia)*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.

Grupo Energía Bogotá. (2015). *Sostenibilidad Ambiental EEB*.

Grupo EPM. (2016). *ABC-Calidad del agua*.

Hagemann, S.E., Gastaldini, M. C. C. (2016). Variation of rainwater quality with precipitation: Application to Santa Maria City - RS. *RBRH*, 21(3), 525–536.

Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1–3), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046>

Huisman, L., & Wood, W. (1974). *Slow Sand Filtration* (p. 120). WORLD HEALTH ORGANIZATION.

<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/38974/9241540370.pdf;jsessionid=847158F2E470D1B552BAB928279B580E?sequence=1>

Jenkins, M. W., Tiwari, S. K., & Darby, J. (2011). Bacterial, viral and turbidity removal by intermittent slow sand filtration for household use in developing countries: Experimental investigation and modeling. *Water Research*, 45(18), 6227–6239. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.09.022>

Katrivesis, F. K., Sygouni, V., & Paraskeva, C. A. (2021). *A Performance Comparison of Pilot-Scale Sand Filtration and Membrane Filtration of Glafkos River Water*.

King-Nyamador, G., Amoatey, P. K., Amoah, S., & Adu-Ampong, B. (2021). Optimal bed thickness and effective size for improving wastewater quality for irrigation. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 12(2), 175–190. <https://doi.org/10.1007/s40095-020-00364-y>

Kuo, G., & Yuan, S. (2021). Ultrafiltration fouling behavior of natural organic matter: a perspective of EEM and molecular weight distribution. *Water Supply*, 21(8), 4514–4524.

<https://doi.org/10.2166/ws.2021.195>

Lani, N. H. M., Yusop, Z., & Syafiuddin, A. (2018). A review of rainwater harvesting in Malaysia: Prospects and challenges. *Water (Switzerland)*, *10*(4), 1–21.

<https://doi.org/10.3390/w10040506>

Lea, M. (2014). *Biological Sand Filters : Low-Cost Bioremediation Technique for Production of Clean Drinking Water*. May, 1–27. <https://doi.org/10.1002/9780471729259.mc01g01s33>

Lidia, I., & Vargas, C. De. (2010). *Filtración lenta como proceso de desinfección*.

López, D. (2017). Normativa aplicable al agua de lluvia. *DisTecD. Diseño y Tecnología Para El Desarrollo*, *4*, 6–12.

Maciel, P. M. F., & Sabogal-Paz, L. P. (2020). Household slow sand filters with and without water level control: continuous and intermittent flow efficiencies. *Environmental Technology (United Kingdom)*, *41*(8), 944–958.

<https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1515988>

Martin Systems. (2005). *CUBE Mini Module (FM 045) General description of CUBE ® Mini Filter*. *Fm 045*, 0–2.

Mun, J., Kim, R., & Han, M. (2012). The effects of catchment materials and treatment train on rainwater quality in a rainwater harvesting system. *Materials Science Forum*, *724*, 451–454.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.724.451>

Organization, W. H. (2011). *Guidelines for drinking-water Quality: Vol. fourth*.

Ortiz, J. (2021). Advances in Microfiltration and Ultrafiltration Technology for Greywater Treatment: A Review. *Nature Environment and Pollution Technology*, *20*(4), 1601–1609.

<https://doi.org/10.46488/NEPT.2021.v20i04.022>

- Rahman, M. A., Hashem, M. A., Sheikh, M. H. R., & Fazle Bari, A. S. M. (2021). Quality assessment of harvested rainwater and seasonal variations in the southwest coastal area, Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, 80(8). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09622-6>
- Ren, L., Liu, C., Meng, T., & Sun, Y. (2021). Effects of micro-flocculation pretreatment on the ultrafiltration membrane fouling caused by different dissolved organic matters in treated wastewater. *Water Reuse*, 11(4), 597–609. <https://doi.org/10.2166/wrd.2021.051>
- Richards, B., Li, S., Milia, M., & Schäfer, A. I. (2021). Renewable Energy Powered Membrane Technology: Energy Consumption Analysis of Ultrafiltration Backwash Configurations. *SSRN Electronic Journal*, 287(December 2021). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3960509>
- Sabogal-Paz, L. P., Campos, L. C., Bogush, A., & Canales, M. (2020). Household slow sand filters in intermittent and continuous flows to treat water containing low mineral ion concentrations and Bisphenol A. *Science of the Total Environment*, 702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135078>
- Siagian, U. W. R., Khoiruddin, K., Wardani, A. K., Aryanti, P. T. P., Widiassa, I. N., Qiu, G., Ting, Y. P., & Wenten, I. G. (2021). High-Performance Ultrafiltration Membrane: Recent Progress and Its Application for Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*, 7(4), 448–462. <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00204-5>
- Solarte, L., & González, L. (2012). *Aprovechamiento del agua lluvia en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá en función de la variabilidad de la calidad*. 88. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/15421>

- Temesgen, T., Han, M., Park, H., & Kim, T. II. (2015). Design and technical evaluation of improved rainwater harvesting system on a university building in Ethiopia. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(6), 1220–1227. <https://doi.org/10.2166/ws.2015.085>
- Universidad Industrial de Santander. (2013, January). Edificio Ingeniería Eléctrica, edificación bajo el concepto de construcción verde. *N° 154*, 2. https://www.uis.edu.co/webUIS/es/mediosComunicacion/catedraLibre/2013/enero_13/pagina20.html
- Vera, L., González, E., Díaz, O., Bohorque, R. A., & Sánchez, R. (2014). Ultrafiltración Tangencial de Efluentes Secundarios. Análisis del Ensuciamiento de la membrana. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 5(4), 17–29.
- World Health Organization, & UNICEF. (2017). Progreso en agua potable, saneamiento e higiene. In *Who* (Issue February). <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258617/9789241512893-eng.pdf?sequence=1>
- Xu, Y.-J., Gong, Y.-M., Bi, J.-P., (...), Cheng, J.-R., Wang, K. (2020). Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo. *Huanjing Kexue/Environmental Science*, 3275–3284.
- Xue, B., & Kang, X. (2012). Study on the Pollution Control and Resource Recovery of Urban Street Rainwater. *Energy Procedia*, 16, 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.002>
- Young-Rojanschi, C., & Madramootoo, C. (2014). Intermittent versus continuous operation of biosand filters. *Water Research*, 49(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.011>

Zhou, K., Duan, J. G., Rosenberg, ; Abigail, & Shim, J. (2018). *World Environmental and Water Resources Congress. 1(i)*, 489.