



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Evaluación de un sistema de tratamiento, a
escala de laboratorio, para reducir la
concentración de carga orgánica, bacterias
y/o parásitos utilizando agua residual
sintética, con miras a su aplicabilidad en
irrigación de cultivos en la sabana
occidental de Bogotá - Colombia**

Jesús Alberto Espitia Cuadros

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia

2022

Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Jesús Alberto Espitia Cuadros

Trabajo Final de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Recursos Hidráulicos

Director (a):

MSc Ingeniería Ambiental, Ingeniero Sanitario Carlos Julio Collazos Chávez

Línea de Investigación:

Saneamiento Hídrico

Grupo de Investigación:

Resiliencia y Saneamiento

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2022

Esta investigación va dedicada a todas aquellas personas que de manera resiliente eligen un rumbo diferente a su primera opción, sin dejar atrás la chispa que motiva el movimiento, desarrollándola con orgullo, pasión y destreza hasta el final. A quienes creen en el diseño y en las buenas acciones como alternativa de cambio para el mundo, desde los niveles microscópicos hasta los macroscópicos, en épocas donde el consumismo y el afán por aparentar tiene en la mira los recursos naturales.

Declaración de obra original

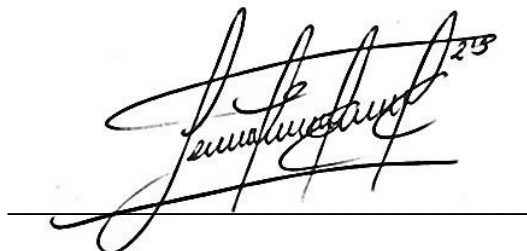
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jesús Alberto Espitia Cuadros', is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a superscript '23' at the end.

Nombre: Jesús Alberto Espitia Cuadros

Fecha 03/11/2022

Agradecimientos

Agradezco a mi núcleo familiar por estar siempre ahí, apoyándome en todos los momentos buenos, malos y en los peores, incentivándome a crear siempre cosas nuevas e innovadoras, por encima de los prejuicios y contratiempos que se encuentran en el camino de la vida, además de ayudar moral y físicamente desde el principio del montaje de la planta piloto hasta la fase final de análisis de laboratorio.

Quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer a todas aquellas personas que han confiado en mí, bien sea por simple intuición o por observación, permitiéndome explorar y demostrar mis capacidades al máximo, tanto en el ámbito académico como en el laboral, así como a mis compañeros de experimentación, con quienes nos apoyamos de manera recíproca, aplicando la interdisciplinariedad de las diferentes ramas del conocimiento.

Agradezco principalmente a los profesores Carlos Julio Collazos y Paula Andrea Villegas, quienes han contribuido de manera fundamental en mi formación como investigador, debido a que con su apoyo, orientación y motivación, me han impulsado para no desfallecer en aquellos momentos en que la oscuridad predomina.

Agradezco de manera especial a todo el equipo de trabajo del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, desde la coordinación hasta su equipo técnico, quienes me abrieron las puertas y acogieron de manera cálida desde el principio, brindándome su amistad y apoyando con su conocimiento, experiencia, y asesoría, durante el desarrollo de este proyecto, siendo esto de gran ayuda hasta el último momento.

Por último, agradezco la confianza y financiación aportada al presente proyecto, por parte de la dirección de los proyectos de investigación “Evaluación de tratamientos para la remoción de fármacos presentes en aguas utilizadas para riego en La Ramada y caracterización de la contaminación por microorganismos de interés en Salud Pública” - código 42163, e Identificación de contaminantes emergentes y microbiológicos, análisis metagenómico bacteriano y perfil de resistencia a antibióticos en aguas de riego y hortalizas de la Sabana occidental de Cundinamarca.

Resumen

Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

El presente trabajo contiene información relacionada con la caracterización tanto hidrológica como de la calidad del agua del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y de control de inundaciones La Ramada, junto con la evaluación experimental de un reactor biológico, a escala piloto, para el tratamiento de aguas residuales orientado a la remoción de DQO, parásitos y bacterias, para concentraciones similares a las encontradas en el agua residual de la zona en estudio.

Para lograr los objetivos propuestos, se ha desarrollado el estudio en tres etapas. En la primera, se adelantó una caracterización hidrológica y de calidad del agua de la zona en estudio; en la segunda etapa, se procedió a la selección y definición del tipo de tratamiento biológico de mayor aplicación y adaptabilidad a la zona en estudio y, finalmente, en la etapa 3, se realizó el diseño, construcción, puesta en marcha, seguimiento y evaluación del reactor a escala de laboratorio monitoreando la remoción de DQO, parásitos y bacterias coliformes. La planta piloto utilizada es un filtro anaerobio de flujo descendente, con relleno plástico, operado con un caudal medio de 15 L/d y una concentración promedio de DQO de 700 mg/L en el afluente, presentando eficiencias de operación hasta del 96.7%. Adicionalmente, el afluente fue inoculado con huevos de parásitos Helmintos de la especie *Ascaris suum*, en tres réplicas iguales de 500 huevos, obteniendo una remoción del 99.8%. También, el agua a tratar se inoculó con bacterias aerobias certificadas: *E. coli*, *Samonella typhimurium* y *Klebsiella aerogenes*, obteniendo, como era de esperarse, bajos niveles de remoción de este tipo de organismos.

Palabras clave: Agua residual sintética, Filtro anaerobio, *Irrigación de cultivos*, Remoción de huevos de parásitos *Helmintos*, Reúso de aguas residuales.

Abstract

Evaluation of a treatment system, on a laboratory scale, to reduce the concentration of organic load, bacteria and/or parasites using synthetic wastewater, with a view to its applicability in crop irrigation in the western savannah of Bogotá - Colombia

The present research has got the information regarding the hydrologic and water quality characterization at the *Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y de control de inundaciones La Ramada*, as well as an experimental evaluation in a pilot scale biological reactor for the wastewater treatment, focused in COD, parasites and bacterium remotion, for similar concentrations to those founded in the wastewater at studied area.

To achieve the proposed objectives, the study was developed in three stages. First, a hydrological and water quality characterization at the study area was carried out; second, was done the selection and definition of the type of biological treatment with the greatest application and adaptability to the study area; finally, the third stage is based in the design, construction, start-up, monitoring and evaluation in the laboratory scale biological reactor, focused to the removal of COD, parasites and coliform bacteria. The pilot plant used is a downflow anaerobic filter, whose support mediums is plastic material, operated with an average flow rate of 15L/d, and average concentration of COD 700mg/L COD in influent, presenting operation efficiency until 96.7%. Additionally, the influent was inoculated with eggs of Helminth parasites of the *Ascaris suum* species, in three equal replicates of 500 eggs, obtaining an egg removal of 99.8%. Likewise, the water to treat was inoculated with certificated aerobic bacterium such as: *E. coli*, *Samonella typhimurium* y *Klebsiella aerogenes*, resulting, as it was expected, remotion with down levels in this organism type.

Keywords: Agricultural irrigation, Anaerobic filter, Helminth parasite egg removal, Synthetic wastewater, Wastewater reuse.

Contenido

Pág.

Introducción	17
1. Antecedentes.....	20
1.1 Caracterización del Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada	20
1.1.1 Descripción.....	20
1.1.2 Ubicación.....	20
1.1.3 Actividad económica.....	22
1.1.4 Red hidrográfica	23
1.1.5 Plan de monitoreo.....	23
1.1.6 Localización de puntos de monitoreo	24
1.2 Justificación.....	31
2. Objetivos.....	33
2.1 Objetivo General	33
2.2 Objetivos Específicos	33
3. Marco Teórico.....	34
3.1 Tratamiento Biológico de Aguas Residuales	34
3.1.1 Tratamiento biológico aerobio.....	34
3.1.2 Tratamiento biológico anaerobio.....	38
3.2 Distrito de riego	42
3.3 Soluciones aplicadas en otros países.....	42
4. Metodología.....	46
4.1 Fases de ejecución	47
4.2 Materiales y métodos	47
4.2.1 Recopilación de información hidrológica.....	47
4.2.2 Recopilación de información de calidad del agua	48
4.3 Alternativas de Tratamiento.....	50
4.3.1 Selección de alternativa de tratamiento	50
4.3.2 Diseño de la planta piloto de tratamiento	52
4.3.3 Puesta en marcha del sistema.....	56
4.3.4 Seguimiento del sistema.....	58
5. Resultados y análisis.....	61
5.1 Caracterización Hidrológica.....	61
5.2 Caracterización de la calidad de agua.....	63

- 12 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia
-

5.2.1	Parámetros in situ	63
5.2.2	Parámetros fisicoquímicos	66
5.2.3	Parámetros microbiológicos	68
5.3	Sistema de tratamiento	70
5.3.1	Estabilización de la planta piloto.....	70
5.3.2	Evaluación de remoción de materia orgánica	72
5.3.3	Funcionamiento del sistema.....	74
5.3.4	Evaluación de remoción de huevos de parásitos de Helmintos	77
5.3.5	Evaluación de remoción de bacterias	80
6.	Conclusiones y recomendaciones	82
6.1	Conclusiones	82
6.2	Recomendaciones	83
7.	Bibliografía.....	85
8.	Anexos.....	90
	Anexo 1. Registros hidrológicos y de calidad de agua.....	90
	Anexo 2. Procesamiento de la información de monitoreo	97
	Anexo 3. Resultados experimentales del sistema de tratamiento	99
	Anexo 4. Agua residual sintética (ARS)	105

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Delimitación del sistema hidráulico	21
Figura 1-2: Mapa de distribución de canales principales del sistema hidráulico	22
Figura 1-3: Mapa de localización de puntos de monitoreo	25
Figura 1-4: Punto 1	26
Figura 1-5: Punto 2	27
Figura 1-6: Punto 3	28
Figura 1-7: Punto 4	29
Figura 1-8: Punto 5	30
Figura 1-9: Punto 6	31
Figura 3-1: Esquema de operación SBR	36
Figura 3-2: Esquema de operación MBR	37
Figura 3-3: Esquema de filtro percolador	38
Figura 3-4: Digestión anaerobia	39
Figura 3-5: Flujos de filtros anaerobios	40
Figura 3-6: Esquema de funcionamiento de UASB	41
Figura 3-7: Sistema de tratamiento proyecto “REUTIVAR”	44
Figura 3-8: Modelo Braunschweig	45
Figura 4-1: Diagrama metodológico	46
Figura 4-2: Configuración de la planta piloto	52
Figura 4-3: Sistema de bombeo	53
Figura 4-4: Relleno plástico del estrato filtrante.....	54
Figura 5-1: Formación de la biopelícula – Fase inicial.....	71
Figura 5-2: Formación de la biopelícula – Fase estable	71
Figura 5-3: Detección de huevos de parásito <i>Helmintos - Ascaris suum</i>	78

Lista de tablas

Pág.

Tabla 4-1:	Estaciones de Monitoreo de precipitación - Sabana Occidental de Bogotá	48
Tabla 4-2:	Métodos y equipos de medición utilizados en el monitoreo.....	49
Tabla 4-3:	Cuadro de valoración de tratamientos (Análisis multicriterio)	51
Tabla 4-4:	Cuadro de valoración de tratamientos	54
Tabla 4-5:	Volumen del estrato filtrante	56
Tabla 4-6:	Características físicas del estrato filtrante.....	56
Tabla 4-7:	Agua residual sintética.....	57
Tabla 4-8:	Métodos y equipos utilizados en la operación del sistema	59
Tabla 5-1:	DBO ₅ admisible para el reúso de agua residual en uso agrícola.....	74
Tabla 5-2:	Ensayo de remoción de huevos de A. suum	78
Tabla 5-3:	Ensayo de remoción de bacterias aerobias	80
Tabla 8-1:	Registros de precipitación – Estación Tibaitatá.....	90
Tabla 8-2:	Resultados de calidad de agua punto 1	92
Tabla 8-3:	Resultados de calidad de agua punto 2	92
Tabla 8-4:	Resultados de calidad de agua punto 3	93
Tabla 8-5:	Resultados de calidad de agua punto 4	94
Tabla 8-6:	Resultados de calidad de agua punto 5	95
Tabla 8-7:	Resultados de calidad de agua punto 6	96
Tabla 8-8:	Curvas IDF Intensidad – Duración – Frecuencia.....	97
Tabla 8-9:	Remoción DQO	99
Tabla 8-10:	Alcalinidad total	101
Tabla 8-11:	Ácidos grasos Volátiles.....	103
Tabla 8-12:	Agua residual sintética.....	105

Lista de gráficas

	Pág.
Gráfica 5-1:	Hietograma de precipitación – Estación Tibaitatá..... 61
Gráfica 5-2:	Monitoreo de temperatura del agua..... 63
Gráfica 5-3:	Monitoreo de oxígeno disuelto presente en el agua 64
Gráfica 5-4:	Monitoreo de pH del agua 65
Gráfica 5-5:	Monitoreo de conductividad del agua 65
Gráfica 5-6:	Monitoreo de DQO 67
Gráfica 5-7:	Monitoreo de DBO ₅ 68
Gráfica 5-8:	Cuantificación de coliformes totales 69
Gráfica 5-9:	Cuantificación de <i>E. coli</i> 69
Gráfica 5-10:	Monitoreo de DQO Efluente 73
Gráfica 5-11:	Monitoreo de pH Efluente..... 75
Gráfica 5-12:	Monitoreo de ácidos grasos volátiles (AGV)..... 76
Gráfica 5-13:	Relación ácidos grasos volátiles y alcalinidad total 76
Gráfica 5-14:	Monitoreo alcalinidad total..... 77
Gráfica 8-1:	Detección de datos anómalos de precipitación – Estación Tibaitatá... 97
Gráfica 8-2:	Curvas IDF Intensidad – Duración – Frecuencia 98
Gráfica 8-3:	Relación DBO ₅ y la DQO..... 98

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área	cm ²
H	Altura de llenado	cm
h	Altura del estrato filtrante	cm
Q	Caudal	L/d
t	Tiempo de retención hidráulica	d
V	Volumen del sistema	cm ³
V _m	Volumen del estrato filtrante	cm ³
V _v	Volumen de vacíos	cm ³

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
η	Porosidad	%
φ	Diámetro	cm

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AGV	Ácidos grasos Volátiles
ARS	Agua residual sintética
COV	Carga orgánica volumétrica
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
IDF	Intensidad – Duración - Frecuencia
pH	Potencial de hidrógeno
NPM	Número más probable

Introducción

Históricamente el *Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y de control de inundaciones La Ramada*, ha sido utilizado para el amortiguamiento de caudales de avenida del río Bogotá, debido a su condición topográfica que permite el encharcamiento de grandes volúmenes de agua. Ancestralmente, fueron los Muisca quienes en su momento construyeron el primer sistema de riego sobre la Sabana Occidental de Bogotá, conformado por canales de recolección de manera perpendicular al río, de forma que permitiera aprovechar los almacenamientos de agua para fines agrícolas. Sin embargo, en los años de la fundación de la ciudad de Bogotá, surgió el desplazamiento de las tribus Muisca de la zona de La Ramada, por lo que el sistema de drenaje fue abandonado y posteriormente desecado. Durante la segunda década del siglo XX, la sabana occidental de Bogotá se vio afectada por inundaciones, situación que propició a través del Ministerio de Minas y economía, la elaboración de estudios de diseño, operación, supervisión y manejo, iniciados desde 1921 hasta 1961, fecha en la cual se realizó la cesión a la recién creada Corporación Autónoma Regional de la Sabana de Bogotá, más conocida en la actualidad como la CAR Cundinamarca (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca).

La presente investigación tiene como propósito probar y proponer un sistema de tratamiento de aguas residuales que tenga aplicación en el distrito de riego de La Ramada, ahora denominado "*Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y de control de inundaciones La Ramada*", de acuerdo con las condiciones naturales y energéticas propias de la zona. En la actualidad las aguas circundantes en los canales del sistema son utilizadas en actividades agroindustriales como la irrigación y el mantenimiento de cultivos en la Sabana Occidental de Bogotá. Los canales de riego del sistema transportan agua proveniente de diferentes afluentes, como: la Laguna Tres Esquinas, la compuerta del río Bogotá, conexiones erradas procedentes del municipio de Mosquera, escorrentía superficial sobre

la vía principal que conecta el sector del Alto de Mondoñedo y el ingreso a la ciudad de Bogotá por la calle 13 (Zona occidental de la ciudad).

Por otra parte, desde el año 2018 el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia – LIA, ha venido realizando campañas de monitoreo sobre el distrito de riego La Ramada, cuyos resultados han sido documentados en varias investigaciones (Cubides 2018; Sánchez 2020), los cuales han sido considerados como referentes de la presente investigación. Adicionalmente, se han llevado a cabo cuatro nuevas campañas de monitoreo, ejecutadas entre el periodo de octubre de 2020 y abril de 2021, con el fin de complementar y actualizar los registros de calidad del agua en seis puntos estratégicos de muestreo sobre la zona en estudio, cuyo análisis de laboratorio fue realizado en su totalidad en las instalaciones del LIA.

De manera específica, el trabajo, se orienta al estudio experimental de una alternativa de tratamiento de aguas residuales para el sector, teniendo en cuenta la baja disponibilidad energética, condiciones económicas, características tanto climatológicas y calidad del agua en los canales de irrigación existentes. Luego de elaborar una evaluación de alternativas de tratamiento biológico aplicable en la zona de estudio, se ha seleccionado para este fin un filtro anaerobio de flujo descendente, a escala de laboratorio, construido y operado en su totalidad en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá - LIA. Es de resaltar que todas las pruebas de medición de los parámetros de calidad del agua, relacionadas con la operación del sistema de tratamiento, se realizaron en las instalaciones del LIA.

Cabe aclarar que este proyecto comenzó a principios de 2021, en medio de restricciones de movilidad por COVID-19 y circunstancias de orden público en el país, motivo por el cual se utilizó como afluente agua residual sintética, con concentraciones de carga orgánica similares a las que se presentan en la zona de estudio.

El presente documento contiene el desarrollo y los resultados de la investigación adelantada, consignados en varios capítulos que contemplan los tópicos más relevantes.

En el capítulo 1 se hace una descripción de los antecedentes, incluyendo la caracterización de la zona de estudio y la correspondiente justificación del trabajo.

En el capítulo 2 están planteados los objetivos (general y específicos) definidos para el estudio, que determinan el propósito y alcance del trabajo a desarrollar.

El capítulo 3 contiene aspectos que guardan relación con el marco teórico asociado al contexto como los procesos y tecnologías (aerobios y anaerobios), que se utilizan de manera convencional para el tratamiento biológico de las aguas residuales domésticas, incluyendo algunas experiencias de aplicación de aguas residuales tratadas en actividades de riego.

El capítulo 4 presenta una breve descripción de la metodología utilizada para el cumplimiento de los objetivos propuestos. Allí se relacionan las fases o etapas de ejecución y los materiales y métodos utilizados, entre otros aspectos relacionados.

El capítulo 5 contiene los resultados del desarrollo experimental y el análisis correspondiente, entorno al desempeño del prototipo y los parámetros monitoreados que permitieron establecer las eficiencias obtenidas en términos de remoción de materia orgánica (DQO), parásitos y organismos coliformes.

Finalmente se presenta un capítulo con las principales conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

1. Antecedentes

1.1 Caracterización del Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada

1.1.1 Descripción

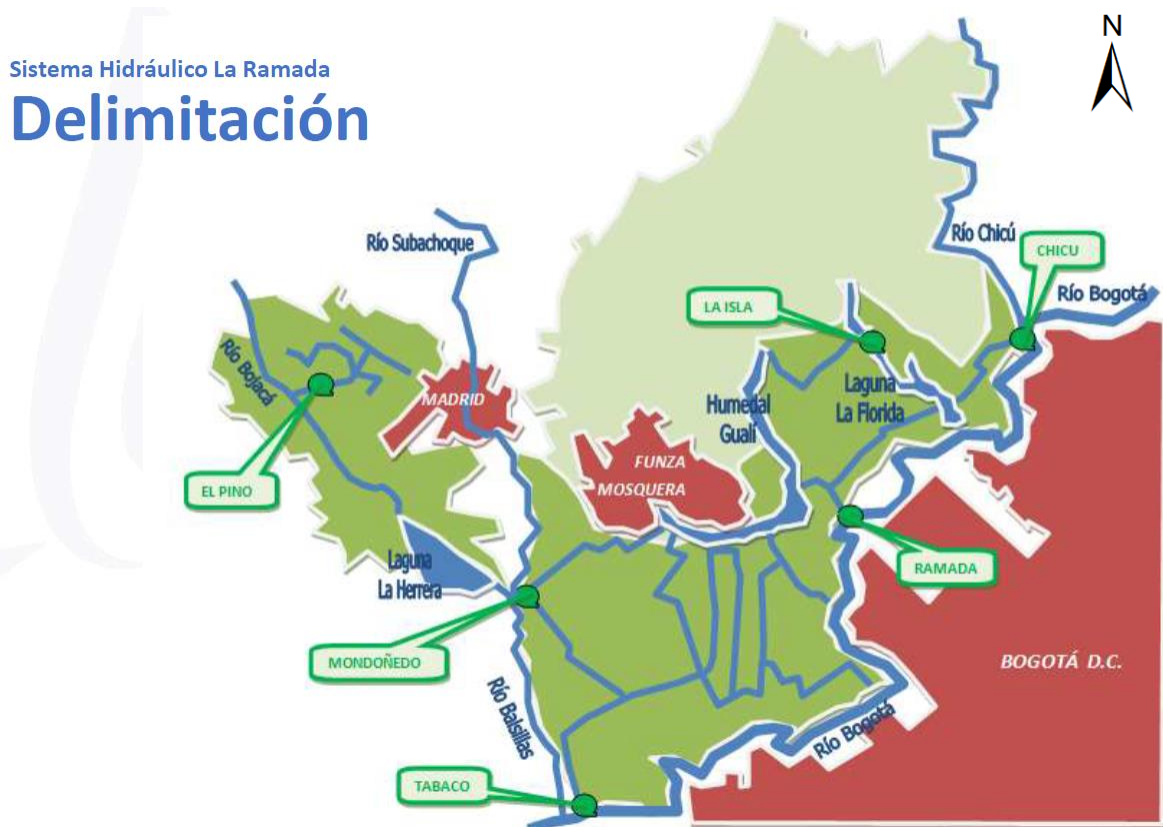
Según el Acuerdo Numero 037 de 2014 (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR 2014), el distrito de riego La Ramada adoptó el nombre “*Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada*”, el cual conforma un subsector de adecuación de tierras sobre la sabana occidental de Bogotá con destinos agrícolas, bajo un esquema de canales de irrigación, el cual tiene como principal función la reducción del riesgo por inundación en el tramo final de la cuenca media del río Bogotá, mediante el amortiguamiento de los caudales de los ríos aledaños frente escenarios extremos de lluvia, aprovechando de esta manera los exceso de agua para la irrigación de cultivos y favorecer así la economía de la región.

1.1.2 Ubicación

El Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada, se encuentra localizado en el departamento de Cundinamarca (Colombia), específicamente sobre la sabana occidental de Bogotá, en jurisdicción de los municipios de Mosquera, Funza, Madrid, Cota, Tenjo y Bojacá, delimitado por el occidente por el río Bojacá a la altura del puente El Corzo (sobre la vía de acceso al municipio de Bajaca), hasta la laguna La Herrera; por el norte con el río Subachoque, desde el casco urbano hasta desembocar en el río Balsillas y, a su vez, en la estación de bombeo El Tabaco, siendo este el sistema final del distrito de riego; por el sur y oriente, limitando con el río Bogotá, sitio en el cual vierte la estación de bombeo El Tabaco al río Bogotá (frontera entre los municipios de Mosquera y Soacha), en la Figura 1-1 se presenta la delimitación del distrito de riego. Dicho sistema hidráulico se encuentra conformado por 12 canales principales como lo son: San José, Victoria, Canal A, Canal B, Canal C, La Ramada, Tabaco, Normandía, Venecia,

Chicú – Florida; Canal Tibaitatá y la isla Galicia, los cuales se encuentran integrados por 6 estaciones de bombeo como lo son: Estación Chicú, La Ramada, Tabaco, Mondoñedo, La Isla y El Pino, además de 112 compuertas que regulan los niveles hídricos de acuerdo con las necesidad de agua en los canales para las actividades de irrigación (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR 2018). La distribución de canales se muestra en la Figura 1-1 y en la Figura 1-2.

Figura 1-1: Delimitación del sistema hidráulico



Fuente: (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR 2018)

del suelo de los municipios de Cundinamarca (Secretaría Distrital de Planeación 2015), Mosquera cuenta con una visión estratégica definida por el POT, definiendo los ejes económicos de productividad como: urbana, compuesto por industria y desarrollo urbano; rural, compuesto por la producción agrícola, minería y protección ambiental. Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas por algunos entes gubernamentales (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA s. f.; Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE 2002; Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC s. f.), quienes afirman que los terrenos de la Sabana de Bogotá son considerados como los mejores terrenos en el país para la siembra de cultivos, debido a la calidad de los suelos, características climáticas, disponibilidad de agua. Dicho esto, el sector agrícola de la región se encuentra integrado por actividades como: la ganadería, porcicultura, avicultura, floricultura, fruticultura y la horticultura, siendo este último la actividad con mayor cobertura en el dentro del Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada, en el cual se encuentra principalmente el cultivo de hortalizas como espinaca, lechuga, coliflor, apio, cilantro, etc.

1.1.4 Red hidrográfica

La red hidrográfica del Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada, está conformada principalmente por los cuerpos de agua ubicados sobre la subcuenca río Balsillas, que compone la cuenca del río Bogotá, entre los que se encuentran: el río Balsillas, río Bogotá, río Subachoque, río Bojacá, laguna de La Herrera, humedal Gualí – Tres Esquinas, humedal La Florida, quebrada La Chucua y río Chicú (ver Figura 1-2).

1.1.5 Plan de monitoreo

El plan de monitoreo realizado en el presente trabajo, se definió bajo el criterio de continuidad. Esto, en función de prolongar y robustecer el registro histórico de los puntos más significativos monitoreados en investigaciones previas realizadas por la Universidad Nacional de Colombia, en el Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada (Cubides 2018; Sánchez 2020).

La primera campaña de monitoreo fue planteada, inicialmente, en la investigación de Cubides 2018, analizando un amplio panorama de la calidad del agua sobre el área en

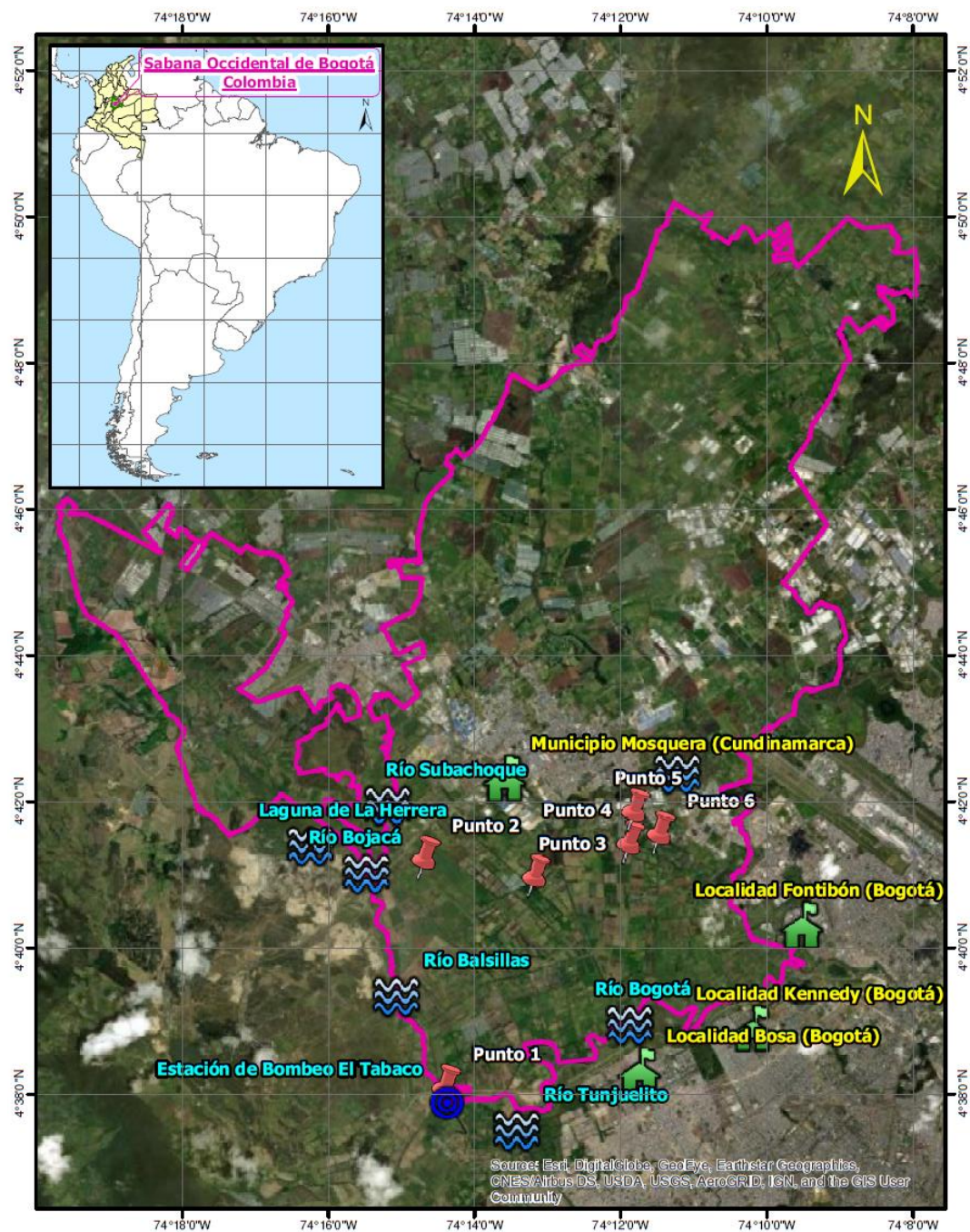
estudio, basado en información de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), siendo seleccionados seis (6) sectores representativos para la caracterización y seguimiento de la calidad del agua de la zona y su influencia en la horticultura. De esta manera el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional (LIA), llevó a cabo este programa de agosto a noviembre de 2017. Posteriormente, el monitoreo se retomó en la investigación realizada en Sánchez 2020, acompañado por el LIA, entre el periodo de junio – septiembre de 2019, cuya campaña de muestreo mantuvo 5 de los 6 puntos monitoreados en Cubides 2018, sustituyendo el punto “San José” por “Punto 1”, debido a su valor representativo al estar este ubicado en el canal final del sistema hidráulico, y siendo aledaño a la Estación de Bombeo “El Tabaco”, sitio donde finaliza el recorrido del agua circundante por el distrito de riego.

En el análisis de los puntos monitoreados en Cubides 2018, se observa el cumplimiento de las recomendaciones expuestas en el Protocolo de Monitoreo del Agua publicado por el IDEAM para la selección de los puntos de monitoreo.

En la presente investigación se adelantaron cuatro (4) muestreos de calidad del agua, realizando 2 en temporada seca y 2 en temporada de lluvia, los cuales mantuvieron la campaña de monitoreo planteada en Sánchez 2020, buscando ampliar el registro histórico para el desarrollo de futuras investigaciones. Dichos monitoreos fueron realizados en octubre 27 de 2020, febrero 22 de 2021, marzo 05 de 2021 y abril 21 de 2021.

1.1.6 Localización de puntos de monitoreo

El Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada, se localiza en la Sabana Occidental de Bogotá, donde la mayor parte del área pertenece a la jurisdicción del municipio de Mosquera (Cundinamarca), por lo cual, investigaciones previas de la Universidad Nacional de Colombia (Cubides 2018; Sánchez 2020), han definido 6 puntos estratégicos (ver Figura 1-3), aplicando muestreos de tipo puntual, para identificar la calidad del agua en los canales de irrigación en la zona de proyecto, donde se concentra la horticultura, fruticultura y la ganadería de diferentes especies de animales.

Figura 1-3: Mapa de localización de puntos de monitoreo

Fuente: Adaptado de (Esri 2022)

▪ Punto 1

Este punto de monitoreo, se encuentra ubicado en el tramo final del Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada (Latitud: 4°38'6.22"N – Longitud: 74°14'22.40"O), en el límite entre los municipios de Mosquera y Soacha, específicamente a 450m (aprox.) aguas arriba de la estación de bombeo El Tabaco, sitio

26 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

donde desemboca las aguas del canal Tabaco al río Bogotá. Dicho punto de monitoreo, cuenta con una compuerta que permite la captación de agua, mediante el principio de vasos comunicantes, permitiendo el flujo desde el canal Tabaco hacia 3 canales de irrigación aledaños, los cuales suministran el agua a los cultivos de la zona. En la actualidad, el canal Tabaco tiene su ancho superficial cubierto con *Eichhornia crassipes* o también llamado Buchón de agua, debido a la eutrofización que se ocasiona en dicho canal, por consecuencia de los nutrientes provenientes de los cuerpos de agua afluentes a este, sin embargo, durante diferentes visitas realizadas, se observó el mantenimiento periódico del canal.

Figura 1-4: Punto 1



Fuente: Elaboración propia

▪ **Punto 2**

Este punto de monitoreo, se encuentra ubicado en el municipio de Mosquera, específicamente en el canal que irriga uno de los sectores con mayor concentración de cultivos hortícolas en el sistema hidráulico en estudio (Latitud: $4^{\circ}41'13.83''N$ – Longitud: $74^{\circ}14'39.47''O$). Dicho canal hace parte de los ramales afluentes del canal Venecia, el cual se encuentra cubierto por vegetación en todo su ancho superficial como se puede observar en la Figura 1-5.

Figura 1-5: Punto 2

Fuente: Elaboración propia

▪ Punto 3

Este punto de monitoreo, se encuentra ubicado en uno de los canales tributarios del Canal denominado brazo San Jorge N. 1, localizado en el municipio de Mosquera (Latitud: 4°40'59.18"N – Longitud: 74°13'8.79"O). El canal en mención es fuente de abastecimiento de agua para la irrigación de cultivos hortícolas, así como para su uso concerniente a la ganadería ovina, bobina, caprina, porcina, avícola, entre otras.

La captación del agua para riego se realiza mediante sistema de bombeo. Cabe mencionar que el sector cuenta con un equipo de bombeo, acompañado con bandejas para la aireación y remoción de metales pesados presentes en el agua, para su utilización en las actividades antes mencionadas. Es de resaltar que el canal monitoreado descarga en el brazo San Jorge N. 1, el cual entrega posteriormente en el Canal C (ver Figura 1-2).

Por otra parte, en la Figura 1-6 se observa la presencia de buchón de agua en todo el ancho superficial del canal, así como la presencia de aceites y grasas como consecuencia del uso de equipos de bombeo para la extracción de agua.

Figura 1-6: Punto 3



Fuente: Elaboración propia

▪ Punto 4

Este punto de monitoreo, se ubica dentro de la zona urbana del municipio de Mosquera (Latitud: 4°41'26.66"N – Longitud: 74°11'50.92"O), recibiendo principalmente los efluentes provenientes del humedal Gualí – Tres Esquinas, los cuales son regulados mediante compuertas ubicadas a orillas de la carretera Funza – Bogotá, con funcionamiento por vasos comunicantes. Adicionalmente, recolecta la escorrentía superficial generada sobre la malla vial del sector, junto con las descargas de agua residual tanto domestica como de los colegios del sector. En la Figura 1-7, se evidencia la presencia de basura, vegetación y detergentes (espumas) sobre la superficie del canal.

Por otra parte, este punto de monitoreo cuenta con un vertedero de descarga y una compuerta, que permite la generación del resalto hidráulico y a su vez la oxigenación del agua, pasando de una condición anaerobia a aerobia. Sin embargo, luego del resalto hidráulico esta condición no perdura, debido a la baja pendiente del canal y el estancamiento que esto genera.

Figura 1-7: Punto 4

Fuente: Elaboración propia

▪ Punto 5

Este punto de monitoreo, se encuentra ubicado en la margen derecha de la doble calzada Funza – Bogotá (Latitud: 4°41'53.03"N – Longitud: 74°11'47.03"O). El punto (como en el caso anterior) es aledaño a las vías de acceso a los barrios Villa Cety y Lucero, recibiendo también los efluentes provenientes del humedal Gualí – Tres Esquinas, cuyo nivel de agua es regulado mediante compuertas ubicadas a orillas de carretera Funza – Bogotá, generando un funcionamiento por vasos comunicantes. Otro de los caudales tributarios en el punto en referencia, es el generado como producto de la escorrentía superficial sobre la plataforma vial (Figura 1-8).

En este sitio se evidencia la presencia de grasas y aceites provenientes de la carretera, así como niveles altos de oxígeno disuelto en el agua, debido a la turbulencia de la escorrentía superficial que se desplaza sobre la carretera, lo cual genera un ambiente propicio para el hábitat de especies pequeñas de moluscos y crustáceos.

- 30 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia
-

Figura 1-8: Punto 5



Fuente: Elaboración propia

▪ Punto 6

Este punto de monitoreo, se localiza dentro de la zona urbana del municipio (Latitud: 4°41'34.36"N – Longitud: 74°11'26.22"O), recibiendo igualmente los efluentes provenientes del humedal Gualí – Tres Esquinas, los cuales son regulados mediante 2 compuertas ubicadas a orillas de la vía de acceso, con funcionamiento por vasos comunicantes. Adicionalmente, recolecta la escorrentía superficial captada sobre las plataformas viales aferentes, junto con las descargas de agua residual tanto domestica como de las industrias ubicadas en ese sector.

Figura 1-9: Punto 6

Fuente: Elaboración propia

1.2 Justificación

El presente proyecto surge por la afectación de la calidad del agua y la grave situación contaminante que presentan los canales de irrigación del antes llamado distrito de riego La Ramada, debido a que su abastecimiento proviene de aguas lluvia, aguas superficiales del río Bogotá y aguas residuales domésticas, donde se ve afectada, de manera directa, la actividad de la horticultura y en consecuencia la calidad de esos productos para el consumo humano.

El presente estudio se enmarca en la línea de investigación de saneamiento hídrico, la cual tiene como punto de partida los resultados de monitoreo de calidad del agua realizados por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental - LIA desde el año 2017 a 2021 en el sector de interés, y considerando una de las recomendaciones planteadas por Cubides 2018, en la que se refiere a la experimentación con sistemas de tratamiento de tipo biológicos para evaluar la eficiencia en la remoción de agentes patógenos. Dicho esto, el propósito de esta investigación se enfoca en explorar la recomendación del proyecto en mención, mediante la experimentación de un sistema de tratamiento que se adapte a las condiciones propias de la zona como lo es la anaerobiosis, presente en el agua de los canales y con bajos

32 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

requerimientos de energía, buscando así mejorar su calidad. De esta manera, el trabajo busca aportar nuevo conocimiento con respecto al desempeño de sistemas de tratamiento biológicos en aguas para riego, con tecnologías que todavía no han sido evaluados para la zona en estudio, especialmente con relación a la eficiencia que estos puedan aportar para la remoción de carga orgánica, bacterias y/o parásitos. Adicionalmente, se continua con las campañas de monitoreo realizadas desde el año 2017, junto con el análisis de los datos más recientes con respecto a las mediciones realizadas en años anteriores.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar, a escala de laboratorio, un sistema de tratamiento para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética y su eventual aplicabilidad en el riego de cultivos en la sabana occidental de Bogotá.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización hidrológica y de calidad del agua del distrito de riego La Ramada
- Proponer una alternativa de tratamiento que pudiera ser apropiada para mejorar la calidad del agua materia de estudio
- Construir y evaluar, a escala de laboratorio, una planta piloto con la tecnología seleccionada para la reducción de carga orgánica, bacterias y/o parásitos presentes en agua residual utilizada.

3. Marco Teórico

3.1 Tratamiento Biológico de Aguas Residuales

Este tipo de tratamientos como su nombre refiere, ocurren por consecuencia de actividad biológica, aprovechando y maximizando los procesos naturales implícitos en el agua residual para transformar materia orgánica biodegradable, coloidales o disueltas, en productos mineralizados, como acción auto depurativa para la degradación de sustancias contaminantes. Los tratamientos biológicos pueden ser de tipo aerobio, anóxico y anaerobio, lo cual depende de la presencia de oxígeno en el sistema, permitiendo el desarrollo de procesos de oxidación de la carga orgánica y nitrificación, en el caso de los sistemas aerobios; mientras que en sistemas anaerobios se desarrollan procesos de desulfatación, acidogénesis, acetogénesis y de metanogénesis; en cuanto al proceso anóxico, tiene como principal función la desnitrificación anaerobia del agua residual, mediante la conversión bioquímica a partir de vías aerobias. A continuación, se presenta una descripción simplificada de algunos de los sistemas de tratamiento biológicos, tanto aerobio como anaerobios, de mayor aplicación para el tratamiento de aguas residuales.

3.1.1 Tratamiento biológico aerobio

Los procesos de tratamiento aerobios, tienen como fuente de funcionamiento la presencia de oxígeno, utilizado como único receptor de electrones para la generación de energía en el sistema y en consecuencia el crecimiento de organismos. La digestión aerobia, tiene como objetivo la reducción de lodos en el efluente, como resultado de la conversión por oxidación. El proceso se puede realizar de manera continua o discontinua, obteniendo altas eficiencias de biodegradabilidad, en cortos tiempos de retención. A continuación, se describen algunos de los tratamientos biológicos aerobios de mayor aplicación.

- **Lodos activados**

Desde su descubrimiento e invención en Inglaterra en el año 1914 por Edward Arden y William T. Lockett (Jenkins y Wanner 2014), la aplicación de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales ha sido una alternativa capaz de brindar altos valores de eficiencia, especialmente en aquellos casos donde se requiere la remoción de altas concentraciones de materia orgánica y prominentes valores de calidad del efluente, debido a actividades de reúso u objetivos específicos de calidad sobre el cuerpo natural de agua receptor. De acuerdo con Romero 2008, “el lodo activado consiste en una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos, tiene la propiedad de poseer una superficie altamente activa para la absorción de materiales coloidales y suspendidos, a la cual se le da el nombre de activado”, cuyo resultado es la descomposición biológica de la materia orgánica presentes en el agua residual, siendo convertida en compuestos inorgánicos y aumentando el volumen de lodo activado.

En general, el proceso se basa en el llenado y vaciado de tanques de reacción, integrado por una fase líquida, donde se realiza el vertimiento del efluente clarificado sobre un cuerpo natural de agua; y una fase sólida, encargada de tratar y disponer los sólidos extraídos de los sedimentadores, junto con los lodos de exceso del reactor.

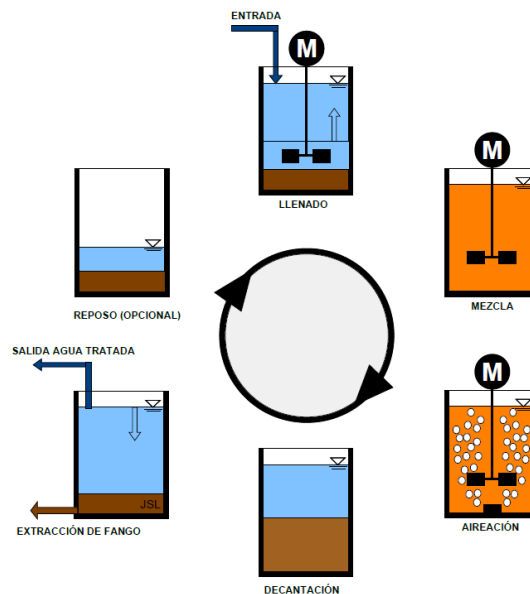
Este tipo de tratamiento es asequible a variaciones en el proceso, según el tipo de flujo de ingreso al reactor, continuo y discontinua; edad del lodo, reducidísima, reducida, intermedia y elevada; tipo de afluente agua, industrial o doméstica. Las variaciones del tratamiento permitiendo remociones con diferentes eficiencias, que varían en función de los requerimientos de calidad en el efluente.

- **SBR (Sequential Batch Reactor)**

El reactor SBR también llamado Sistema de Operación Intermitente o Secuencial por Tandas, se basa en el uso de lodos activados para el tratamiento primario y secundario de aguas residuales tanto domésticas como industriales. La filosofía de funcionamiento es basada en el llenado de un único tanque o reactor de mezcla completa por lotes o tandas, donde se desarrollan principalmente entre 4 y 6 fases con tiempos definidos para lograr la reducción de materia orgánica. En cuanto a los tiempos y fases son variables en cada proceso, dependiendo directamente de la eficiencia en el tratamiento del afluente y requerimientos de remoción.

Como se muestra en la Figura 3-1, el proceso está compuesto principalmente por las etapas de: llenado, reacción, sedimentación y vaciado, teniendo fases complementarias como lo es la mezcla y reposo, lo cual depende de acuerdo al nivel de eficiencia requerido, remoción de nutrientes y el número de reactores disponibles.

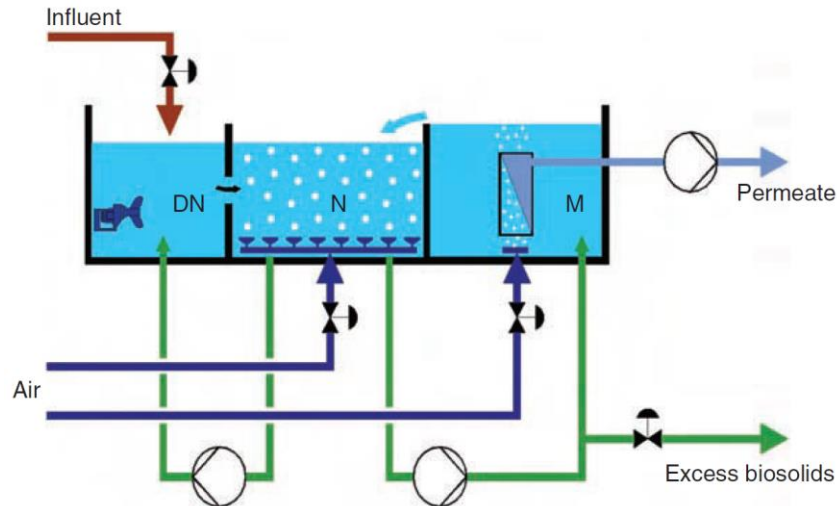
Figura 3-1: Esquema de operación SBR



Fuente: (Suárez, Jácome, y Ures 2015)

▪ **MBR (Membrane Bioreactor)**

El sistema MBR también denominado biorreactor de membrana, funciona con base en un sistema de lodos activados complementado en una etapa posterior con un sistema de ultrafiltración por membrana, permitiendo una mejor calidad del efluente con respecto a un sistema biológico convencional, lo cual es de gran acogida en el tratamiento de aguas del sector industrial y en sitios en los cuales se requiera la reutilización del agua.

Figura 3-2: Esquema de operación MBR

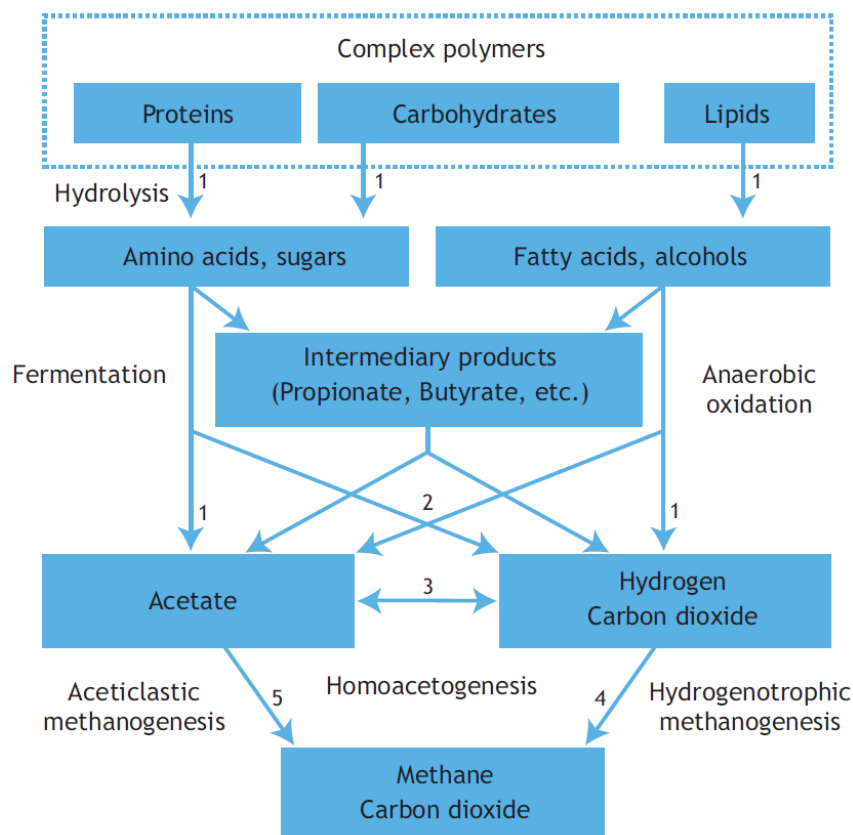
Fuente: (Simon 2006)

▪ Filtro percolador

El filtro percolador también conocido como un biofiltro, es un sistema de tratamiento de aguas residuales de tipo de aerobio, conformado por un tanque relleno con material de soporte de amplia área superficial que permite el desarrollo biomasa adherida dentro del sistema, para lo cual se emplean regularmente materiales como piedras de tamaño variable entre 2.5 cm y 10 cm (Romero 2008), u otro material inerte que impida sus propia biodegradabilidad como lo es el plástico. El funcionamiento del sistema consiste en un sistema de filtración, cuyo ingreso del afluente es usualmente administrado por un brazo rotatorio que distribuye uniformemente el agua sobre la superficie del filtro mediante difusores, generando un flujo descendente del sistema. Adicionalmente, cuenta con un sistema de aireación de flujo ascendente, proveniente de la ventilación natural en el caso de estructuras pequeñas o ventilación forzada en estructuras de gran magnitud, donde la demanda de aire es superior a la oferta de aire captado naturalmente, dado que estos sistemas dependen del aire para aportar el oxígeno que requieren los microorganismos al momento de realizar la biodegradación de las aguas residuales.

disueltos presentes en las paredes de las bacterias fermentativas, son convertidos en compuestos más simples que luego son excretados, produciendo ácidos grasos volátiles, ácidos orgánicos, alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno; acetogénesis, consiste en la digestión de los ácidos orgánicos y alcoholes para su transformación en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, junto con nuevo material celular; finalmente, la metanogénesis es la encargada de convertir los compuestos producto de la acetogénesis en metano y dióxido de carbono.

Figura 3-4: Digestión anaerobia



Fuente: (Van Lier 2008)

A continuación se describen algunos de los tratamientos biológicos anaerobios más utilizados.

▪ Filtro anaerobio

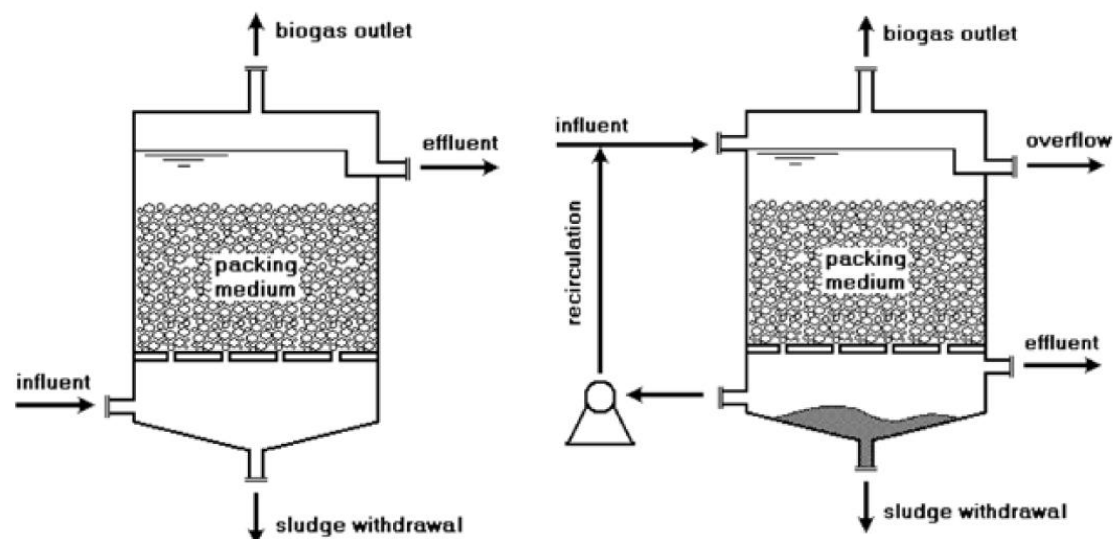
Este sistema de tratamiento es la contraparte anaerobia del filtro percolador. Consiste en la exposición del agua residual a una biopelícula de capa fina, adherida a la superficie del material de soporte.

Una de las características más relevantes del filtro anaerobio es el funcionamiento del lecho fijo de manera sumergida (sin aireación) donde, al contacto del agua residual con la biomasa del reactor y los compuestos orgánicos solubles, éstos se convierten en productos intermedios (como ácidos grasos) y, finalmente, como metano y gas carbónico, entre otros subproductos.

Entre las principales ventajas del sistema se resalta la alta eficiencia en el clarificado del efluente, junto con una baja concentración de materia orgánica, lo cual permite su disposición directa en el suelo y en una siguiente instancia su uso en sistemas de irrigación, luego de ser sometido a una reducción de microorganismos patógenos presentes en el afluente bajo un proceso de desinfección, en caso de que este valor resulte significativamente alto.

Los filtros anaerobios pueden ser de flujo ascendente o descendente, lo cual se define de acuerdo con las condiciones propias del área de instalación (cotas de terreno, cabeza de hidráulica de energía, etc) y la infraestructura disponible para el montaje (equipos de bombeo y dispositivos de conducción).

Figura 3-5: Flujos de filtros anaerobios

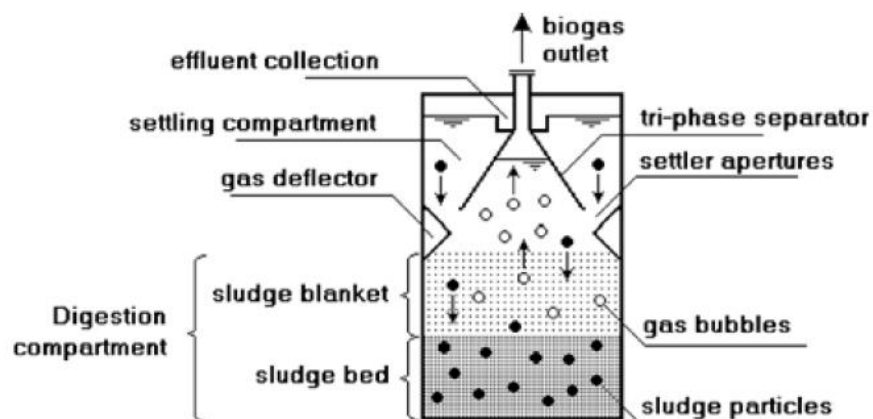


Fuente: (Chernicharo 2007)

▪ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

El reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), más conocido por su sigla en inglés como UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), es un sistema de tratamiento, cuyo principio de funcionamiento consiste en introducir las aguas residuales por el fondo del reactor, y mediante un flujo ascendente a través de un manto de lodo anaerobio compuesto por granos biológicos y partículas de microorganismos, siguiendo un crecimiento disperso de biomasa en el medio líquido, formando flóculos integrados por “material orgánico absorbido, material inerte del residual, material microbiano producido para la matriz, células vivas y muertas” (Von Sperling 2019), se produzca el intercambio de compuestos presentes y la separación de subproductos. La biomasa generada se acumula en el manto de lodos y el agua clarificada se recoge en un clarificador ubicado en la parte superior del tanque. El biogás, producto de la degradación de la materia orgánica se separa y recoge a través de un dispositivo especial localizado en la parte inferior del sedimentador, tal como se muestra en la Figura 4-6. Este sistema cuenta con altos niveles de eficiencia en la remoción de carga orgánica. Sin embargo, la etapa de arranque y estabilización puede implicar mayores tiempos con respecto a otros sistemas de tratamiento de tipo biológico, especialmente los aerobios.

Figura 3-6: Esquema de funcionamiento de UASB



Fuente: (Chernicharo 2007)

En el presente capítulo se exponen las definiciones de mayor relevancia respecto a distritos de riego, tipos de tratamientos biológicos, especialmente con aquellos tratamientos de agua residual más relevantes a nivel mundial para su uso en irrigación de cultivos agrícolas.

3.2 Distrito de riego

En términos generales, un distrito de riego se define como un área de infraestructura destinada a fines agrícolas, organizada con sistemas de canales de irrigación, surcos de siembra, redes de tubería y maquinaria, cuya fuente hídrica proviene bien sea de captación superficial y/o subterránea, permitiendo el desarrollo de la horticultura y a su vez el abastecimiento de alimentos a las ciudades aledañas.

Independientemente del nombre adoptado en cada cultura del mundo para referirse a las áreas de cultivo bajo influencia de sistemas artificiales de irrigación, los distritos de riego han sido utilizados desde tiempos ancestrales para el cultivo y producción de alimentos, en zonas donde las condiciones propias de la geografía impiden el abastecimiento uniformemente distribuido del recurso hídrico para la producción o el desarrollo de cultivos agropecuarios, bien sea por corresponder a zonas de inundación en búsqueda de un control sobre los cultivos en función del río o, caso contrario, situarse en sectores alejados de una fuente hídrica abundante y baja precipitación, donde se requiere de estructuras especiales de captación y largas conducciones de agua para el desarrollo de cultivos y crecimiento de la actividad socio económica.

3.3 Soluciones aplicadas en otros países

A nivel mundial, históricamente, se han utilizado distritos de riego, con fuentes hídricas de buena calidad en cantidades ilimitadas. Sin embargo, tras el desarrollo y auge industrial principalmente en el siglo XX, se ha promovido el éxodo poblacional desde áreas rurales hacia áreas urbanas, causando el crecimiento descontrolado de las grandes ciudades del mundo y afectando directamente las condiciones naturales de calidad del agua de los cuerpos hídricos ante los vertimientos de todo tipo de aguas residuales. Esto sin dejar atrás las consecuencias en el cambio climático que ha traído consigo la sequías y reducción en los niveles de ríos en todo el planeta.

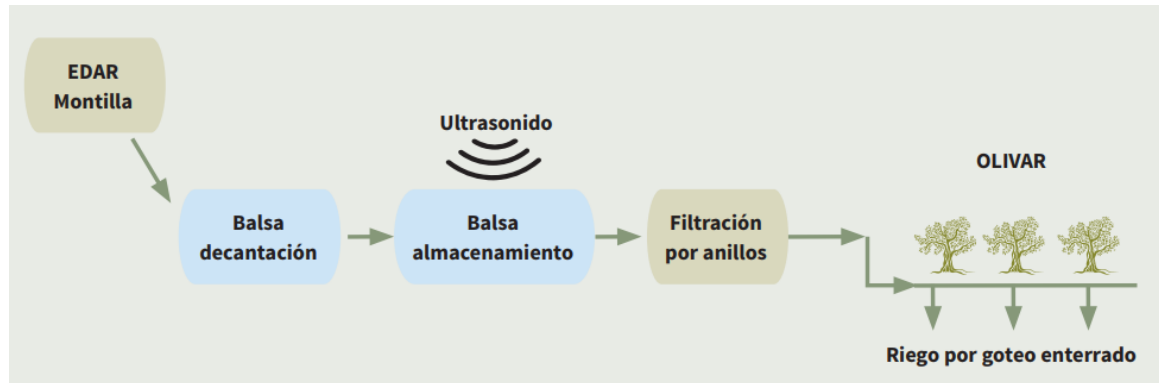
Dicho lo anterior, en las últimas décadas se ha estudiado y analizado la aparición de nuevos contaminantes (emergentes) en las fuentes hídricas, junto con la significativa reducción en la calidad del agua, siendo a su vez utilizada como fuente de abastecimiento

para la riego de cultivos, con lo cual se ha venido promoviendo el tratamiento del agua y reúso de la misma para fines agrícolas, como es el caso de la Comunidad de Regantes Tintín ubicada en la comunidad autónoma de Andalucía (España), donde entre los años 2014 y 2020 se ha estudiado y llevado a cabo el proyecto “REUTIVAR”, el cual consiste en un “Proyecto de innovación cofinanciado por la Junta de Andalucía y la Unión Europea a través del FEADER 2014-20, en el marco de las ayudas de la Línea Olivar para el funcionamiento de grupos operativos de la Asociación Europea de Innovación (AEI) en materia de productividad y sostenibilidad agrícolas” (Reutivar 2020a), obteniendo como resultado un modelo de riego sostenible a partir del tratamiento y reúso de agua para fines de irrigación de cultivos, dada la importancia agrícola y socioeconómica que posee el Olivar en la comunidad de Andalucía; además de las variables climatológicas presentadas en la región, entre las que se encuentra el déficit hídrico y el incremento de la demanda de agua ante los escenarios futuros de cambio climático.

El tratamiento y reúso del agua se realiza a partir de la construcción de estructuras de tratamiento de aguas residuales, conectadas en serie sobre la Comunidad de Regantes Tintín (ver Figura 3-7), tomando como punto de partida la EDAR Montilla (Estación depuradora de aguas residuales), conformada por una planta de lodos activados con aireación extendida, cuyo efluente es descargado en un embalse de decantación y el clarificado es conducido luego a un reservorio de almacenamiento, donde se realiza el tratamiento secundario para la eliminación de microalgas mediante la aplicación de tecnología de ultrasonido. Una vez se obtiene el clarificado de esta etapa, se somete a un tratamiento terciario bajo un proceso de microfiltración con filtros de anillas de tipo automático. Cabe mencionar que la desinfección de las aguas se realiza con aplicación de permanganato de potasio en el embalse de decantación y almacenamiento, sin dejar atrás las tuberías de irrigación, cuya desinfección final se realiza con ácido peracético (Reutivar 2020b).

- 44 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Figura 3-7: Sistema de tratamiento proyecto “REUTIVAR”



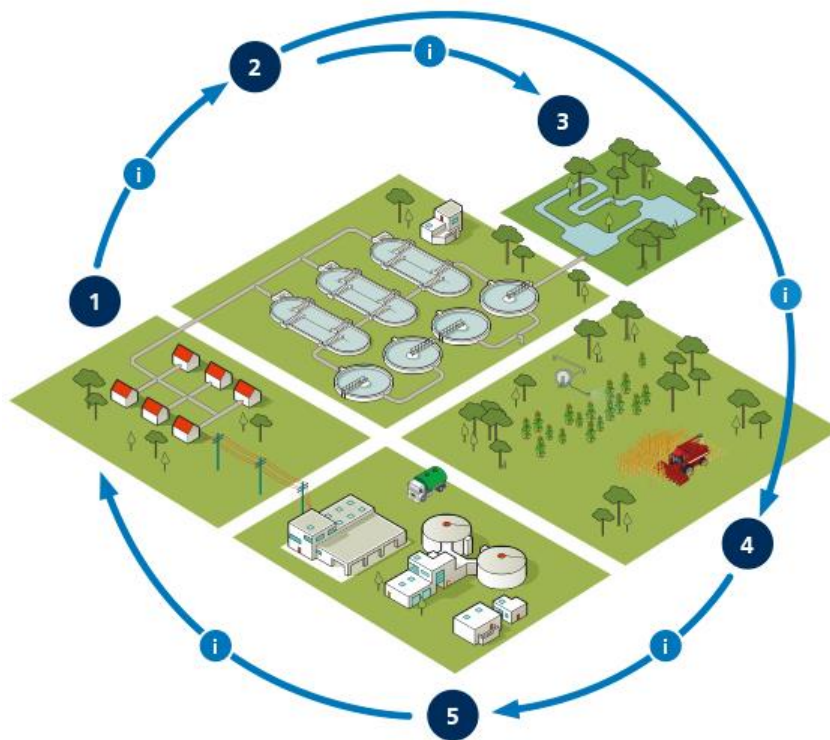
Fuente: (Reutivar 2020b)

Otro de los casos documentados de tratamiento y reúso de agua para fines agrícolas se presenta en Alemania, más específicamente en la ciudad de Braunschweig, ubicada al norte de Baja Sajonia. Tras la segunda guerra mundial, la escasez de alimentos y dadas las condiciones propias de la región como: la aridez de la tierra y el bajo contenido de nutrientes, las escasas precipitaciones en la región frente al promedio nacional, junto con la necesidad de alimentar a la población, se fundó en 1954 la asociación de aguas residuales de Braunschweig (Abwasserverband-Braunschweig), ideando un sistema capaz de irrigar los suelos arenosos de la zona, manteniéndolos húmedos y a su vez fortificarlos con nutrientes provenientes de las aguas residuales tratadas en la planta de tratamiento de aguas residuales de tipo biológico existente hasta entonces en la ciudad. Todo, con el fin de adaptar el suelo a condiciones agrícolas y permitir el cultivo de diferentes productos como maíz, remolacha, cereales, centeno, entre otros, lo cual se ha denominado “El Modelo Braunschweig” o en su idioma original como “Das Braunschweiger Modell”.

El funcionamiento del modelo de Braunschweig se expone en la Figura 3-8, teniendo como como punto de partida la generación de las aguas residuales de tipo domestico de 290.000 habitantes, con un consumo promedio de 122 litros/habitante*día (1), las cuales son conducidas hasta la planta de tratamiento Steinhof (Klärwerk Steinhof), con capacidad de tratamiento de 60.000 m³/d, siendo tratadas con procesos fisicoquímicos y biológicos (2). Una vez efectuado el proceso de tratamiento de las aguas residuales domésticas, se destina 1/3 del caudal tratado para el riego de 220 hectáreas de campos por aspersión e infiltración. Esto, con la finalidad de mantener húmedo el suelo y generar almacenamiento

de agua en sitios de absorción y a su vez la formación de biotopos (3). Por otra parte los 2/3 de agua restantes son destinados a la irrigación de los campos agrícolas, buscando equilibrar el balance hídrico de la zona. Adicionalmente, los residuos sólidos producto del proceso de tratamiento, se disponen como abono orgánico y fertilizantes sobre una superficie de 2700 hectáreas de campos agrícolas (4). Dentro del área de asociación se cuenta con un 38% de la superficie destinada a la producción de materias primas renovables para la generación de biogás, el cual es transportado a través de tubería de gas subterránea hasta la ciudad, donde se transforma en energía para calefacción (5).

Figura 3-8: Modelo Braunschweig

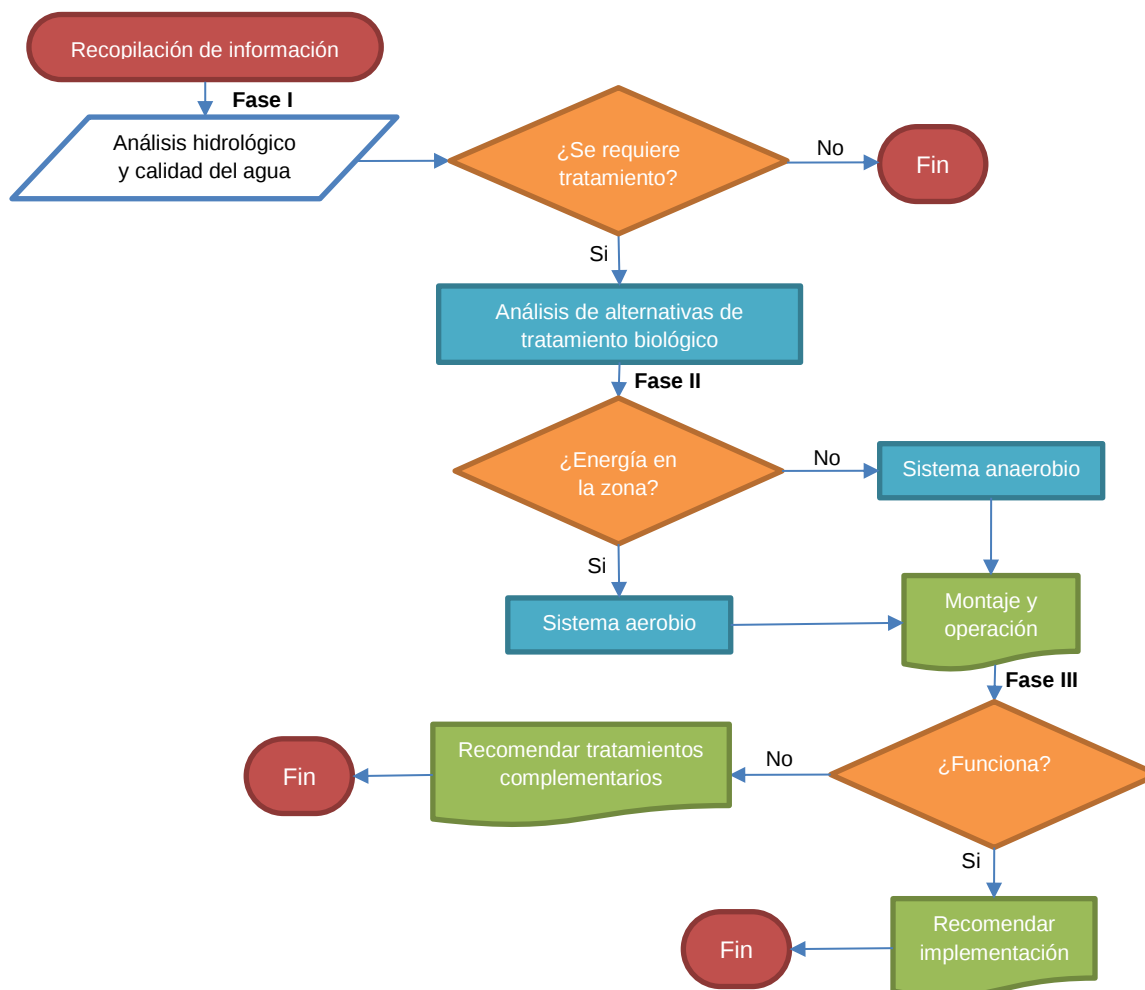


Fuente: (Abwasserverband-Braunschweig s. f.)

4. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos, se estableció la siguiente metodología que comprende tres (3) fases compiladas en la Figura 4-1 y cuya descripción se presenta posteriormente.

Figura 4-1: Diagrama metodológico



Fuente: Elaboración propia

4.1 Fases de ejecución

La metodología llevada a cabo para el cumplimiento de los objetivos establecidos fue realizada por fases o etapas, de acuerdo con el orden de las actividades propias del proyecto, tal y como se exponen a continuación:

- Fase I: Recopilación de la información hidrológica disponible sobre las características del distrito de riego La Ramada. Adicionalmente, se continuó con el monitoreo de calidad del agua, realizando cuatro (4) campañas de muestreo en seis (6) puntos de monitoreo.
- Fase II: Una vez desarrolladas las actividades antes mencionadas, se procedió con el análisis comparativo de los sistemas de tratamiento potencialmente aplicables para la zona en estudio, de acuerdo con diferentes criterios asociados a las características de calidad del agua y condiciones propias del sector.
- Fase III: La fase final del proyecto inició con el montaje y operación de un sistema piloto, a escala de laboratorio, realizando las pruebas pertinentes para el arranque y estabilización del sistema de tratamiento, midiendo la eficiencia del sistema frente a diferentes escenarios de caudal y de carga orgánica; además de la inoculación del sistema con huevos de parásito de Helminths, coliformes totales y coliformes fecales.

4.2 Materiales y métodos

En el presente consecutivo se exponen los materiales y métodos utilizados para la elaboración de la investigación, donde se describe la manera de ejecución para el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos.

4.2.1 Recopilación de información hidrológica

La caracterización hidrológica del sector en estudio se realizó principalmente a partir del análisis regional de lluvia, bajo la verificación de la incidencia de las estaciones de monitoreo tanto pluviográficas como pluviométricas existentes sobre la superficie de la Sabana Occidental de Bogotá, con información principalmente de precipitación mensual, junto con la amplitud de los registros históricos, por lo cual se ha utilizado la información disponible en las bases de datos de entidades como la CAR Cundinamarca y el IDEAM, donde se observa la existencia de 8 estaciones de monitoreo, con registros históricos de

Al momento de la toma de la muestra fueron medidos in situ parámetros como: temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto, tomados mediante un medidor multiparámetro portátil con sus respectivas sondas de medición, los cuales son dependientes de las condiciones ambientales durante el monitoreo. Los resultados de la medición están incluidos en el Anexo 1. Por parte, los demás parámetros considerados, fueron medidos en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional (LIA), de acuerdo con los procedimientos estipulados en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Baird, Eaton, y Rice 2017), expuestos en la Tabla 4-2. Dichas mediciones de DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales, NTK, fósforo total, nitritos, nitratos, cloruros, sulfatos, COT, fluoruros, bromuros, fosfatos, coliformes totales y *E. coli*, son reportadas en el Anexo 1.

Tabla 4-2: Métodos y equipos de medición utilizados en el monitoreo

Parámetro	Unidades	Método	Equipo
pH	Unidades	SM 4500 H+B	Multiparámetro portátil Hach
Conductividad Específica	μS/cm 25°C	SM 2510 B	Multiparámetro portátil Hach
Temperatura	°C	SM 2550 B	Multiparámetro portátil Hach
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	SM 4500-O G	Multiparámetro portátil Hach
DBO ₅	mg/L O ₂	SM 5210 B SM 4500 OG	Oxímetro WTW InoLab 2 Oxi P
DQO	mg/L O ₂	SM 5220 C	Termo-reactor Spectroquant TR 420 con Titulador Automático Mettler Toledo DL 50
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SM 2540 D	Balanza Digital marca Mettler Toledo ML 204
NTK	mg/L-N	SM 4500 N-NH ₃	digestor Büchi Digestion Unit K-424, y un destilador Büchi Distillation Unit K- 314, BüchiScrubber B-414.
Fósforo Total	mg/L P-PO ₄ ³⁻	SM 4500 P B D	Spectronic 21D
Nitritos	mg/L N-NO ₂ ⁻	SM 4110 B	Cromatógrafo Dionex ICS-900
Nitratos	mg/L N-NO ₃ ⁻	SM 4110 B	Cromatógrafo Dionex ICS-900
Cloruros	mg/L Cl ⁻	SM 4110 B	Cromatógrafo Dionex ICS-900
Sulfatos	mg/L SO ₄ ²⁻	SM 4110 B	Cromatógrafo Dionex ICS-900
COT	N/A	SM 5310 C	Termo-reactor Spectroquant TR 420 con Titulador Automático Mettler Toledo DL 50
Fluoruros	mg/L F ⁻	SM 4110 B	Cromatógrafo Dionex ICS-900
Bromuros	mg/L Br ⁻	SM 4110 B	Cromatógrafo Dionex ICS-900
Fosfatos	mg/L PO ₄ ³⁻	SM 4110 B	Cromatógrafo Dionex ICS-900
Coliformes Totales	NMP/100ml	NMP	Estufa Cenco – Lampara UV
E.coli	NMP/100ml	NMP	Estufa Cenco – Lampara UV

Fuente: Adaptado de (Universidad Nacional de Colombia 2022)

Basado en los resultados obtenidos de DBO₅ y DQO de las muestras recolectadas, se calculó la relación promedio entre estos parámetros, detectando preliminarmente los datos anómalos de la relación, mediante la elaboración de un diagrama tipo Boxplot, de tal forma que no influya en el cálculo de la desviación estándar de la misma. Dicho esto, fue descartado 1 dato entre 36 calculados, dicho dato descartado, corresponde a la relación entre DBO₅ y DQO recolectados en el punto 1, durante el primer muestreo.

4.3 Alternativas de Tratamiento

Para el tratamiento de las aguas de riego en el “*Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada*”, se consideró, en este estudio, la aplicación de tratamientos de tipo biológico. Por ello, para la selección del proceso a evaluar es necesario tener en cuenta los principios que rigen tanto los procesos aerobios como los sistemas anaerobios, buscando establecer la viabilidad del tipo de tratamiento más apropiado para la zona de estudio, contrastado con las condiciones actuales del agua para la irrigación de cultivos, requerimientos de energía y espacio, junto con los costos de operación y mantenimiento. A continuación, se hace una breve descripción de los procesos y tecnologías más representativos en materia de tratamiento de aguas residuales que pueden ser objeto de selección.

4.3.1 Selección de alternativa de tratamiento

Teniendo en cuenta las diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales aplicables en la zona de estudio (descritas en los consecutivos 3.1.1 y 3.1.2 del presente informe) y, aplicando la metodología propuesta, se realiza un cuadro de valoración de alternativas para el análisis de viabilidad de los diferentes sistemas de tratamiento, teniendo en cuenta las condiciones propias del área de influencia, tales como: la topografía, disponibilidad de área constructiva, climatología, hidrología, hidrografía, cobertura de suelo, junto con las características del agua residual afluente, requerimientos de eficiencia del efluente y costos de montaje, operación y mantenimiento. De acuerdo con lo anterior, se exponen en la Tabla 4-3 los criterios de implantación de cada uno de los sistemas de tratamiento analizados sobre el área de estudio, donde se asignan valores de calificación de 1 a 3, siendo 1 el criterio de menor conveniencia y 3 el de mayor favorabilidad en cada

uno de los aspectos considerados. Cabe mencionar que los criterios de evaluación seleccionados, fueron adoptados siguiendo las consideraciones expuestas en la Guía de gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales (Ministerio de ambiente 2002).

Tabla 4-3: Cuadro de valoración de tratamientos (Análisis multicriterio)

Tecnología Criterio de implantación	Lodos Activado	SBR	MBR	Filtro Percolad	Filtro anaerobi	UASB
Requerimiento de espacio	1	2	2	1	3	3
Costo de inversión	2	2	1	2	3	1
Complejidad construcción	2	2	1	2	3	1
Estabilización del sistema	2	3	2	2	2	2
Requerimientos de energía	1	1	1	2	3	2
Eficiencia de tratamiento	2	3	3	2	2	3
Generación de olores	2	2	3	2	1	3
Costo de operación y mantenimiento	2	3	2	2	1	2
Total	14	18	15	15	18	17

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados expuestos en la Tabla 4-3, se deduce que para las aguas residuales circundantes en los canales de irrigación, junto con las condiciones socioeconómicas del sector en estudio, resultaría apropiado el uso de tratamientos como un filtro anaerobio o sistemas más robustos como es el caso del SBR, debido a que su relación de eficiencia - costo – beneficio, reflejan la mayor conveniencia al momento de su implementación. Para el caso específico del filtro anaerobio, es de destacar su bajo costo de inversión y operación, eficiencias teóricas en la literatura (Von Sperling 2012) para la remoción de la concentración de DQO entre el 70% y 80%; DBO₅ entre el 80% - 85%; sólidos suspendidos del 80% al 90%; y presencia de huevos de parásito superiores a 1h/L, además de no requerir áreas muy grandes de instalación, teniendo en cuenta, además, que la generación de olores y la disposición de lodos no afecta sectores residenciales, dado que la zona de influencia corresponde a uso agrícola y pecuario. Esto, sin dejar atrás que es un sistema sencillo, adaptable y sostenible.

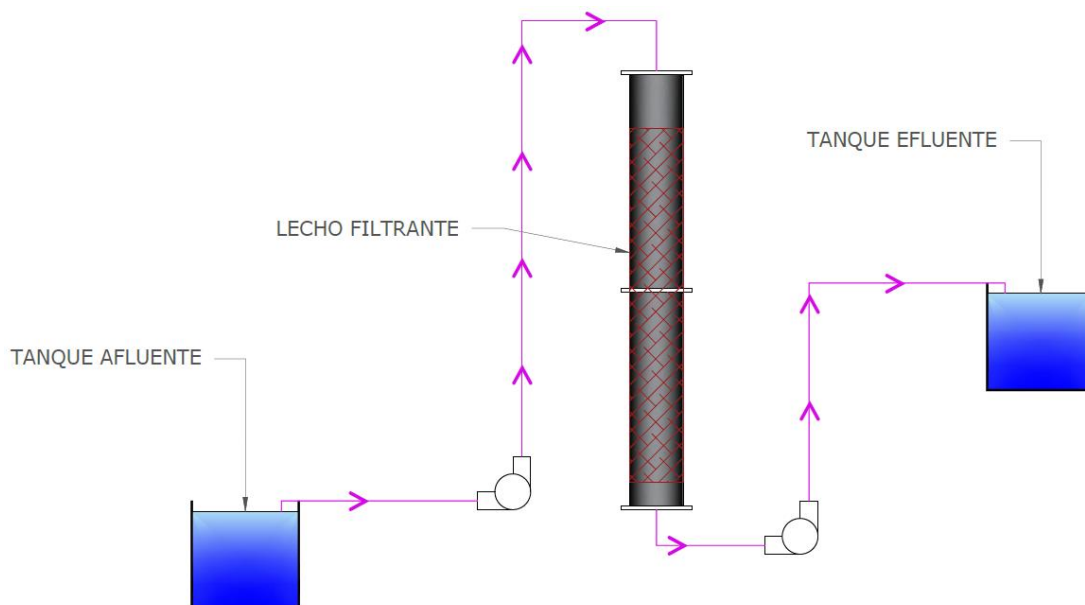
4.3.2 Diseño de la planta piloto de tratamiento

Una vez seleccionado el sistema de tratamiento a evaluar, se procedió al dimensionamiento de los componentes requeridos, tal como se describe a continuación.

▪ Configuración del sistema de tratamiento

La planta de tratamiento a escala piloto está basada en un modelo hidráulico de flujo en pistón, permitiendo la constante entrada de caudal de un extremo a otro de la estructura, sin mezclas dentro del sistema y permaneciendo dentro de este durante un tiempo determinado de retención hidráulica. La planta piloto está compuesta por una etapa de almacenamiento de afluente, un filtro anaerobio de flujo descendente en forma cilíndrica, una etapa final de almacenamiento de efluente y una bomba peristáltica Masterflex L/S con cabeza de 8 rodillos, acompañada de cassettes de impulsión que conecta la secuencia entre etapas (ver Figura 4-2 y Figura 4-3).

Figura 4-2: Configuración de la planta piloto



Fuente: Elaboración propia

En la etapa inicial de almacenamiento se ha dispuesto de dos tanques plásticos, uno de capacidad de llenado de 20 litros, acompañado de un segundo tanque de 120 litros que hace las veces de reservorio, conectados entre sí, mediante un sistema de vasos

comunicantes, integrado por una bomba manual, flotadores, mangueras y válvulas tanto de cierre como tipo check. La segunda está conformada por una columna acrílica de 14.5 cm de diámetro y 1.20 m de altura, con capacidad de 19.8 litros, conformado por el estrato filtrante compuesto por un medio soporte plástico tipo bola de uso comercial, elementos en forma de hexápodos y esferas dispuestas en aquellos espacios que el relleno tipo bola no alcanza a ocupar, permitiendo el crecimiento de biomasa de manera adherida al medio de soporte en forma de biopelícula. La fase final consta de un tanque acrílico de 40 litros, con un vertedero de rebose y válvulas de cierre para el drenaje, destinado al almacenamiento del efluente proveniente del filtro anaerobio.

Figura 4-3: Sistema de bombeo



Fuente: Elaboración propia

▪ Dimensionamiento del filtro anaerobio

La definición del estrato filtrante para el tratamiento del agua residual, se realizó bajo la consideración del material utilizado, porosidad del sistema del 75%, una columna acrílica de diámetro 14.5cm y altura de 1.20m, por lo cual se seleccionó y adquirió un relleno plástico tipo bola con diámetro de 7.5cm, utilizado comúnmente para sistemas de tratamiento anaerobio, junto con hexápodos plásticos de 2.2 cm de altura y esferas plásticas de 2.5cm de diámetro, comercializados popularmente para uso recreativo en juegos infantiles, en la Figura 4-4 se presenta el medio de relleno utilizado y la manera como se han acomodado dentro del estrato. Adicionalmente, se utilizó un falso fondo plástico de 6cm de altura, esto teniendo en cuenta que corresponde a una planta piloto a escala de laboratorio.

- 54 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Figura 4-4: Relleno plástico del estrato filtrante



Fuente: Elaboración propia

▪ **Calculo hidráulico del estrato filtrante**

El sistema se diseñó para un caudal inicial de operación de 10 L/d, en condiciones de temperatura ambiente en un rango entre 10°C y 25°C, debido a que dichas temperaturas son semejantes a las presentadas en la zona de estudio, por lo que se asume un tiempo de retención hidráulica de 1 día de acuerdo con criterios expuestos en la literatura (Chernicharo 2007) y reflejados en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Cuadro de valoración de tratamientos

Caudal (Q) (L/d)	Tiempo de retención hidráulica (día)		
	$t < 15^{\circ}\text{C}$	$10^{\circ}\text{C} \leq t \leq 25^{\circ}\text{C}$	$t > 25^{\circ}\text{C}$
Hasta 1500	1.17	1.00	0.92
Entre 1501 y 3000	1.08	0.92	0.83
Entre 3001 y 4500	1.00	0.83	0.75
Entre 4501 y 6000	0.92	0.75	0.67
Entre 6001 y 7500	0.83	0.67	0.58
Entre 7501 y 9000	0.75	0.58	0.50
Mayor a 9000	0.75	0.50	0.50

Fuente: Adaptado de (Chernicharo 2007)

Luego de definido el tiempo de retención hidráulica, se realizó el procedimiento de cálculo a partir de la metodología de diseño de filtros anaerobios expuesta por Chernicharo

(Chernicharo 2007), donde se presenta el cálculo del volumen del sistema (V) bajo la aplicación de la Ecuación (4.1).

$$V = 1.60 * Q * t \quad (4.1)$$

$$H = V/A \quad (4.2)$$

$$Vm = h * \frac{\pi}{4} * \phi^2 \quad (4.3)$$

$$Vf = \sum V_{Bola} + V_{Esferas} + V_{Hexapodos} \quad (4.4)$$

$$Vv = Vm - Vf \quad (4.5)$$

$$\eta = \frac{Vv}{Vm} \quad (4.6)$$

Donde:

Q: Caudal de diseño [l/d]

t: Tiempo de retención hidráulica [d]

V: Volumen del sistema [cm³]

H: Altura de llenado [cm]

h: Altura del estrato filtrante [cm]

ϕ : Diámetro de la columna [cm]

Vm: Volumen de ocupación del estrato filtrante [cm³]

Vf: Volumen del material filtrante [cm³]

Vv: Volumen de vacíos [cm³]

η : Porosidad [%]

Una vez calculado el volumen total del sistema (16 litros), junto con el volumen de ocupación del estrato filtrante (14.2 litros) y basados en las dimensiones de la columna acrílica que contiene el sistema, se procedió a realizar el cálculo de la altura necesaria del estrato filtrante (h) bajo condiciones de porosidad del 75%, considerando el volumen de los elementos de relleno utilizados para el medio filtrante (Vf) que se muestran en la Tabla 4-5, esto a partir de métodos iterativos para definir la cantidad requerida de cada uno de los elementos a utilizar, siendo equivalente a 42 bolas, 178 esferas y 178 docenas de hexápodos (2136 unidades), para un volumen de estrato filtrante de 3540.44 cm³.

- 56 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Tabla 4-5: Volumen del estrato filtrante

Elemento	Vol. Unitario	Cantidad	Vol. Total	Vol. Estrato Filtrante
Relleno tipo bola	31.52 cm ³	42	1323.91 cm ³	3540.44 cm ³
Esferas plásticas	8.18 cm ³	178	1456.26 cm ³	
Hexápodos plásticos	0.356 cm ³	2136	760.27 cm ³	

Fuente: Elaboración propia

En función de los volúmenes unitarios expuestos en la Tabla 4-5, se realizó el cálculo de la altura de llenado de la columna, volumen de vacíos (Vv) y altura del estrato filtrante, como se muestra en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Características físicas del estrato filtrante

Variable	Valor
Q	10.0 l/d
t	1.0 d
V	16000.0 cm ³
φ	14.5 cm
A	165.1 cm ²
H	96.9 cm
h	85.7 cm
Vm	14156.3 cm ³
Vf	3540.4 cm ³
Vv	10615.9 cm ³
η	75.0%

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Puesta en marcha del sistema

Desde el inicio de la operación del filtro anaerobio de flujo descendente y hasta la formación de una primera fase de biopelícula, se adelantó el seguimiento y control del sistema por un periodo de 8 meses, a partir de la inyección de agua residual sintética (ARS) como afluente, bajo condiciones de operación previas, monitoreando el pH, oxígeno disuelto, temperatura y DQO, incrementando sistemáticamente la concentración de carga orgánica, así como los caudales de operación. Es de mencionar que durante los primeros 36 días de operación con ARS, el sistema contó con un termostato dispuesto en el tanque de almacenamiento del afluente, calibrado para mantener el afluente en un rango entre 25 y 38°C. Dicho termostato fue retirado del sistema a partir del día 37, momento en el cual se consideró conveniente efectuar la operación del sistema a la temperatura ambiente.

Como se mencionaba anteriormente, la operación del sistema se realizó utilizando agua residual sintética como afluente, cuya preparación se desarrolló con agua desionizada, centrando su principal fuente de carbono en el contenido de glucosa anhidra, glicerol y cloruro de amonio, tal y como se presenta en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Agua residual sintética

Reactivo	Concentración
Glucosa	3900 mg/l
Glicerol	200 mg/l
Cloruro de amonio	720 mg/l
Cloruro de sodio	100 mg/l
Dihidrógeno de fosfato de potasio	60 mg/l
Cloruro de calcio dihidratado	48 mg/l
Sulfato de magnesio hidratado	15 mg/l

Fuente: adaptado de (Martínez 2019)

En la Tabla 4-7, se presenta la composición de agua residual sintética utilizada en otras investigaciones anteriores (Martínez 2019), con plantas pilotos de tratamiento de aguas residuales que también podrían ser aplicables en el sector de La Ramada. A partir de la composición en mención, en la presente investigación se realizó la verificación del valor de DQO de la misma, obteniendo un valor aproximado de 3900 mg/l O₂. Se tomó ésta como referencia para uso en la experimentación, teniendo en cuenta su comportamiento en las investigaciones previas. Para el caso de la operación del sistema y por practicidad de la experimentación, debido a los amplios caudales utilizados, se concentró la fórmula 3 veces (11700 mg/l O₂), para luego realizar las respectivas diluciones a los valores experimentales de concentración, hasta conseguir una concentración media del orden de 170 mg/l DQO durante el arranque del sistema, incrementando progresivamente a concentraciones del orden de 200, 400 y 700 mg/l O₂, las cual son representativas a las evidenciadas en los monitoreos de calidad del agua realizados en el sector de La Ramada.

Por otra parte, el pH del afluente fue regulado a valores entre 6.5 a 7.6 (Romero 2008), buscando condiciones favorables para el sistema de tratamiento, debido a que el agua desionizada cuenta con un pH promedio de 5.5, de acuerdo con las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio. Dicho lo anterior, se utilizó bicarbonato de sodio (NaHCO₃) como solución buffer, siendo este un reactivo con pH poco invasivo con la biopelícula formada en el filtro anaerobio, y cercano a los valores de pH ideales de operación, en contraste con otros reactivos que permiten incrementar el pH, como lo es el carbonato de calcio (CaCO₃) y el hidróxido de sodio (NaOH), cuyos valores de pH son

superiores a 12, los cuales fueron probados a partir de dosificaciones en el afluente al inicio de la experimentación, pero los resultados de pH en el efluente fueron inferiores a 5, además de evidenciarse acidificación del afluente en el tanque de almacenamiento durante periodos superiores a 1 día, debido a que el reactivo se precipita y no mantiene el pH esperado en el afluente, siendo esto poco favorable en miras de reúso en actividades agrícolas, lo cual no ocurrió con el bicarbonato de sodio, además, este último es un reactivo de fácil manipulación y consecución comercial, esto en miras de su aplicación en el área de proyecto.

4.3.4 Seguimiento del sistema

Una vez puesto en marcha el filtro anaerobio de flujo descendente, se realizó el seguimiento de la calidad agua a lo largo de todo el periodo de operación, recolectando muestras puntuales de manera periódica. Dichas muestras fueron utilizadas para el análisis de los parámetros de calidad del agua, tales como: oxígeno disuelto, temperatura, pH y DQO, junto pruebas ocasionales de turbiedad y conductividad, en función de evaluar el comportamiento y condiciones del sistema propias de la operación, a partir del contraste de los resultados entre afluente y efluente. Además, luego de lograr la estabilidad del sistema, se midió la alcalinidad total y los ácidos grasos volátiles (AGV) presentes en el efluente del reactor (Díaz-Báez, Espitia, y Molina 2002; Ortegón V 2016), con el objetivo de monitorear el funcionamiento del filtro y evaluar su estabilidad durante las etapas de la digestión anaerobia, así de esta manera, controlar los niveles óptimos de operación, mediante la adición de bicarbonato de sodio y, en escenarios críticos de desestabilización, proceder a la recirculación del sistema durante periodos superiores a 1 día. A continuación, se presentan los métodos y equipos utilizados para la medición los parámetros de calidad del agua (Tabla 4-8), con los cuales se realizó el seguimiento del sistema de tratamiento, dichas pruebas se realizaron en su totalidad por el Laboratorio de Ingeniera Ambiental (LIA) de la Universidad Nacional de Colombia.

Tabla 4-8: Métodos y equipos utilizados en la operación del sistema

Parámetro	Unidades	Método	Equipo
pH	Unidades	SM 4500 H+B	Multiparámetro portátil Hach
Conductividad Específica	μS/cm 25°C	SM 2510 B	Multiparámetro portátil Hach
Temperatura	°C	SM 2550 B	Multiparámetro portátil Hach
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	SM 4500-O G	Multiparámetro portátil Hach
DQO	mg/L O ₂	SM 5220 C	Termo-reactor Spectroquant TR 420 con Titulador Automático Mettler Toledo DL 50 y Titulación manual
Turbiedad	NTU	SM 2130 B	Turbidímetro portátil Hach
Alcalinidad total	mgCaCO ₃ /L	2320 [Indicador]	Titulación manual
Ácidos grasos volátiles	mgDQO/L	SM 5560 C	Titulación manual
Coliformes Totales	NMP/100ml	NMP	Estufa Cenco – Lampara UV
E.coli	NMP/100ml	NMP	Estufa Cenco – Lampara UV

Fuente: Adaptado de (Universidad Nacional de Colombia 2022)

▪ Inoculación de huevos de parásitos de Helmintos

Luego de estabilizado el sistema de tratamiento e iniciando la etapa final de operación, se realizó la inoculación del filtro anaerobio de flujo descendente con huevos de parásitos de Helmintos, a partir de la fortificación del agua residual sintética utilizada como afluente, cuya concentración se definió de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación de Chandillo & Sánchez (2020), denominada “*Detección de huevos de helmintos en aguas empleadas para riego de cultivos, en el municipio de Mosquera (Cundinamarca)*” (Chandillo y Sánchez 2020), donde se observó la presencia de 5 géneros de huevos de helmintos en las 96 muestras de agua analizada, provenientes de los canales de riego del antes llamado distrito La Ramada. *Ascaris* (34.37%) y *Ancylostomideos* (41.66%), fueron los géneros más representativos, con concentraciones de 0.81 y 1.53 huevos por litro (h/L), respectivamente. Teniendo en cuenta los datos obtenidos por los autores, el ensayo piloto de remoción se realizó empleando huevos de la especie *Ascaris suum*, cuya especie de este género es de distribución mundial y de interés en salud pública (Escalante et al. 2005), se caracterizan porque las hembras llegan a producir cerca de 200 mil huevos diarios que se eliminan con las heces del hospedador (Morales et al., 2015).

El ensayo se realizó por triplicado y cada réplica se inoculó con 500 huevos en un volumen de afluente de 5 litros, que fueron tratados en intervalos de tiempo de 7 horas y 40 minutos. Esto corresponde a la tercera parte del tiempo de retención hidráulica del sistema, junto con un caudal promedio de 15.68 L/d.

El procedimiento completo para el aislamiento de los huevos y su respectivo método de detección en el efluente denominado como Bailenger modificado (R. Ayres y Mara 1996), se encuentra incluido en la tesis de maestría *"Identificación y prevalencia de parásitos de interés en salud pública, en aguas de riesgo y hortalizas de la sabana occidental de Cundinamarca"* (Ospina 2022). La tesis en mención, en conjunto con la presente investigación, se encuentran enmarcadas de manera interdisciplinar en el macroproyecto titulado *"Identificación de contaminantes emergentes y microbiológicos, análisis metagenómico bacteriano y perfil de resistencia a antibióticos en aguas de riego y hortalizas de la Sabana occidental de Cundinamarca"*, avalado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias).

▪ Inoculación de bacterias

En la etapa final de operación del reactor, se inoculó el sistema con bacterias, en concentraciones similares a los valores máximos reportados en las campañas de toma de muestra, realizadas en esta investigación, donde se encontró la presencia de coliformes fecales y totales. Dicho lo anterior, la inoculación del reactor se realizó a partir de tres tipos de bacterias certificadas, tales como: *E. coli* (ATCC 25922), *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028) y *Klebsiella aerogenes* (ATCC 13048), teniendo en cuenta que la suma de los tres tipos de bacterias corresponde a la concentración de coliformes totales, mientras que la concentración de *E. coli* representa la concentración de coliformes fecales en el agua. La concentración inicial de bacterias para la inoculación, se fijó a partir de la escala de McFarland, cuyo principio se basa en el recuento estimado de coliformes a partir de la absorbancia de la muestra, medida en espectrofotómetro, calibrado con longitud de onda de 600nm.

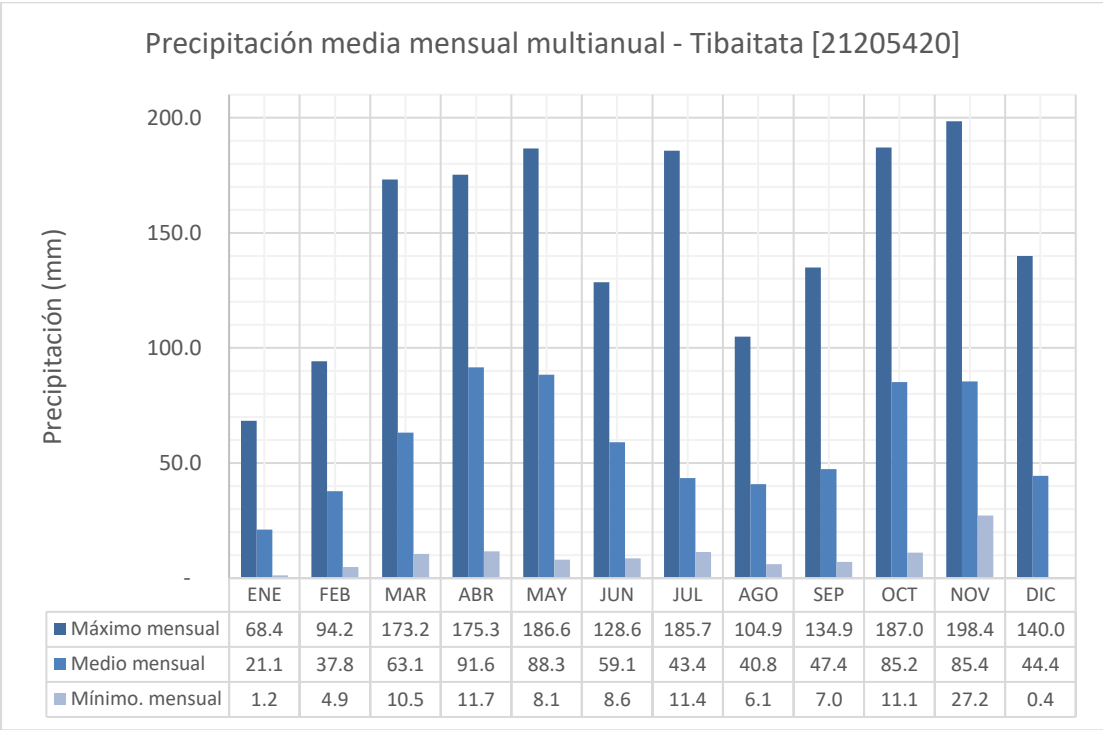
Una vez preparada la concentración tanto de coliformes fecales como totales, se fortificó 100 ml de agua residual sintética, la cual fue inyectada en el reactor, con el mismo caudal de operación. Luego de la inyección de bacterias en el sistema, y pasado el tiempo de retención hidráulico (24 horas), se realizó la medición de bacterias presentes en el efluente del sistema de tratamiento.

5. Resultados y análisis

5.1 Caracterización Hidrológica

De acuerdo con los registros de monitoreo presentados en la Tabla 4-1 y el periodo de diseño (1979 - 2021) asignado en el consecutivo 4.2.1 del presente documento, se realizó el análisis del régimen de lluvia en la Sabana Occidental de Bogotá, basado en los registros de precipitación mostrados, donde se observa un comportamiento de lluvia (coherente) de tipo bimodal, con picos máximos de precipitación media mensual multianual en los meses de abril y noviembre, con valores de 91.6mm y 85.4mm respectivamente; así mismo, se observan temporadas secas en los meses de enero – febrero y julio - agosto.

Gráfica 5-1: Hietograma de precipitación – Estación Tibaitatá



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se incluyen los registros de monitoreo en el Anexo 1, junto con el procesamiento de la información hidrológica de la zona en estudio en el Anexo 2, donde se presenta la estimación de la intensidad de lluvia a partir de la deducción de las curvas IDF, bajo la aplicación de la metodología de los autores Vargas y Diaz-Granados (Vargas M y Diaz-Granados 0 1998).

Para el caso específico de la temporalidad de la lluvia comprendida entre los meses de octubre 2020 a abril 2021, periodo en el cual fueron ejecutadas las 4 campañas de muestreo de calidad del agua, se tiene que de acuerdo con los boletines de monitoreo del IDEAM (Serna 2020), Colombia presentó una variedad climática a lo largo de todo el país, atravesado por una transición entre el periodo final del fenómeno del Niño e iniciando el fenómeno de la Niña, dado que entre los meses de agosto y septiembre de 2020 se evidencio un decrecimiento progresivo en la temperatura de las aguas en el Pacífico tropical y aumentando la corriente de los vientos alisios del este, iniciando la transición del fenómeno del Niño hacia el fenómeno de la Niña que influenciaron las altas precipitación a partir del mes de noviembre de 2020 bajo una condición de Niña moderada e incrementado la intensidad de lluvia hacia el mes de febrero de 2020, finalmente los valores de intensidad para la temporalidad en estudio disminuyen significativamente en el mes de abril de 2021 (UNGRD 2020).

Lo expuesto anteriormente, explica el comportamiento de la intensidad de precipitación registrada en la estación agrometeorológica Tibaitatá en el periodo octubre 2020 a abril 2021, donde para el mes de octubre de 2020 se registró el segundo valor más pequeño de precipitación en el monitoreo, mientras que los valores registrados para los meses de febrero a abril de 2021 se registran valores superiores a los medios multianuales, especialmente en el mes de marzo, registrando el valor máximo de la serie histórica. En conclusión, la temporalidad de lluvia del muestreo del mes de octubre se considera como seca, mientras que para los 2 muestreos llevados a cabo en los meses de febrero y marzo se consideran como temporalidad húmeda y por último una condición semiseca para el muestreo realizado en el mes de abril.

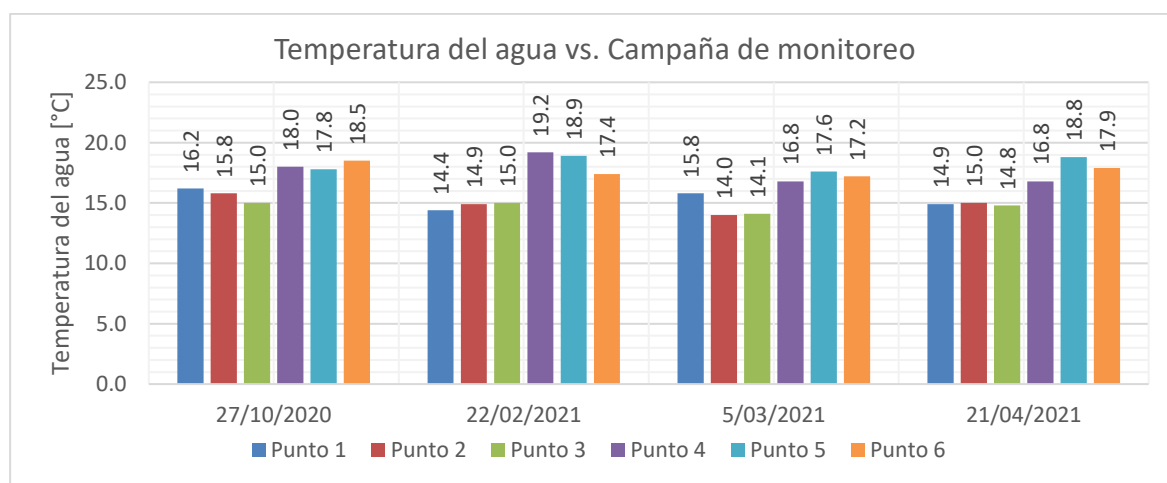
5.2 Caracterización de la calidad de agua

El estudio de la calidad del agua del Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada de la presente investigación, se sustenta a partir de los datos recopilados en las 4 campañas de monitoreo más recientes, realizadas entre octubre de 2020 y abril de 2021 presentados en el Anexo 1.

5.2.1 Parámetros in situ

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros de calidad del agua medidos in situ, evidenciando una baja fluctuación para cada punto entre las diferentes temporadas de toma de muestra, en parámetros como el pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto. A continuación se presenta el comportamiento de la temperatura del agua en cada uno de los puntos de muestreo, evidenciando una variación del orden de 0.2°C en el punto 3, mientras que para los demás puntos la variación de la temperatura del agua es promedio del 1.5°C entre las diferentes temporadas, así mismo se observa que las temperaturas más altas del agua se presentan en los puntos 4, 5 y 6, al estar mayormente expuestas al brillo del sol, dado que los puntos 1, 2 y 3 durante las campañas de muestreo se encontraban completamente cubiertas de buchón de agua.

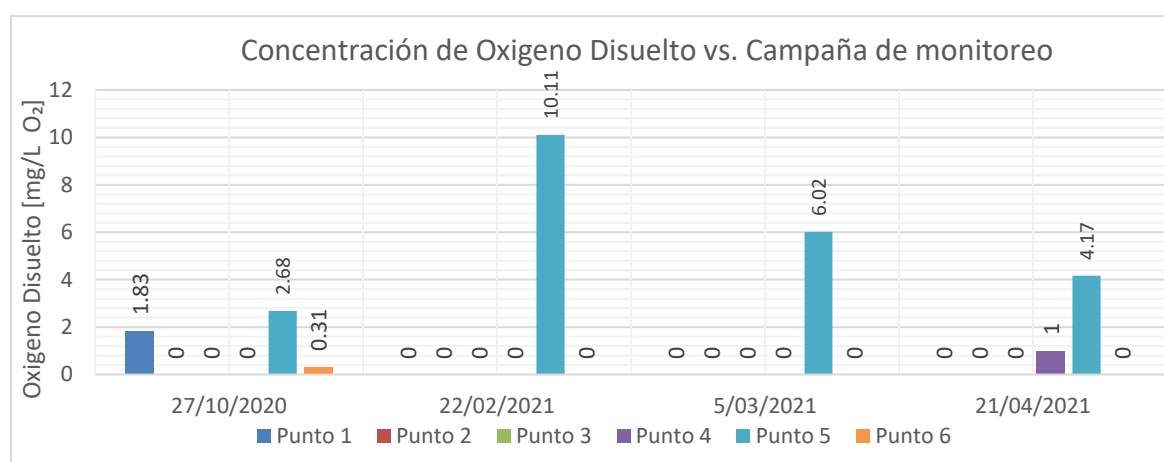
Gráfica 5-2: Monitoreo de temperatura del agua



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la concentración de oxígeno disuelto en el agua, se observa que las condiciones en todos los puntos son anaerobias tal y como se muestra en la Gráfica 5-3, con excepción del punto 5, donde se evidencia concentraciones de oxígeno disuelto hasta de 10.11 mg/L O₂, producto de la oxigenación aportada por la escorrentía superficial sobre la calzada de la calle 13, que descargan sobre el canal adyacente a la carretera y que llegan finalmente al punto de monitoreo.

Gráfica 5-3: Monitoreo de oxígeno disuelto presente en el agua



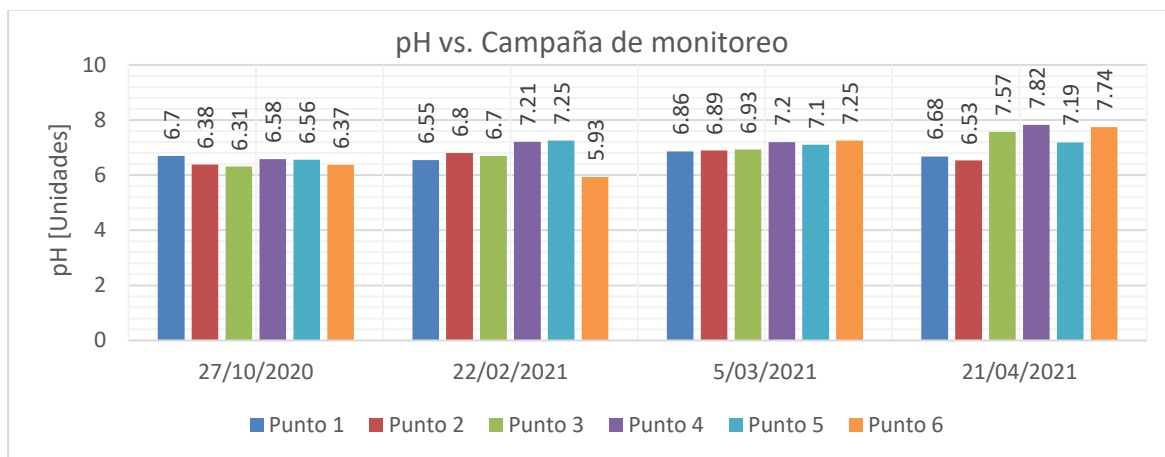
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de pH en el área de estudio, presenta bajas fluctuaciones en cada uno de los puntos, durante las diferentes fechas de monitoreo, especialmente en los puntos 1, 2 y 3, donde la diferencia de pH es inferior a una (1) unidad, como se observa en la Gráfica 5-4, dichos resultados no evidencian una correlación con las temporalidades de lluvia en la zona. En general, al evaluar las condiciones de pH frente a la Resolución 1207 de 2014 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo 2014)¹, se observa que el pH de todos los puntos analizados, se encuentran entre el rango de los valores límite permisibles para el reúso destinado a actividades agrícolas (6 Unid. – 9 Unid.).

¹ La Resolución 1207 de 2014, fue derogada por la Resolución 1256 de 2021, sin embargo, se hace referencia a esta, al ser la única normativa colombiana que expone rango permisible de pH, para reúso de agua residual en actividades de riego.

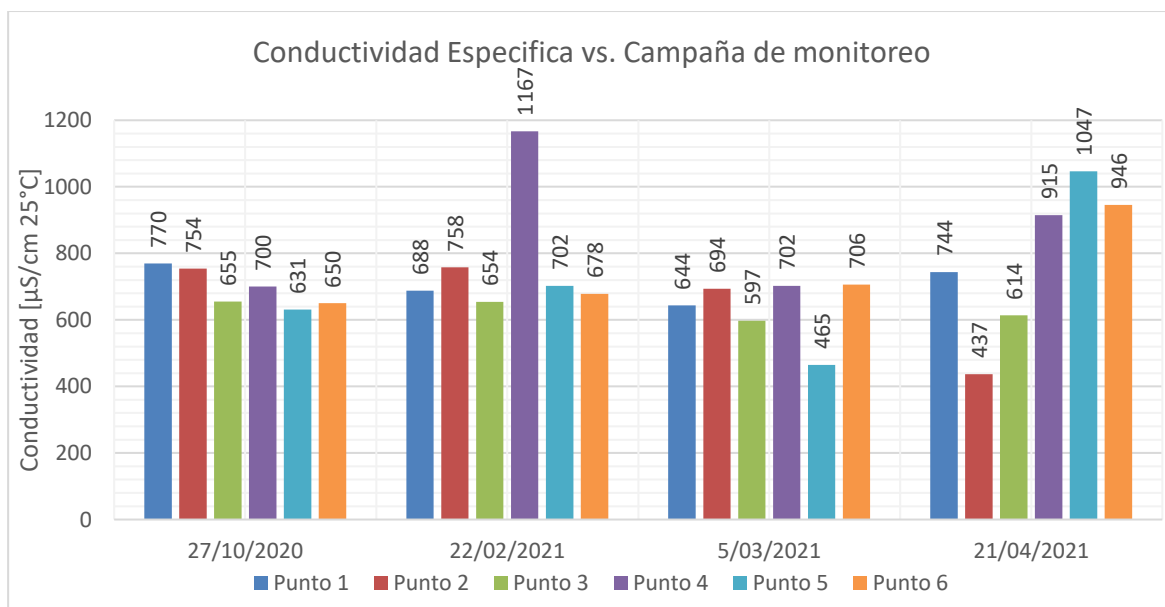
En cuanto a los valores de conductividad registrados en la zona, se observa una amplia variación entre puntos y fechas de muestreo (ver Gráfica 5-5); sin embargo, los valores máximos monitoreados, son inferiores a los dispuestos en la normativa de reúso de agua para actividad agrícola, cuyo valor límite máximo admisible es de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2021).

Gráfica 5-4: Monitoreo de pH del agua



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5-5: Monitoreo de conductividad del agua



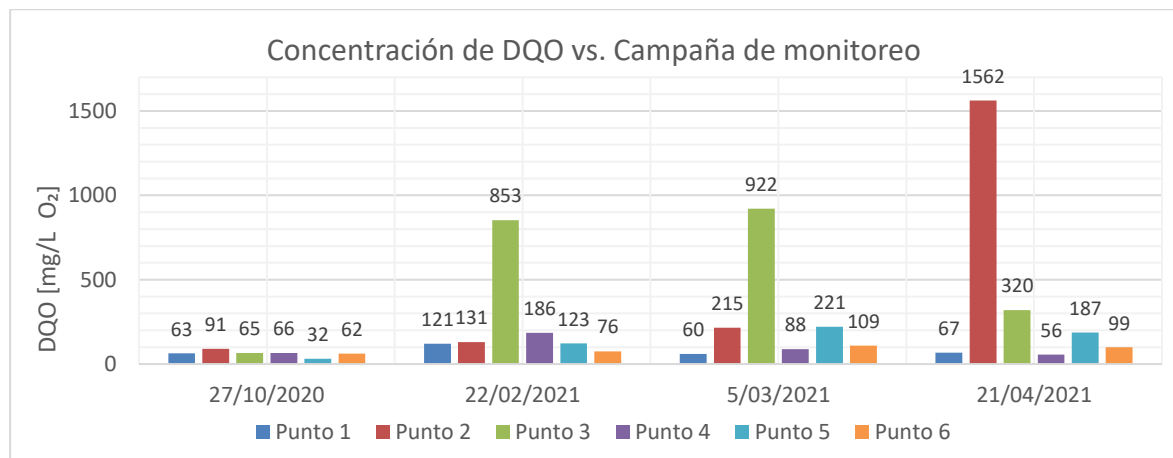
Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Parámetros fisicoquímicos

En cuanto a los resultados de DQO, en la Gráfica 5-7 se observa una fluctuación en los valores de concentración, reflejando en promedio, una mayor concentración en las temporadas de muestreo con máximos valores de precipitación como lo son febrero 2021 y marzo de 2022 (en concordancia con lo descrito en el consecutivo de caracterización hidrológica), mientras que en octubre de 2020, se presentaron valores de baja precipitación con respecto al promedio mensual multianual, provocando también bajos valores de DQO (registrados en el monitoreo).

Para el caso específico de los puntos 1, 2 y 3, que corresponden a un área rural, el terreno se encuentra ligado a las condiciones planas propias de sector, uso del suelo para actividades agrícolas y pastoreo de ganado, lo cual ocasiona que en temporadas de lluvia la escorrentía superficial genere un caudal de lavado, transportando hacia los canales materia orgánica, en su mayoría provenientes de heces de animales, junto con residuos de fertilizantes y pesticidas presentes en el suelo, entre otros materiales que causan un incremento de los valores de DQO en el agua. Sin embargo, esta tendencia no es igualmente clara en los puntos 4, 5 y 6, debido a que las condiciones predominantes son diferentes, al corresponder a un área semiurbana y tener descargas puntuales de aguas residuales domésticas.

Por otra parte, en el muestreo realizado en el mes de abril de 2021 (temporada semiseca), se observa un alto valor de DQO en el punto 2, correspondiendo a un valor atípico de acuerdo con la tendencia antes analizada, lo cual podría obedecer a una descarga puntual o un episodio antrópico sobre la zona, en fechas previas a la toma de la muestra.

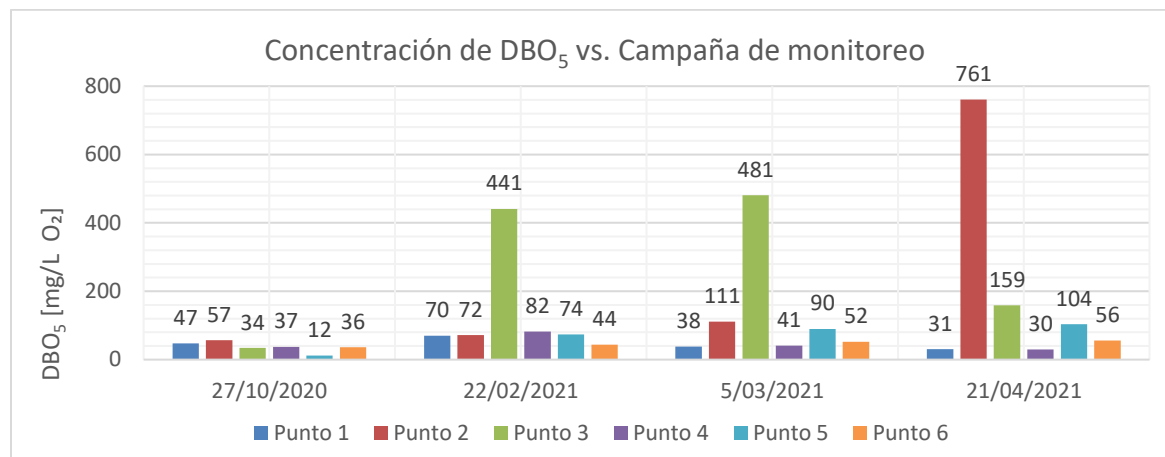
Gráfica 5-6: Monitoreo de DQO

Fuente: Elaboración propia

Al igual que la DQO, los valores de DBO_5 , mantienen una tendencia de comportamiento dependiente de la época de lluvia, donde los puntos de muestreo ubicados sobre el área rural del distrito de riego, presentan valores superiores en escenarios con mayor precipitación, cuyos valores muestran una significativa variación, especialmente en el punto de muestreo 3, cambiando drásticamente entre las fechas de muestreo, obedeciendo al caudal de lavado generado por la escorrentía superficial en los campos aledaños.

Evaluando los resultados de la DBO_5 , y teniendo en cuenta que la normativa colombiana para el reúso de agua no considera límites máximos permisibles, la presente investigación contrasta los resultados en mención frente a los señalados por la *Guidelines for Water Reuse – 2012*, publicados por *Environmental Protection Agency (EPA)* (US Environmental Protection Agency 2012), concluyendo que la calidad del agua se encuentra por encima de dichos límites ($<10 \text{ mg/L}$). Por lo tanto, para la reutilización de agua con fines agrícolas, sería indispensable el tratamiento de la fracción de agua utilizada para el riego de productos de consumo crudo y directo por parte del ser humano, tales como frutas sin cascara y hortalizas de tallo corto.

Gráfica 5-7: Monitoreo de DBO₅



Fuente: Elaboración propia

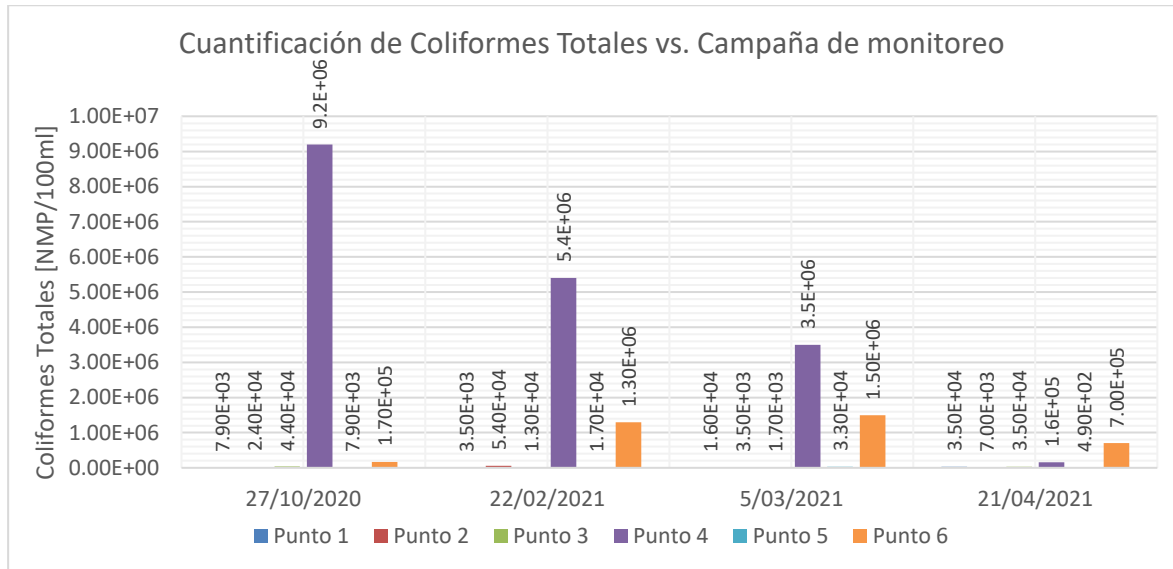
Basado en los resultados obtenidos de DBO₅ y DQO de las muestras recolectadas en la zona de estudio, se establece una relación promedio entre estas del 52.4%, con desviación estándar de 0.07, siendo un valor referente de homogeneidad entre los datos y de confiabilidad del valor medio de la relación calculada.

5.2.3 Parámetros microbiológicos

Otro de los parámetros de calidad del agua medidos en la zona de estudio es el microbiológico, con base en la cuantificación tanto de coliformes totales como de coliformes fecales presentes en el agua, a partir del método del Número más probable en 100 ml de muestra (NMP).

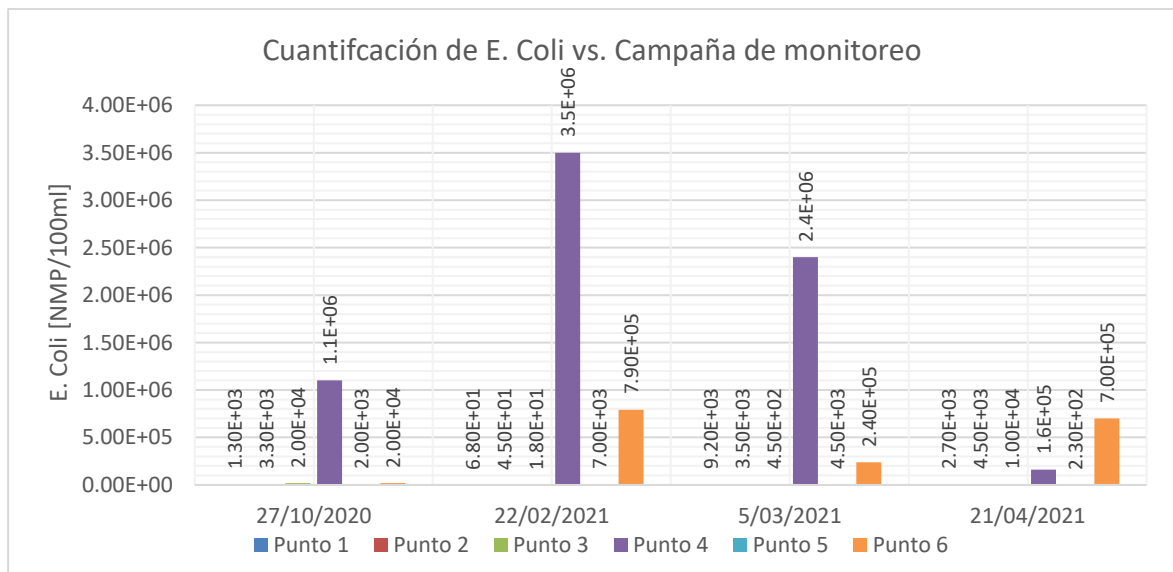
Para el caso específico de la cuantificación de coliformes totales, en la Gráfica 5-8 se observa que la mayor concentración se presenta en el punto 4, seguido del punto 6. Dicho comportamiento obedece al uso residencial del suelo, en el caso del punto 4, este concentra varios colegios de tipo campestre, encontrando concentraciones hasta de 9.20×10^6 NMP/100 ml.

El límite máximo admisible de coliformes totales para el reúso, expuesto en el Decreto 1076 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo 2015), es superado en todos los puntos, siendo necesario un tratamiento de desinfección para su reúso en actividades de riego.

Gráfica 5-8: Cuantificación de coliformes totales

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la cuantificación de coliformes fecales se realizó a partir del análisis de *E. coli* y, al igual que los coliformes totales, se detectó mayor concentración en los sectores urbanos, como lo son los barrios Villa Cety y Lucero, cuyos resultados se presentan en la Gráfica 5-9, donde se evidencia concentraciones hasta de 3.5×10^6 .

Gráfica 5-9: Cuantificación de *E. coli*

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las concentraciones detectadas en la zona de estudio y, teniendo en consideración la normativa de reúso vigente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo 2015), resulta indispensable la implementación de un sistema de desinfección en caso de utilizar el agua para aplicación en actividades agrícolas.

5.3 Sistema de tratamiento

5.3.1 Estabilización de la planta piloto

Para el arranque del filtro anaerobio se efectuó la inoculación del estrato filtrante del sistema, mediante la introducción y recirculación de lodo activado procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Funza (EMAAF 2015), aclimatado a condiciones anaerobias previo a la inoculación. La siembra se realizó con 30% de lodo activado y 70% de agua residual de la PTAR (en volumen), recirculando el efluente durante un periodo de 2 semanas, con un caudal de 20 L/d, tiempo en el que se evidenció la acumulación de partículas de lodo, principalmente, sobre las esferas del medio de relleno, considerándose esto como una fase inicial en la formación de la biopelícula (Figura 5-1). A partir de allí, se inició la operación del filtro anaerobio con agua residual sintética dando inicio formal a la operación y seguimiento del reactor (día 1).

Una vez estabilizado el sistema (día 177), se identificaron cambios tanto en la forma como en el color del granulo de la biomasa, dado que en la fase de arranque la biomasa adherida conservaba aun la apariencia del lodo activado inicial, tonalidad oscura y formación granular, mientras que en la fase estable, la biomasa tuvo una transición de color, formando una biomasa uniformemente distribuida sobre todos los elementos del medio filtrante, forma esbelta y mayor densidad, siendo una característica cercana a la composición de la biopelícula en forma de biomasa dispersa, retenida de manera intersticial y por adhesión a la superficie del lecho filtrante, como se observa en la Figura 5-2.

Figura 5-1: Formación de la biopelícula – Fase inicial

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-2: Formación de la biopelícula – Fase estable

Fuente: Elaboración propia

Una vez formada la biopelícula inicial, a los 18 días del arranque, se incrementaron las concentraciones de afluente, hasta lograr una estabilidad del sistema frente a la eficiencia de remoción de carga orgánica, lo cual se evidenció aproximadamente el día 107. Otra de las variables importantes en la evolución del sistema fue la temperatura, la cual se mantuvo de manera natural dentro de un rango de 17.6°C a 23.9°C, con promedio de 20.7°C, teniendo como principal característica un incremento de temperatura del efluente respecto

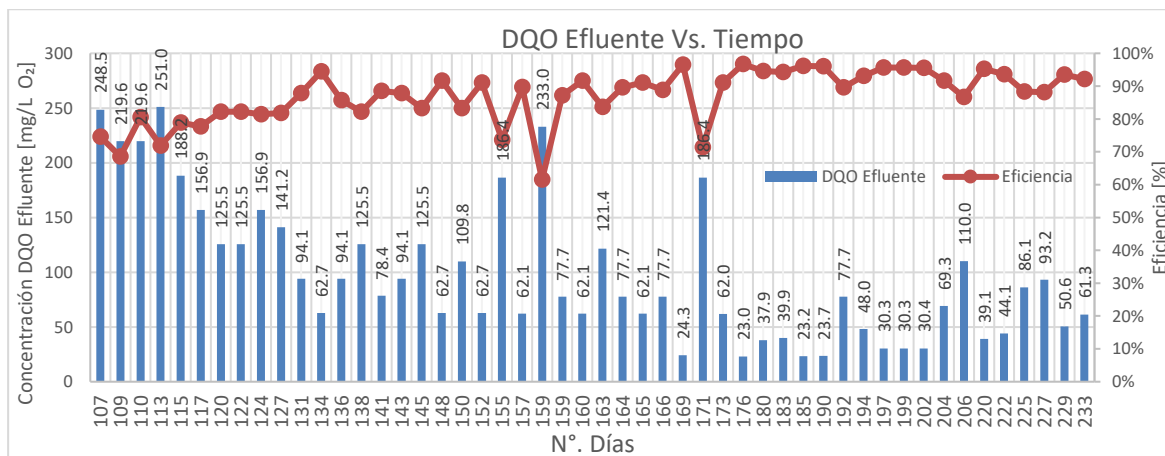
a la del afluente, lo cual obedece al acondicionamiento externo del sistema, como es el caso de la preservación de temperatura, mediante el recubriendo con plástico negro y rojo, colores que realizan la absorción de calor hacia las paredes de la columna. Adicionalmente, el recubrimiento de la estructura con plástico, mantuvo la oscuridad total al interior del sistema, favoreciendo el crecimiento de la comunidad bacteriana y evitando el desarrollo de algas.

5.3.2 Evaluación de remoción de materia orgánica

La concentración de materia orgánica presente en el afluente, para el caso en estudio se manejó en condiciones controladas, mediante el uso de agua residual sintética en concentraciones semejantes al valor medio detectado en las muestras tomadas en la zona, iniciando con una concentración promedio de 170 mg/l DQO, en el arranque del sistema hasta alcanzar concentraciones del orden de 700 mg/L DQO.

En la Gráfica 5-10 se presenta la evolución del sistema en términos de remoción de carga orgánica a lo largo la fase estable, comprendida entre los días 107 y 233, donde se observa que el efluente inicia su tendencia de estabilización en la reducción de DQO soluble a partir de valores de 248.5 mg/l DQO (74.6% de eficiencia), hasta obtener efluentes del orden de 23 mg/L, equivalente al 96.7% de eficiencia del sistema, superando los valores mínimos establecidos en el *Artículo 184* de la *Resolución 0330 de 2017* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo 2017) y, en la literatura (Von Sperling 2012), donde se exponen eficiencias esperadas entre el 70% y 80%.

Adicionalmente, la gráfica muestra la desestabilización en la eficiencia del sistema en varios momentos del proceso, debido a condiciones propias de operación, demostrando la capacidad del proceso anaerobio para su reestabilización, aclimatándose a nuevas condiciones de carga, siendo esto propicio para las condiciones de calidad del agua de la zona en estudio, ante la evidente fluctuación en los niveles de concentración de DQO característicos del agua residual en los canales de riego de la zona.

Gráfica 5-10: Monitoreo de DQO Efluente

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, teniendo en cuenta que la normativa vigente de reúso de agua residual para Colombia no establece valores máximos admisibles en cuanto a la calidad del agua en términos de DBO₅ y DQO, se ha recurrido a información contenida en guías de otros países para el reúso de agua, entre otras: *Guidelines for Water Reuse – 2012*, publicado por *Environmental Protection Agency (EPA)*, al ser esta una de las entidades referentes para la implementación de normativas ambientales alrededor del mundo. Para el caso específico del reúso de agua para fines agrícolas, dichas guías presentan, en la Tabla 4-4 “*Suggested guidelines for water reuse*”, las concentraciones máximas admisibles en términos de DBO₅, tal y como se observa su traducción en la Tabla 5-1. Estas normas, por supuesto, son bastante restrictivas y exigentes para cualquier tecnología que se aplique.

De acuerdo con lo estipulado en *Guidelines for Water Reuse – 2012*, se ha contrastado y analizado la información de los resultados de la experimentación en el reactor, medidos en términos de DQO soluble (superiores a 20 mg/L DQO); relación entre DBO₅ y DQO del agua residual en la zona en estudio, cuyo valor medio es del 52.4%, lo cual deduce a partir de esta relación, valores de DBO en los resultados de operación, superiores a 12 mg/L. Para este caso, es posible inferir que en aquellos eventos en los que el agua residual afluente contenga niveles de DQO cercanos o mayores a 700 mg/L DQO, y se tengan cultivos de frutas y hortalizas de consumo directo, se requeriría complementar el filtro anaerobio con una etapa de tratamiento posterior (pulimiento) que permita cumplir el valor máximo admisible de DBO (<10 mg/L), mientras que para cultivos que no impliquen consumo directo por parte del ser humano, el tratamiento resultaría muy eficaz (<30 mg/L).

- 74 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Tabla 5-1: DBO₅ admisible para el reúso de agua residual en uso agrícola

Reúso agrícola	Tratamiento	Valor máximo admisible
<u>Cultivos alimenticios</u> Agua tratada para el riego superficial o por aspersión de cultivos de alimentos para consumo humano, consumidos directamente crudos.	Secundario Filtración Desinfección	$\leq 10 \text{ mg/L O}_2$
<u>Cultivos alimenticios procesados</u> Agua tratada para el riego superficial de cultivos alimenticios de consumo humano, procesados comercialmente	Secundario Filtración Desinfección	$\leq 30 \text{ mg/L O}_2$
<u>Cultivos no alimenticios</u> Riego de cosecha que no se consumen por humanos, incluidos forraje, fibra y semillas, o para el riego de pastizales, viveros comerciales y granjas de césped.	Secundario Filtración Desinfección	$\leq 30 \text{ mg/L O}_2$

Fuente: Adaptado de (US Environmental Protection Agency 2012)

5.3.3 Funcionamiento del sistema

El control de operación fue regulado principalmente bajo el constante monitoreo de parámetros como: pH, oxígeno disuelto, temperatura, ácidos grasos volátiles y alcalinidad, supervisando las condiciones del sistema y garantizando que estas fuesen óptimas para el buen desempeño del proceso.

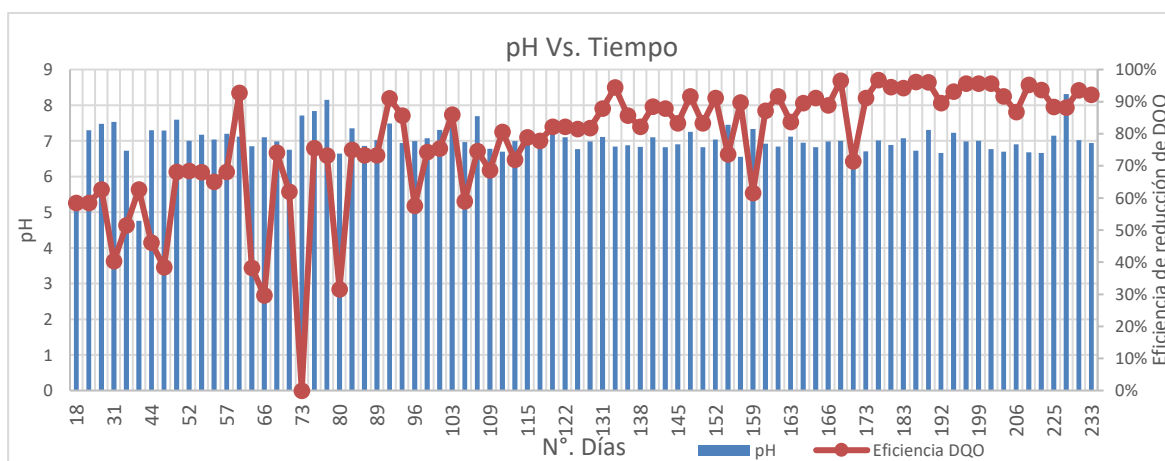
Para el caso específico de las condiciones de pH, en el efluente (ver Gráfica 5-11), se observaron resultados bajos durante la primera etapa de arranque, especialmente hacia el día 37, obedeciendo esto a un proceso de acidificación, normal en el sistema anaerobio, lo cual se neutralizó con bicarbonato de sodio, usado como solución Buffer en la preparación del agua residual sintética, con concentraciones iniciales de 1.5g/L en el afluente, durante los 3 días siguientes. Posteriormente, se continuó la adición de bicarbonato de sodio en concentraciones de 1g/L en el afluente, con el fin de mantener el pH adecuado para el desarrollo de las bacterias metanogénicas, cuyo rango recomendado en la literatura para sistemas anaerobios, se encuentra entre 6.5 a 7.6 (Romero 2008).

En la Gráfica 5-11, se muestra el comportamiento del pH a lo largo del tiempo de experimentación donde, en general, se observa que los niveles de pH se mantuvieron dentro del rango de 6.5 y 7.6, tal y como se recomienda en la literatura. De la misma

manera, se contrasta la eficiencia del sistema en términos de reducción de DQO con el comportamiento del pH en el efluente, donde se observa que el desempeño durante el periodo estable (día 107 – 233), presenta comportamientos de eficiencias crecientes para valores de pH cercanos a 7, mientras que se registra reducción en la eficiencia en las fechas en que los valores de pH se alejan de 7.

En la Gráfica 5-11, se observa una caída de eficiencia en la reducción de DQO, comprendida entre los días 75 y 83, debido a la sustitución del afluente por agua residual del punto 1, las cuales presentaban condiciones de DQO diferentes, con respecto a las encontradas en ese punto durante las 4 campañas de muestreo realizadas previamente.

Gráfica 5-11: Monitoreo de pH Efluente

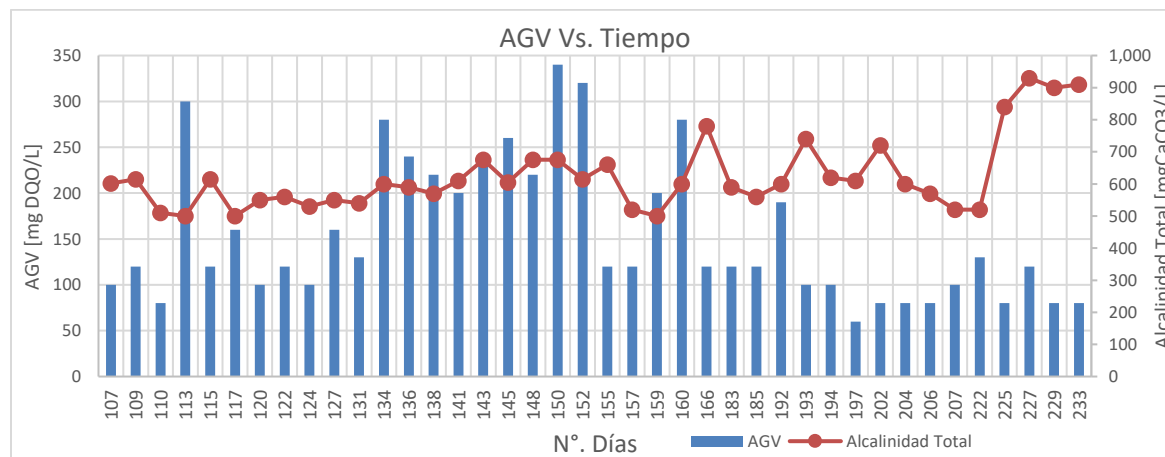


Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, también se realizó el seguimiento del sistema a partir del comportamiento de los ácidos grasos volátiles y su relación con la alcalinidad durante la fase estable, representado en la Gráfica 5-12, donde se observa que el filtro anaerobio genera AGV, en su mayoría en valores inferiores a los 250 mg DQO/L, encontrándose dentro del límite recomendado en la literatura (Romero 2008). Adicionalmente, se observa una tendencia creciente en la alcalinidad total del efluente y, al mismo tiempo, una reducción en la concentración de los ácidos grasos volátiles - AGV. Esto podría ser consecuencia de la actividad eficiente de las bacterias metanogénicas y la correspondiente generación de biogás (corroborado con los altos niveles de remoción de materia orgánica contaminante).

- 76 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

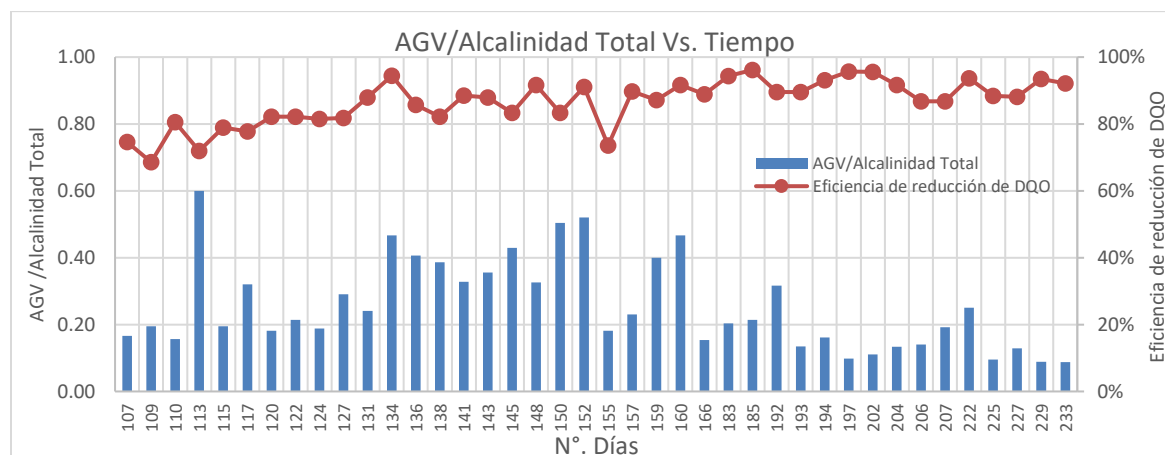
Gráfica 5-12: Monitoreo de ácidos grasos volátiles (AGV)



Fuente: Elaboración propia

De la misma manera, como complemento, en la Gráfica 5-13 se muestra el comportamiento de la relación de los AGV y la alcalinidad total, con valores menores a 0.8 y mayormente inferiores a 0.4, donde 0.8 es el valor limite admisible y 0.4 como el valor preferiblemente recomendado por la literatura (Romero 2008), con lo cual se evidencia un óptimo funcionamiento del filtro anaerobio. Adicionalmente, en dicha grafica se puede apreciar que, en promedio, en aquellos escenarios de mayor eficiencia en la remoción de DQO, la relación entre AGV y alcalinidad total presenta valores inferiores a 0.4.

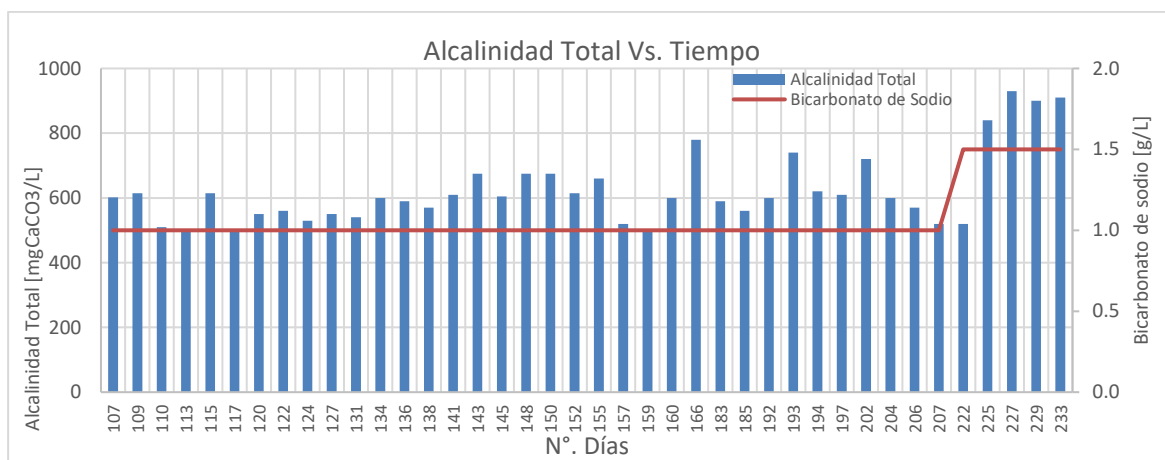
Gráfica 5-13: Relación ácidos grasos volátiles y alcalinidad total



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, el efluente del sistema presenta alcalinidad por bicarbonatos, debido a que el pH se encuentra entre un rango de 4.5 y 8.3, la cual se calcula como alcalinidad total (Romero 2009), cuya condición está ligada a la adición de bicarbonato de sodio en el afluente (ARS) como solución Buffer, con lo cual en la Gráfica 5-14 se contrasta la influencia del bicarbonato de sodio a lo largo de la fase estable del sistema, especialmente durante los últimos 11 días del ensayo, dado que se incrementó la concentración de bicarbonato de sodio a 1.5g/L en el afluente, por condiciones límite de pH en el efluente, lo cual evidencia una influencia directa en los valores de alcalinidad total, llevándolos a valores cercanos a 1000 mg CaCO₃/L, siendo el valor ideal de acuerdo con la literatura (Romero 2008), lo cual es un indicador de mejoramiento en el funcionamiento del sistema.

Gráfica 5-14: Monitoreo alcalinidad total



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al seguimiento de los niveles de oxígeno disuelto en el agua, el sistema se mantuvo bajo condiciones anaerobias o anóxicas desde la formación de la biopelícula dentro del estrato filtrante.

5.3.4 Evaluación de remoción de huevos de parásitos de Helmintos

Una vez estabilizado el sistema de tratamiento, se realizó la prueba para la evaluación de remoción de huevos de parásitos, adaptada para las condiciones propias del filtro anaerobio de flujo descendente, y flujo en pistón. El ensayo se realizó en 3 réplicas, tal y como se observa en la Tabla 5-2, cuya hora de arranque se desarrolla en el tiempo 0 (cero), momento en el que se inició la primera entrada del afluente (ARS) fortificado con los huevos

de parásitos, teniendo un periodo de recolección del efluente de la primera réplica, entre la hora 23 y 30.6, esto en función del tiempo de retención hidráulico del sistema al momento de la prueba, para tratar un caudal promedio de 15.68 L/d. De la misma manera, se realizó de forma continua la entrada de las 2 réplicas restantes, en intervalos de tiempo de 7 horas y 40 minutos cada una, que corresponde a la tercera parte del tiempo de retención hidráulica del sistema, dicho esto, el tiempo final de la prueba fue la hora 46, al momento de culminar la recolección de la tercera réplica.

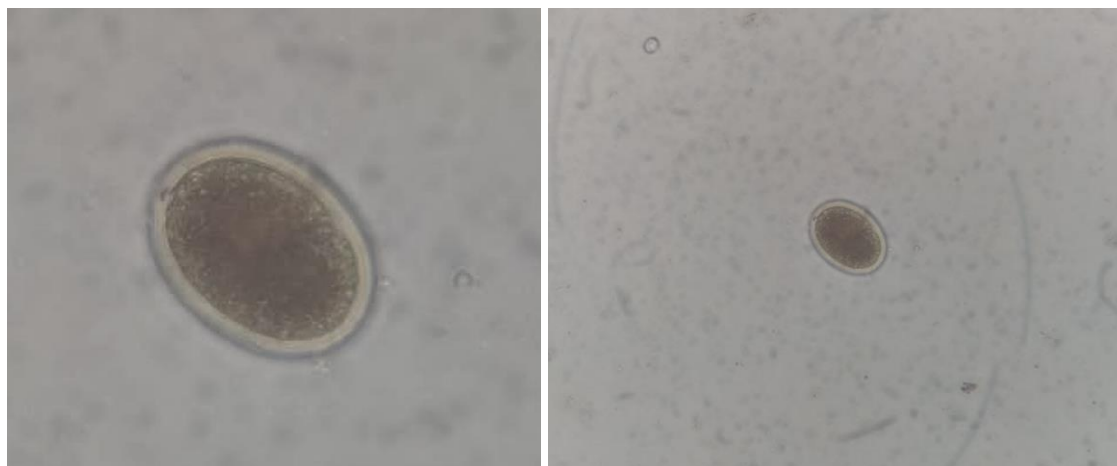
Tabla 5-2: Ensayo de remoción de huevos de *A. suum*

Réplica	Hora entrada [horas]	Concentración afluente [h/5L]	Tiempo de recolección [horas]	Nº Huevos	Concentración efluente [h/5L]
1	0	500	23 – 30.6	0	0
2	7.6	500	30.6 – 38.6	0	0
3	15.3	500	38.3 - 46	1	1.66

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-2 se presentan los datos obtenidos en la prueba piloto realizada, resaltando en función del número de réplica: tiempo de ingreso del ARS inoculada con los huevos, mediante un flujo de tipo continuo en el reactor; tiempos de recolección del efluente, colectado el volumen inyectado en cada una las réplicas en función del tiempo de retención hidráulica; número de huevos detectados en cada réplica, aplicando la prueba de extracción del Método de Bailenger Modificado (R. M. Ayres y Mara 1997).

Figura 5-3: Detección de huevos de parásito *Helmintos - Ascaris suum*



Fuente: (Ospina 2022)

Los resultados del sistema de tratamiento en cuanto a la remoción de huevos de Helmintos, muestran, en el efluente, una remoción de huevos de *Helmintos* del 100% en las dos primeras réplicas y del 99.8% en la tercera réplica.

Posterior al ensayo piloto, se realizaron 7 análisis de detección de huevos en el efluente con intervalos diarios a modo de seguimiento, buscando detectar la aparición de otros huevos en periodos diferentes al tiempo de retención hidráulica.

El comportamiento del sistema en la remoción de los huevos de helmintos, indica que el filtro anaerobio presentó mejores resultados con respecto a otros estudios reportados en la literatura, tabla 4.19 del libro “*Wastewater characteristics, treatment and disposal*” (Von Sperling 2007), que muestran la presencia de huevos de Helmintos en concentraciones superiores a 1 h/L (>1) en efluentes de sistemas compuestos por un tanque séptico y un filtro anaerobio.

Los resultados experimentales del tratamiento y su alta eficiencia, podrían obedecer a la operación y conformación del sistema, al material del medio de soporte utilizado, además de la característica altamente adherente de la membrana de los huevos al plástico, posibilitando su adherencia al medio de soporte y su retención en la biopelícula formada por bacterias anaerobias en el estrato filtrante.

En cuanto al funcionamiento del sistema en términos de remoción de huevos de Helmintos, frente a la normativa colombiana que hace mención del límite máximo permisible de este para parámetro, para el reúso de agua residual, *Resolución 1207 de 2014* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo 2014)², se observa que el tratamiento funciona acorde con el valor máximo permisible expuesto en la normativa (1 h/L), dado que en la prueba piloto se obtuvo concentraciones inferiores a esta, demostrando la aplicación del filtro anaerobio para remoción de parásitos de Helmintos de la especie *Ascaris suum*.

² La Resolución 1207 de 2014, fue derogada por la Resolución 1256 de 2021, sin embargo, se hace referencia a esta, al ser la única normativa colombiana que expone un límite máximo permisible de huevos de Helmintos, para reúso de agua residual en actividades de riego.

5.3.5 Evaluación de remoción de bacterias

También en la última fase de operación del filtro anaerobio, se evaluó el comportamiento del sistema ante la presencia de bacterias en el afluente, para lo cual se fortificó 100 ml de agua residual sintética con cepas de tres tipos de bacterias certificadas como lo son: *E. coli* (ATCC 25922), *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028) y *Klebsiella aerogenes* (ATCC 13048), ajustando la concentración del afluente a través de la absorbancia de la muestra y usando la escala de McFarland. Las concentraciones utilizadas tanto de coliformes totales como de *E. coli*, corresponden a los máximos valores registrados a lo largo de las campañas de toma de muestra realizadas en los estudios de campo. Dicho ensayo se realizó en dos réplicas, analizando la concentración de coliformes totales y *E. coli* presentes en el efluente, basado en el método de número más probable (NPM).

A continuación, se presentan las concentraciones utilizadas en el afluente, acompañadas de las concentraciones resultantes luego del tratamiento con el filtro anaerobio.

Tabla 5-3: Ensayo de remoción de bacterias aerobias

Réplica	Bacteria	Concentración afluente [NMP/100ml]	Concentración efluente [NMP/100ml]
1	Coliformes totales	1.16×10^7	1.6×10^7
	<i>E. coli</i>	3.75×10^6	2.5×10^5
2	Coliformes totales	9.75×10^6	9.2×10^7
	<i>E. coli</i>	3.75×10^6	3.30×10^6

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados reportados en la Tabla 5-3, se observa una baja o nula eficiencia en remoción de organismos coliformes. En el caso de la *E. coli*, tanto en la primera como en la segunda réplica los resultados de concentración en el efluente no varían significativamente respecto a la concentración inicial. Igualmente resulta claro que el sistema no presentó una remoción en la concentración de coliformes totales. Por el contrario, parecería que se generó una multiplicación de la comunidad bacteriana dentro del sistema, que para el caso en estudio corresponde a la concentración de las bacterias de las especies *Salmonella typhimurium* y *Klebsiella aerogenes*.

Los resultados de la experimentación con coliformes totales y *E. coli*, presentados anteriormente, mantienen coherencia con los valores expuestos en la literatura por autores como Von Sperling (Von Sperling 2007), quien expone en la tabla 4.19 del libro “*Wastewater characteristics, treatment and disposal*”, la presencia de *E. coli* en efluentes en ordenes de magnitud entre los 1×10^6 y 1×10^7 NMP/100ml, para sistemas compuestos por un tanque séptico y un filtro anaerobio. En función de los resultados experimentales, se evidencia que el sistema de tratamiento trabajado en la presente investigación, no garantiza una remoción significativa de bacterias coliformes presentes en el agua residual y como la mayoría de los sistemas utilizados para el tratamiento de las aguas residuales domésticas requeriría de un proceso complementario de desinfección para cumplir con el propósito de reúso.

De acuerdo con la normativa vigente colombiana para el reúso de agua residual, *Resolución 1256 de 2021* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2021), donde se avalan los límites máximos permisibles de calidad del agua para uso agrícola establecidos en el *Artículo 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo 2015), los resultados experimentales de coliformes totales y coliformes fecales (*E. coli*) en el efluente, sobrepasan los valores límites establecidos en el Párrafo 1 del artículo en mención, dado que se estipulan concentraciones menores a 5000 NMP/100ml de coliformes totales e inferiores a 1000 NMP/100ml de coliformes fecales, para frutas y hortalizas de consumo directo (carentes de cascara en el caso de las frutas, y de tallo corto en el caso de las hortalizas), dicha propiedad es característica en la mayoría de los cultivos cosechados sobre el área de estudio.

En consecuencia, se requeriría complementar el sistema con una etapa posterior de desinfección, capaz de eliminar las bacterias presentes en el efluente aplicando, por ejemplo, tecnologías de desinfección con Ozono, cloro, LUV, filtros lentos en arena, lagunas de maduración o algún otro compuesto químico.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- En la presente investigación se realizó la caracterización de la zona de estudio, especialmente en el ámbito hidrológico y de calidad del agua, reflejando un incremento principalmente en los niveles de concentración de parámetros como DBO₅ y DQO, en función del aumento en los valores de precipitación. Esto, debido a la escorrentía superficial que arrastra consigo la materia dispuesta sobre el suelo, como: heces de animales, abonos, fertilizantes y plaguicidas, en su flujo hacia los canales del distrito de riego.
- La selección del sistema de tratamiento evaluado, se realizó aplicando una matriz multicriterio, considerando factores como: condiciones propias de la zona, eficiencia teórica, funcionalidad, aplicabilidad y requerimientos del sistema. El resultado obtenido en este análisis, indica viabilidad en el tratamiento de las aguas residuales circundantes en el sector, mediante la tecnología de filtro anaerobio de flujo descendente, siendo este el sistema de mayor adaptabilidad a las condiciones económicas, ambientales, energéticas y constructivas que se tienen en el área de estudio, con eficiencias teóricas para la remoción en la concentración de DQO que van del 70 al 80%, y del 99% en la remoción de huevos de parásitos.
- De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en la planta piloto, relacionados con la evaluación de remoción de parámetros de calidad de agua como DQO y huevos de parásitos, en concentraciones características a las encontradas en la zona de proyecto, se observa una buena correlación de los mismos frente a los valores que se registran en la literatura, evidenciando eficiencias de operación en remoción de la concentración de DQO hasta del 96.7%, y del 99.8% en huevos de parásitos, siendo estas superiores a lo expuesto en la literatura, mientras que la reducción de la concentración de bacterias coliformes resulta baja, lo cual corrobora la

baja efectividad que brindan los sistemas anaerobios para la eliminación de bacterias. No obstante, la aplicación de la tecnología de filtro anaerobio de flujo descendente, para la zona del proyecto, con fines de reúso en actividades agrícolas es factible, siempre y cuando se complemente con un proceso de desinfección, de la misma manera que se requeriría con cualquier otra tecnología de tipo convencional (aerobia).

- Con base en los resultados de la experimentación y, considerando los subsectores del *Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada*, es posible concluir que el filtro anaerobio de flujo descendente podría aplicarse a escala real, especialmente para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, provenientes principalmente de las zonas urbanas aledañas, cuya red de drenaje presentan conexiones erradas que desembocan en los canales del distrito de riego. De esta manera, el tratamiento previo reduciría la concentración de los parámetros contaminantes presentes en los vertimientos líquidos que están siendo dispuestos actualmente en estos cuerpos de agua.

6.2 Recomendaciones

- De acuerdo con los resultados del monitoreo de calidad del agua realizados en el área de estudio, se recomienda que antes de utilizar el agua para actividades de irrigación, especialmente de aquellos cultivos de tallo corto y consumo directo, se aplique un tratamiento previo. Esto, con el fin de reducir la concentración de contaminantes presentes en el agua y prevenir la existencia de microorganismos en las frutas y hortalizas cosechadas.
- En el caso específico de escalar, a escala real, la tecnología de la planta piloto evaluada en la presente investigación, se sugiere incorporar un sistema de homogenización como fase previa al tratamiento biológico, debido a la fluctuación en la concentración de carga orgánica y otros contaminantes presentes en los canales de irrigación del *Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada*, acompañado de una fase posterior de desinfección, para tal efecto, podrían ensayarse alternativas como ozonización, LUV, filtros lentos en arena, lagunas de maduración o alguna otra alternativa (física o química) que pueda resultar apropiada para la reducción de organismos coliformes.

- En el escenario de llegarse a construir, a escala real, la tecnología evaluada en la presente investigación, o desarrollar futuras investigaciones a fines con el tema, se recomienda en el seguimiento de operación, realizar la medición de parámetros adicionales, tales como: DQO soluble y particulada del agua real de la zona en estudio, con sus respectivas constantes de reacción y balances de masa; generación de lodos dentro del reactor, y correlación frente a los sólidos presentes en el afluente; concentración de fósforo y nitrógeno en el efluente, y funcionalidad en actividades de irrigación. Adicionalmente, se recomienda evaluar el impacto de la tecnología ante la presencia de metales pesados, y su interacción con la actividad microbiana dentro del reactor.
- En aquellos eventos en que se presentan fallas en el funcionamiento y la estabilidad del sistema de tratamiento, referido en el presente documento, se recomienda proceder a la recirculación del efluente por periodos cortos de tiempo, en termino de días, lo cual permite estabilizar el sistema nuevamente, dada la relación de alimento / microorganismos y el festín de hambruna generado en la población bacteriana dentro del sistema.
- Teniendo en cuenta que se ha detectado la presencia de contaminantes emergentes en las aguas del Sistema hidráulico de manejo ambiental y control de inundación de La Ramada en investigaciones previas, se sugiere probar esta tecnología para evaluar la remoción de algunas de esas sustancias, dada la preocupación que existe a nivel mundial por los efectos que puedan tener, a largo plazo, en la salud de las personas.
- De acuerdo con las visitas a la zona de estudio, se observa la presencia de vegetación en toda la superficie de los canales de riego del *Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundación de La Ramada*, principalmente con *Eichhornia crassipes* o también llamado Buchón de agua. Por ello, se recomienda cosechar y utilizar esa vegetación en actividades de compostaje, como parte de las labores de operación y mantenimiento de esos cuerpos de agua.

7. Bibliografía

- Abwasserverband-Braunschweig. «Abwasserverband Braunschweig» The Braunschweig Model». <https://www.abwasserverband-bs.de/en/what-we-do/the-braunschweig-model/> (28 de abril de 2022).
- Ayres, Rachel M., y David Duncan Mara. 1997. *Análisis de aguas residuales para su uso en agricultura : manual de técnicas parasitológicas y bacteriológicas de laboratorio / Rachel M. Ayres & D. Duncan Mara*. Leeds, Inglaterra: Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/41996> (27 de junio de 2022).
- Ayres, Rachel, y Duncan Mara. 1996. Manual de técnicas parasitológicas y bacteriológicas de laboratorio *Análisis de aguas residuales para su uso en agricultura*. Organizaci. Leeds, Inglaterra.
- Baird, Rodger B., Andrew D. Eaton, y Eugene W. Rice. 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington D.C. <https://www.standardmethods.org/> (20 de enero de 2020).
- Cámara de comercio de Bogotá. 2015. *Caracterización económica y empresarial de diecinueve municipios de Cundinamarca*. ed. Cámara de comercio de Bogotá. <http://hdl.handle.net/11520/14584>.
- Chandillo, Libia Eunise, y Geraldine Sánchez. 2020. «Detección de huevos de helmintos en aguas empleadas para riego de cultivos, en el municipio de Mosquera (Cundinamarca)».
- Chernicharo, Carlos Augusto de Lemos. 2007. *4 Biological wastewater treatment series*. 1.^a ed. Londres: IWA Publishing.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. 2014. «Acuerdo 037 de 2014». *Acuerdos CAR - 2014: 1-19*. <http://web2.car.gov.co/index.php?idcategoria=52266> (12 de mayo de 2021).

- . 2018. *Sistemas Hidráulicos de Manejo Ambiental y de Control de Inundaciones*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5df9ba79f112f.pdf> (21 de mayo de 2021).
- . 2019. «Anexo 4. Plano de las redes del sistema y del área de influencia». *Acuerdos CAR - 2014*: 1. <http://web2.car.gov.co/index.php?idcategoria=52270> (12 de mayo de 2021).
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. «La horticultura en Colombia». <http://hdl.handle.net/20.500.12324/20660> (13 de mayo de 2021).
- Cubides, Pablo Andrés. 2018. «Evaluación de un tratamiento para mejorar la calidad del agua utilizada para riego en la Sabana occidental de Cundinamarca». Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68821> (15 de mayo de 2021).
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. 2002. *Censo hortícola de la Sabana de Bogotá*. ed. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá D.C.
- Díaz-Báez, María Consuelo, Sandra Eliana Espitia, y Francisco Molina. 2002. *Digestión Anaerobia*. 1.^a ed. Universidad Nacional de Colombia.
- EMAAF. 2015. «Planta de Tratamiento de Aguas Residuales - EMAAF ESP Empresa Municipal de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Funza». <https://www.emaafesp.gov.co/noticias/285-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales.html> (28 de junio de 2022).
- Escalante, Hermes et al. 2005. «Antígenos de larvas pulmonares de *Ascaris suum* reconocidos por anticuerpos producidos en *Oryctolagus cuniculus*». : 132-37.
- Esri. 2022. «Mapa de localización de puntos de monitoreo».
- IDEAM. 2022. «Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos». <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/> (14 de agosto de 2022).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. «La Sabana Bogotá se está quedando sin terrenos para cultivar». GOV.CO. <https://igac.gov.co/es/noticias/la-sabana->

- bogota-se-esta-quedando-sin-terrenos-para-cultivar-igac (13 de mayo de 2021).
- Jenkins, David, y Jiri Wanner, eds. 2014. *Activated Sludge - 100 Years and Counting*. 1.^a ed. Londres: IWA Publishing.
- Van Lier, Jules B. 2008. «Anaerobic Wastewater Treatment». En *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*, Londres: IWA Publishing, 401-42.
- Martínez, María del Pilar. 2019. «Evaluación de la remoción de azitromicina disuelta en agua residual sintética en un reactor UASB a escala de laboratorio». Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77141> (15 de mayo de 2021).
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. 2002. «Instrumentos de gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales». En *Guía de gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales*, Bogotá D.C: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 37-54. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18911> (1 de mayo de 2022).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo. 2014. «Resolución 1207 de 2014.pdf». *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS*. <https://acuameunier.com/resolucion-1207-de-2014-reuso-2/>.
- . 2015. «Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible». *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS*.
- . 2017. «Resolución 0330 de 2017.Pdf». *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS*: 77. <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330-2017.pdf>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2021. «Resolución 1256 de 2021». *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS*: 1-6. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>.
- Morales G, Juan L., Francisca Arpon G, y Claudio Bravo C. 2015. «Obstrucción

- intestinal por *Ascaris Lumbricoides*». *Revista Chilena de Cirugia* 61(1): 13-14.
- Ortegón V, María Fernanda. 2016. «Determinación de ácidos grasos volátiles para digestores anaerobios por titulación». <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2471>.
- Ospina, Daniel Eduardo. 2022. «Identificación y prevalencia de parásitos de interés en salud pública, en aguas de riesgo y hortalizas de la sábana occidental de Cundinamarca».
- Reutivar. 2020a. «Documentación de Proyecto - REUTIVAR». <https://reutivar.eu/documentacion-de-proyecto/> (16 de abril de 2022).
- . 2020b. «Modelo de riego sostenible del olivar mediante el uso de aguas regeneradas». https://reutivar.eu/wp-content/uploads/2021/05/Reutivar_Resumen-Ejecutivo_v4.pdf (16 de abril de 2022).
- Romero, Jairo Alberto. 2008. *Tratamiento de aguas residuales*. 3.^a ed. Escuela Colombiana de Ingenieros.
- . 2009. *Calidad del agua*. 3.^a ed. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingenieros.
- Sánchez, Carlos Alexis. 2020. «Evaluación de la toxicidad en sedimentos de los canales del Distrito de Riego de La Ramada mediante la utilización de dos bioensayos». Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78837> (15 de mayo de 2021).
- Secretaría Distrital de Planeación. 2015. «Región Metropolitana de Bogotá: Una visión de la ocupación del suelo». *Integración Regional* 11: 1-442. <http://www.sdp.gov.co/gestion-socioeconomica/integracion-regional-y-nacional/publicaciones/region-metropolitana-de-bogota-vision-de-la-ocupacion-del-suelo> (13 de mayo de 2021).
- Serna, Julieta. 2020. *BOLETÍN DE MONITOREO FENOMENO EL NIÑO Y LA NIÑA - IDEAM*. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/boletin-de-seguimiento-fenomeno-el-nino-y-la->

- nina?p_p_id=110_INSTANCE_I6NwA8DioHgN&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_110_INSTANCE_I6NwA8DioHgN_redirect=http%3A%2F (29 de mayo de 2022).
- Simon, Judd. 2006. *The MBR Book The MBR Book*.
- Von Sperling, Marcos. 2007. *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. 1.^a ed. Londres: IWA Publishing.
- . 2012. *Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales*. 1.^a ed. ed. Ivan Sánchez Ortiz. San Juan de Pasto: Editorial Universidad de Nariño.
- . 2019. *Principios del tratamiento biológico de aguas residuales*. 1.^a ed. ed. Iván Andrés Sánchez Ortiz. San Juan de Pasto: Editorial Universidad de Nariño.
- Suárez, Joaquín, Alfredo Jácome, y Pablo Ures. 2015. *Reactores con funcionamiento secuencial (FT-BIO-002)*.
- UNGRD, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. 2020. *LA PRESENCIA DEL FENÓMENO LA NIÑA (2020-2021) Y SU INFLUENCIA EN EL CLIMA RECIENTE DEL PAÍS*. http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:E5oRGaE_ILoJ:portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Conocimiento/LA-PRESENCIA-DEL-FENOMENO-LA-NINA-2020-2021-Y-SU-INFLUENCIA-EN-EL-CLIMA-RECIENTE-DEL-PAIS.pdf+&cd=13&hl=es&ct=clnk&gl=co&client=firefox (29 de mayo de 2022).
- Universidad Nacional de Colombia, Laboratorio de Ingeniería Ambiental. 2022. *Informe de resultados*. Bogotá D.C.
- US Environmental Protection Agency. 2012. «Guidelines for Water Reuse». *Development* 26(September): 252. <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r04108/625r04108.pdf>.
- Vargas M, Rodrigo, y Mario Díaz-Granados O. 1998. «Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia». *XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*: 14.

8. Anexos

Anexo 1. Registros hidrológicos y de calidad de agua

■ Registros de precipitación de lluvia

En la Tabla 8-1 se presentan los registros de monitoreo de precipitación en la estación Tibaitatá (21205420) de tipología Agrometeorológica, localizada en el municipio de Mosquera (Cundinamarca), más específicamente en la Latitud 4° 41' 29"N y Longitud 74° 12' 32"W, y de propiedad intelectual de la entidad IDEAM.

Tabla 8-1: Registros de precipitación – Estación Tibaitatá

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VR. ANUAL
1955	-	-	50.2	120.5	26.8	54.2	56.8	26.5	34.5	107.7	79.0	42.3	598.5
1956	14.3	32.5	14.5	73.9	61.0	35.1	7.4	10.7	72.5	132.7	35.9	34.8	525.3
1957	2.9	1.0	24.8	90.8	81.5	34.0	28.1	26.0	39.8	119.2	45.0	10.8	503.9
1958	8.6	25.5	39.9	65.9	27.2	13.5	1.0	41.1	11.2	59.5	89.8	40.7	423.9
1959	5.2	9.3	54.1	72.1	51.7	113.0	66.0	38.7	22.4	91.8	41.3	17.9	583.5
1960	17.8	50.2	27.7	55.6	61.5	19.3	73.0	40.6	62.3	111.5	29.7	78.5	627.7
1961	22.7	5.8	55.9	95.7	32.1	63.6	40.1	23.7	16.5	152.0	114.9	30.3	653.3
1962	34.7	15.4	68.2	110.4	120.0	94.2	33.9	41.3	36.6	73.5	110.1	40.2	778.5
1963	15.2	69.9	41.6	82.8	89.8	32.3	22.9	37.3	18.8	87.2	80.3	13.3	591.4
1964	6.3	5.8	36.1	119.7	47.4	95.6	-	-	-	-	-	-	310.9
1965	11.4	23.0	18.3	186.5	83.5	16.0	26.0	22.1	8.6	91.5	112.7	37.6	637.2
1966	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1967	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1968	-	-	28.1	88.8	37.0	115.4	23.2	18.4	101.5	125.4	78.0	20.6	636.4
1969	53.6	33.8	19.3	132.4	49.4	52.8	6.3	33.2	-	-	-	-	380.8
1970	-	-	-	-	-	-	-	-	-	135.9	54.5	27.2	217.6
1971	-	41.9	95.0	59.9	109.2	72.6	28.9	34.2	57.2	75.6	-	34.2	608.7
1972	57.6	40.4	51.7	99.8	90.8	63.8	30.0	32.5	15.9	79.2	-	25.9	587.6
1973	2.6	1.2	49.6	34.8	48.5	55.7	52.2	59.8	104.5	85.2	97.4	65.9	657.4
1974	71.4	54.9	51.3	82.2	55.2	32.4	14.1	33.6	87.8	65.3	140.4	4.8	693.4
1975	5.2	73.4	93.2	25.5	108.7	60.2	28.8	59.6	56.5	119.5	69.5	49.6	749.7
1976	20.7	55.0	51.0	90.1	71.2	58.6	10.1	13.9	50.2	78.5	61.6	21.7	582.6
1977	2.6	9.0	55.0	42.8	25.2	21.6	41.8	35.5	96.9	102.7	74.8	29.4	537.3
1978	1.8	5.5	45.1	-	-	53.5	-	-	48.8	-	-	34.6	189.3
1979	9.4	35.9	48.4	84.5	85.0	62.0	49.4	59.8	58.7	132.3	135.7	26.4	787.5
1980	9.7	29.7	14.3	-	24.7	84.2	11.4	60.3	39.9	54.8	54.5	58.0	441.5
1981	3.4	24.6	42.5	167.7	129.3	62.3	21.8	31.9	42.5	88.8	49.4	40.1	704.3
1982	56.5	27.0	49.1	175.3	89.7	21.0	25.8	29.2	25.1	81.4	82.1	43.0	705.2
1983	6.0	10.8	78.4	146.9	65.9	45.4	42.4	37.3	25.4	55.4	69.5	89.7	673.1
1984	39.5	53.1	49.8	94.1	90.6	101.9	33.2	69.6	88.3	114.7	153.9	29.2	917.9

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VR. ANUAL
1985	1.2	4.9	22.6	32.1	99.7	12.9	46.4	90.6	112.8	71.9	66.3	19.1	580.5
1986	6.3	79.1	27.9	56.3	90.0	87.6	24.7	24.8	73.5	164.1	92.0	3.9	730.2
1987	30.7	16.2	20.8	60.1	56.9	28.4	89.6	34.2	59.3	112.8	61.6	34.8	605.4
1988	6.6	50.8	10.5	87.9	37.3	62.2	45.1	58.5	89.1	92.9	130.6	59.5	731.0
1989	12.1	45.0	82.8	29.2	48.2	44.8	27.0	22.2	41.6	105.0	27.2	100.8	585.9
1990	34.8	47.9	50.6	107.8	67.2	25.2	22.0	25.1	33.9	124.9	61.8	90.4	691.6
1991	3.5	5.2	89.6	49.7	131.7	41.8	48.8	26.2	58.3	11.1	71.1	45.4	582.4
1992	68.4	26.6	15.7	43.0	13.8	8.6	26.2	38.2	41.3	17.3	84.6	26.3	410.0
1993	27.2	22.6	96.6	104.2	112.8	26.7	49.8	23.4	46.6	44.5	143.2	11.2	708.8
1994	43.0	69.7	104.4	126.3	66.1	55.3	32.9	30.4	13.1	78.9	122.2	4.1	746.4
1995	6.1	16.5	74.0	119.4	56.5	64.0	76.6	59.0	68.6	82.2	68.6	66.7	758.2
1996	29.3	44.4	58.1	81.9	95.5	92.4	48.0	36.5	28.9	86.8	30.6	19.5	651.9
1997	53.7	19.2	34.9	74.5	28.1	85.7	27.9	6.1	13.9	30.7	76.7	2.6	454.0
1998	4.1	11.4	14.5	105.5	67.4	45.9	57.4	57.3	60.4	101.4	61.0	88.5	674.8
1999	20.9	88.4	50.3	49.6	53.5	88.0	23.4	39.5	64.0	82.8	41.1	51.1	652.6
2000	21.3	94.2	64.8	65.3	90.9	61.4	39.2	44.5	134.9	45.9	33.5	32.2	728.1
2001	29.0	20.4	56.4	11.7	96.5	49.9	30.9	11.3	39.5	32.3	31.7	74.8	484.4
2002	14.2	13.1	77.8	119.4	86.8	79.7	34.2	16.5	52.7	60.1	37.1	10.3	601.9
2003	4.0	14.4	55.2	71.2	30.8	64.2	29.5	34.1	35.4	78.1	59.4	12.5	488.8
2004	13.2	57.6	71.8	148.9	152.9	56.2	51.4	17.2	40.4	130.7	100.6	31.1	872.0
2005	24.1	41.0	47.1	54.7	147.5	21.1	23.7	41.3	73.9	101.9	54.1	57.6	688.0
2006	58.7	5.7	107.6	115.0	114.5	118.3	18.5	22.1	25.3	142.9	90.3	40.3	859.2
2007	2.6	14.7	58.1	143.0	71.6	77.2	34.0	67.7	13.7	155.7	91.2	75.0	804.5
2008	24.4	32.9	96.6	104.3	133.7	85.3	45.1	75.0	33.5	89.3	129.8	41.0	890.9
2009	21.7	82.8	90.4	100.9	8.1	56.5	51.7	34.3	7.0	104.8	60.0	40.9	659.1
2010	1.8	35.0	16.9	137.8	171.7	103.3	185.7	39.2	43.8	88.8	198.4	140.0	1,162.4
2011	34.9	90.2	90.2	130.3	122.0	68.7	45.0	42.2	49.7	149.4	175.6	96.8	1,095.0
2012	31.1	28.6	140.0	138.3	39.0	30.1	36.0	31.0	7.8	77.8	70.2	36.7	666.6
2013	10.1	84.4	41.4	55.4	109.1	21.8	31.7	51.2	19.8	70.4	101.3	64.5	661.1
2014	33.9	58.1	23.7	44.2	79.9	40.9	25.0	22.2	50.4	98.5	51.0	46.2	574.0
2015	37.8	22.4	64.4	42.4	21.5	35.4	42.1	34.0	27.3	21.2	64.1	3.7	416.3
2016	3.9	38.6	26.9	79.4	115.4	46.3	49.1	49.6	70.4	65.3	126.8	58.6	730.3
2017	17.9	27.8	145.5	66.2	120.9	57.7	29.3	44.1	32.0	89.8	80.4	45.0	756.6
2018	17.7	18.3	61.4	122.7	186.6	50.7	42.3	33.8	50.8	67.2	95.9	0.4	747.8
2019	16.3	25.9	85.2	112.0	132.9	52.6	39.6	26.5	24.2	60.3	61.5	29.6	666.6
2020	6.6	40.8	84.8	-	77.9	89.1	103.0	50.9	66.4	11.2	173.6	45.2	749.5
2021	11.5	49.8	173.2	96.7	177.1	128.6	51.4	104.9	54.8	187.0	101.7	17.5	1,154.2
2022	4.2	62.4	78.8	27.7	-	-	-	-	-	-	-	-	173.1

Fuente: Adaptado de (IDEAM 2022)

▪ Monitoreo de calidad de agua

A continuación se presentan los resultados de calidad del agua de los 6 puntos de muestreo, durante las 4 campañas de monitoreo ejecutadas durante el periodo 2020 – 2021. Dicho monitoreo y análisis fue realizado en su totalidad por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) de la Universidad Nacional de Colombia.

- 92 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Tabla 8-2: Resultados de calidad de agua punto 1

Parámetro	Unidades	Método	Resultado			
			36274	36691	36700	36893
			27/10/2020	22/02/2021	5/03/2021	21/04/2021
pH	Unidades	SM 4500 H+B	6.7	6.55	6.86	6.68
Conductividad Específica	µS/cm 25°C	SM 2510 B	770	688	644	744
Temperatura	°C	SM 2550 B	16.2	14.4	15.8	14.9
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	SM 4500-O G	1.83	< 0.2	No registra	< 0.2
DBO ₅	mg/L O ₂	SM 5210 B SM 4500 OG	47	70	38	31
DQO	mg/L O ₂	SM 5220 C	63	121	60	67
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SM 2540 D	< 5	34	28	12
NTK	mg/L-N	SM 4500 N-NH3	8.0	9.2	16.2	6.0
Fósforo Total	mg/L P-PO ₄ ³⁻	SM 4500 P B D	0.73	1.23	1.38	1.05
Nitritos	mg/L N-NO ₂ ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Nitratos	mg/L N-NO ₃ ⁻	SM 4110 B	0.8	0.2	< 0.1	49.2
Cloruros	mg/L Cl ⁻	SM 4110 B	103.7	85.9	51.1	104.6
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁼	SM 4110 B	28.5	46	10.2	100.9
COT	N/A	SM 5310 C		12.22	12.7	< 0.1
Fluoruros	mg/L F ⁻	SM 4110 B	0.09	0.11	0.1	0.18
Bromuros	mg/L Br ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Fosfatos	mg/L PO ₄ ³⁻	SM 4110 B	2.15	0.8	1.3	4.1
Coliformes Totales	NMP/100ml	NMP	7.90E+03	3.50E+03	1.60E+04	3.50E+04
E.coli	NMP/100ml	NMP	1.30E+03	6.80E+01	9.20E+03	2.70E+03

Fuente: Adaptado de (Universidad Nacional de Colombia 2022)

Tabla 8-3: Resultados de calidad de agua punto 2

Parámetro	Unidades	Método	Resultado			
			36275	36692	36701	36894
			27/10/2020	22/02/2021	5/03/2021	21/04/2021
pH	Unidades	SM 4500 H+B	6.38	6.8	6.89	6.53
Conductividad Específica	µS/cm 25°C	SM 2510 B	754	758	694	437
Temperatura	°C	SM 2550 B	15.8	14.9	14.0	15.0
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	SM 4500-O G	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
DBO ₅	mg/L O ₂	SM 5210 B SM 4500 OG	57	72	111	761

Parámetro	Unidades	Método	Resultado			
			36275	36692	36701	36894
			27/10/2020	22/02/2021	5/03/2021	21/04/2021
DQO	mg/L O ₂	SM 5220 C	91	131	215	1562
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SM 2540 D	2	456	100	3370
NTK	mg/L-N	SM 4500 N-NH ₃	14.3	14.7	11.6	10.9
Fósforo Total	mg/L P-PO ₄ ³⁻	SM 4500 P B D	2.35	1.11	1.56	< 0.1
Nitritos	mg/L N-NO ₂ ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Nitratos	mg/L N-NO ₃ ⁻	SM 4110 B	0.2	0.3	< 0.1	0.4
Cloruros	mg/L Cl ⁻	SM 4110 B	40.2	87.1	52.3	64.0
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁼	SM 4110 B	29.4	33.5	5.2	12.1
COT	N/A	SM 5310 C		11.5	21.4	29.8
Fluoruros	mg/L F ⁻	SM 4110 B	0.3	0.17	0.12	0.31
Bromuros	mg/L Br ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Fosfatos	mg/L PO ₄ ³⁻	SM 4110 B	5.6	1.6	1.2	10.5
Coliformes Totales	NMP/100ml	NMP	2.40E+04	5.40E+04	3.50E+03	7.00E+03
E.coli	NMP/100ml	NMP	3.30E+03	4.50E+01	3.50E+03	4.50E+03

Fuente: Adaptado de (Universidad Nacional de Colombia 2022)

Tabla 8-4: Resultados de calidad de agua punto 3

Parámetro	Unidades	Método	Resultado			
			36276	36693	36702	36895
			27/10/2020	22/02/2021	5/03/2021	21/04/2021
pH	Unidades	SM 4500 H+B	6.31	6.7	6.93	7.57
Conductividad Específica	μS/cm 25°C	SM 2510 B	655	654	597	614
Temperatura	°C	SM 2550 B	15.0	15.0	14.1	14.8
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	SM 4500-O G	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
DBO ₅	mg/L O ₂	SM 5210 B SM 4500 OG	34	441	481	159
DQO	mg/L O ₂	SM 5220 C	65	853	922	320
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SM 2540 D	2	144	450	270
NTK	mg/L-N	SM 4500 N-NH ₃	8.0	8.2	13.4	3.7
Fósforo Total	mg/L P-PO ₄ ³⁻	SM 4500 P B D	1.21	0.41	0.55	0.4
Nitritos	mg/L N-NO ₂ ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

- 94 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Parámetro	Unidades	Método	Resultado			
			36276	36693	36702	36895
			27/10/2020	22/02/2021	5/03/2021	21/04/2021
pH	Unidades	SM 4500 H+B	6.31	6.7	6.93	7.57
Nitratos	mg/L N-NO ₃ ⁻	SM 4110 B	< 0.1	0.7	< 0.1	13.5
Cloruros	mg/L Cl ⁻	SM 4110 B	72.0	79.6	38.2	104.4
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁼	SM 4110 B	27.3	39.6	11.5	62.4
COT	N/A	SM 5310 C		11.8	26	2.9
Fluoruros	mg/L F ⁻	SM 4110 B	0.13	0.11	0.06	0.15
Bromuros	mg/L Br ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Fosfatos	mg/L PO ₄ ³⁻	SM 4110 B	3	0.5	0.5	1.2
Coliformes Totales	NMP/100ml	NMP	4.40E+04	1.30E+04	1.70E+03	3.50E+04
E.coli	NMP/100ml	NMP	2.00E+04	1.80E+01	4.50E+02	1.00E+04

Fuente: Adaptado de (Universidad Nacional de Colombia 2022)

Tabla 8-5: Resultados de calidad de agua punto 4

Parámetro	Unidades	Método	Resultado			
			36277	36694	36703	36896
			27/10/2020	22/02/2021	5/03/2021	21/04/2021
pH	Unidades	SM 4500 H+B	6.58	7.21	7.2	7.82
Conductividad Específica	μS/cm 25°C	SM 2510 B	700	1167	702	915
Temperatura	°C	SM 2550 B	18.0	19.2	16.8	16.8
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	SM 4500-O G	< 0.2	< 0.2	< 0.2	1
DBO₅	mg/L O ₂	SM 5210 B SM 4500 OG	37	82	41	30
DQO	mg/L O ₂	SM 5220 C	66	186	88	56
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SM 2540 D	< 5	90	36	7
NTK	mg/L-N	SM 4500 N-NH3	10.3	41.8	18.7	21.7
Fósforo Total	mg/L P-PO ₄ ³⁻	SM 4500 P B D	1.07	3.48	1.99	0.57
Nitritos	mg/L N-NO ₂ ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	0.1	41.8
Nitratos	mg/L N-NO ₃ ⁻	SM 4110 B	<0.1	< 0.1	0.4	39.3
Cloruros	mg/L Cl ⁻	SM 4110 B	86.2	118.5	4.0	64.8
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁼	SM 4110 B	16.7	27.4	8.2	142

Parámetro	Unidades	Método	Resultado			
			36277	36694	36703	36896
			27/10/2020	22/02/2021	5/03/2021	21/04/2021
COT	N/A	SM 5310 C		40	14.7	9.6
Floruros	mg/L F ⁻	SM 4110 B	0.09	0.58	0.05	0.1
Bromuros	mg/L Br ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Fosfatos	mg/L PO ₄ ³⁻	SM 4110 B	3.2	5.1	0.9	4.7
Coliformes Totales	NMP/100ml	NMP	9.20E+06	5.40E+06	3.50E+06	1.60E+05
E.coli	NMP/100ml	NMP	1.10E+06	3.50E+06	2.40E+06	1.60E+05

Fuente: Adaptado de (Universidad Nacional de Colombia 2022)

Tabla 8-6: Resultados de calidad de agua punto 5

Parámetro	Unidades	Método	Resultado			
			36278	36695	36704	36897
			27/10/2020	22/02/2021	5/03/2021	21/04/2021
pH	Unidades	SM 4500 H+B	6.56	7.25	7.1	7.19
Conductividad Específica	μS/cm 25°C	SM 2510 B	631	702	465	1047
Temperatura	°C	SM 2550 B	17.8	18.9	17.6	18.8
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	SM 4500-O G	2.68	10.11	6.02	4.17
DBO ₅	mg/L O ₂	SM 5210 B SM 4500 OG	12	74	90	104
DQO	mg/L O ₂	SM 5220 C	32	123	221	187
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SM 2540 D	17	13	550	187
NTK	mg/L-N	SM 4500 N-NH3	0.6	19.3	10.8	17.7
Fósforo Total	mg/L P-PO ₄ ³⁻	SM 4500 P B D	1.19	1.8	2.37	0.44
Nitritos	mg/L N-NO ₂ ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	3.2
Nitratos	mg/L N-NO ₃ ⁻	SM 4110 B	< 0.1	0.2	0.1	17.5
Cloruros	mg/L Cl ⁻	SM 4110 B	76.5	76.6	12.2	156.0
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁼	SM 4110 B	8.4	14.5	8.4	53
COT	N/A	SM 5310 C		9.1	25.9	20.9
Floruros	mg/L F ⁻	SM 4110 B	0.13	0.12	0.02	0.1
Bromuros	mg/L Br ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2
Fosfatos	mg/L PO ₄ ³⁻	SM 4110 B	2	0.9	< 0.2	0.3
Coliformes Totales	NMP/100ml	NMP	7.90E+03	1.70E+04	3.30E+04	4.90E+02
E.coli	NMP/100ml	NMP	2.00E+03	7.00E+03	4.50E+03	2.30E+02

Fuente: Adaptado de (Universidad Nacional de Colombia 2022)

- 96 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Tabla 8-7: Resultados de calidad de agua punto 6

Parámetro	Unidades	Método	Resultado			
			36279	36696	36705	36898
			27/10/2020	22/02/2021	5/03/2021	21/04/2021
pH	Unidades	SM 4500 H+B	6.37	5.93	7.25	7.74
Conductividad Específica	µS/cm 25°C	SM 2510 B	650	678	706	946
Temperatura	°C	SM 2550 B	18.5	17.4	17.2	17.9
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	SM 4500-O G	0.31	< 0.2	< 0.2	< 0.2
DBO₅	mg/L O ₂	SM 5210 B SM 4500 OG	36	44	52	56
DQO	mg/L O ₂	SM 5220 C	62	76	109	99
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SM 2540 D	< 5	71	140	29
NTK	mg/L-N	SM 4500 N-NH3	18.0	22.0	21.1	22.3
Fósforo Total	mg/L P-PO ₄ ³⁻	SM 4500 P B D	1.39	1.81	1.57	2.21
Nitritos	mg/L N-NO ₂ ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	77.9
Nitratos	mg/L N-NO ₃ ⁻	SM 4110 B	< 0.1	0.7	0.6	2.9
Cloruros	mg/L Cl ⁻	SM 4110 B	82.6	81.8	29.8	70.4
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁼	SM 4110 B	15.1	40	5.8	141.2
COT	N/A	SM 5310 C		8.7	20.7	15
Fluoruros	mg/L F ⁻	SM 4110 B	0.11	0.11	0.05	0.12
Bromuros	mg/L Br ⁻	SM 4110 B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Fosfatos	mg/L PO ₄ ³⁻	SM 4110 B	3.3	0.4	2.0	5.5
Coliformes Totales	NMP/100ml	NMP	1.70E+05	1.30E+06	1.50E+06	7.00E+05
E.coli	NMP/100ml	NMP	2.00E+04	7.90E+05	2.40E+05	7.00E+05

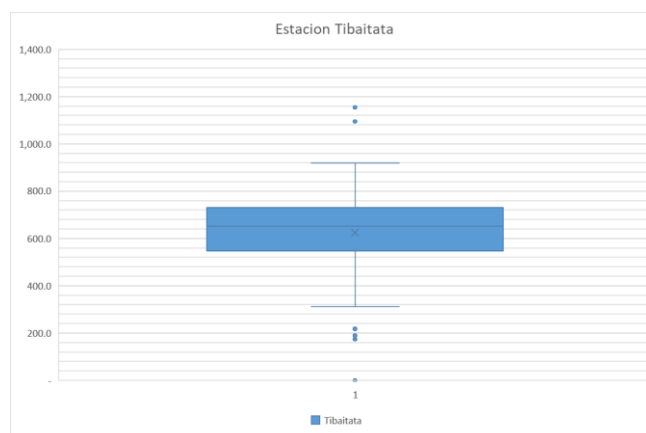
Fuente: Adaptado de (Universidad Nacional de Colombia 2022)

Anexo 2. Procesamiento de la información de monitoreo

▪ Procesamiento información hidrológica

En la Gráfica 8-1 se presenta la detección de datos anómalos de la precipitación registrada en la estación Tibaitatá, a partir de diagramas tipo Boxplot.

Gráfica 8-1: Detección de datos anómalos de precipitación – Estación Tibaitatá



Fuente: Elaboración propia

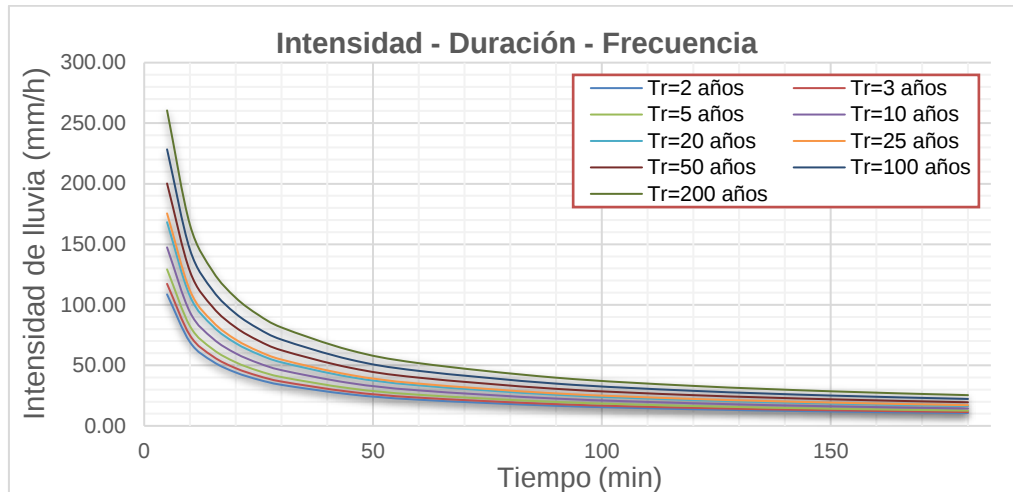
A continuación se muestra los resultados de la estimación de las curvas IDF para la estación Tibaitatá.

Tabla 8-8: Curvas IDF Intensidad – Duración – Frecuencia

	<u>Tr (años)</u>								
<u>t</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>10</u>	<u>20</u>	<u>25</u>	<u>50</u>	<u>100</u>	<u>200</u>
<u>5</u>	108.61	117.31	129.26	147.46	168.22	175.50	200.21	228.39	260.54
<u>10</u>	69.22	74.76	82.38	93.97	107.20	111.84	127.59	145.55	166.04
<u>15</u>	53.18	57.44	63.29	72.20	82.36	85.93	98.03	111.83	127.57
<u>20</u>	44.11	47.64	52.50	59.89	68.32	71.28	81.31	92.75	105.81
<u>25</u>	38.15	41.21	45.41	51.80	59.09	61.65	70.33	80.23	91.52
<u>30</u>	33.89	36.60	40.33	46.01	52.49	54.76	62.47	71.26	81.30
<u>45</u>	26.04	28.12	30.99	35.35	40.33	42.08	48.00	54.75	62.46
<u>60</u>	21.60	23.33	25.70	29.32	33.45	34.90	39.81	45.42	51.81
<u>90</u>	16.59	17.92	19.75	22.53	25.70	26.81	30.59	34.89	39.81
<u>120</u>	13.76	14.87	16.38	18.69	21.32	22.24	25.37	28.94	33.02
<u>150</u>	11.91	12.86	14.17	16.16	18.44	19.24	21.95	25.03	28.56
<u>180</u>	10.57	11.42	12.59	14.36	16.38	17.09	19.49	22.24	25.37

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8-2: Curvas IDF Intensidad – Duración – Frecuencia

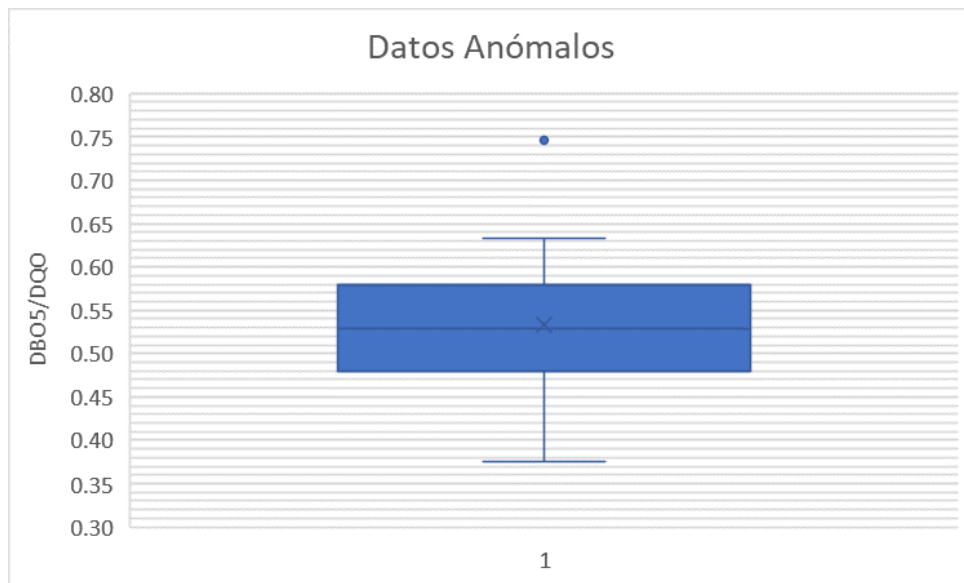


Fuente: Elaboración propia

▪ **Procesamiento información de calidad del agua**

En la Gráfica 8-3 se presenta la correlación entre la DBO₅ y la DQO de las 36 muestras analizadas en el área de proyecto, correspondientes a los 6 puntos de muestreo, durante las 4 campañas de muestreo

Gráfica 8-3: Relación DBO₅ y la DQO



Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Resultados experimentales del sistema de tratamiento

▪ Remoción DQO

En la Tabla 8-9 se presentan los resultados de los ensayos realizados de DQO en la planta piloto.

Tabla 8-9: Remoción DQO

Día	Afluente	DQO Afluente mg/L DOQ	Efluente	Día	DQO Efluente mg/L DOQ	EFICIENCIA
15	ARS OCT 25	228.57	Efluente OCT 28	18	95.05	58.4%
18	ARS OCT 28	228.57	Efluente OCT 29	19	95.05	58.4%
19	ARS OCT 29	212.24	Efluente NOV 2	23	79.21	62.7%
23	ARS OCT 29	212.24	Efluente NOV 10	31	126.73	40.3%
31	ARS NOV 10	195.92	Efluente NOV 12	33	95.05	51.5%
33	ARS NOV 12	212.24	Efluente NOV 16	37	79.21	62.7%
37	ARS NOV 22	205.94	Efluente NOV 23	44	110.89	46.2%
44	ARS NOV 23	205.94	Efluente NOV 25	46	126.73	38.5%
46	ARS NOV 25	348.51	Efluente NOV 26	47	110.89	68.2%
47	ARS NOV 29	300.99	Efluente DIC 01	52	95.05	68.4%
52	ARS DIC 01	396.04	Efluente DIC 02	53	126.73	68.0%
53	ARS DIC 02	316.83	Efluente DIC 3	54	110.89	65.0%
54	ARS DIC 03	697.03	Efluente DIC 06	57	221.78	68.2%
57	Recirculación DIC 06	697.03	Efluente DIC 9	60	50.69	92.7%
60	ARS DIC 10	512.62	Efluente DIC 14	65	316.83	38.2%
65	ARS DIC 14	855.45	Efluente DIC 15	66	601.98	29.6%
66	Recirculación DIC 15	855.45	Efluente DIC 16	67	221.78	74.1%
67	ARS DIC 16	665.35	Efluente DIC 17	68	253.47	61.9%
78	ARS DIC 27	601.98	Efluente DIC 29	80	411.88	31.6%
80	ARS DIC 30	745.63	Efluente ENE 3	85	186.41	75.0%
85	ARS ENE 3	699.03	Efluente ENE 5	87	186.41	73.3%
86	ARS ENE 5	699.03	Efluente ENE 7	89	186.41	73.3%
87	Recirculación ENE 7	699.03	Efluente ENE 11	93	62.75	91.0%
93	ARS ENE 11	652.43	Efluente ENE 13	95	93.20	85.7%
95	ARS ENE 13	512.62	Efluente ENE 14	96	217.48	57.6%
96	ARS ENE 14	605.83	Efluente ENE 17	99	155.34	74.4%
99	ARS ENE 17	885.44	Efluente ENE 19	101	217.48	75.4%
100	Recirculación ENE 19	885.44	Efluente ENE 21	103	124.27	86.0%
103	ARS ENE 21	605.83	Efluente ENE 24	106	248.54	59.0%
106	ARS ENE 24	978.64	Efluente ENE 25	107	248.54	74.6%
107	ARS ENE 25	699.03	Efluente ENE 27	109	219.61	68.6%

100 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Día	Afluente	DQO Afluente mg/L DOQ	Efluente	Día	DQO Efluente mg/L DOQ	EFICIENCIA
109	ARS ENE 27	1129.41	Efluente ENE 28	110	219.61	80.6%
110	ARS ENE 28	894.12	Efluente ENE 31	113	250.98	71.9%
113	Recirculación ENE 31	894.12	Efluente FEB 02	115	188.24	78.9%
115	ARS FEB 02	705.88	Efluente FEB 04	117	156.86	77.8%
116	Recirculación FEB 04	705.88	Efluente FEB 07	120	125.49	82.2%
120	ARS FEB 07	705.88	Efluente FEB 09	122	125.49	82.2%
122	ARS FEB 09	847.06	Efluente FEB 11	124	156.86	81.5%
124	ARS FEB 11	776.47	Efluente FEB 14	127	141.18	81.8%
	Recirculación FEB 14	776.47	Efluente FEB 18	131	94.12	87.9%
131	ARS FEB 18	1129.41	Efluente FEB 21	134	62.75	94.4%
134	ARS FEB 21	658.82	Efluente FEB 23	136	94.12	85.7%
136	ARS FEB 23	705.88	Efluente FEB 25	138	125.49	82.2%
138	ARS 25	682.35	Efluente FEB 28	141	78.43	88.5%
141	ARS FEB 28	776.47	Efluente MAR 02	143	94.12	87.9%
143	ARS MAR 02	752.94	Efluente MAR 04	145	125.49	83.3%
145	Recirculación MAR 04	752.94	Efluente MAR 7	148	62.75	91.7%
148	ARS MAR 7	658.82	Efluente MAR 9	150	109.80	83.3%
150	ARS MAR 9	705.88	Efluente MAR 11	152	62.75	91.1%
153	ARS MAR 11	705.88	Efluente MAR 14	155	186.41	73.6%
155	ARS MAR 14	605.83	Efluente MAR 16	157	62.14	89.7%
157	ARS MAR 18	605.83	Efluente MAR 18 R1	159	233.01	61.5%
157	ARS MAR 18	605.83	Efluente MAR 18 R2	159	77.67	87.2%
157	ARS MAR 18	745.63	Efluente MAR 19	160	62.14	91.7%
158	ARS MAR 18	745.63	Efluente MAR 22	163	121.40	83.7%
159	ARS MAR 19	745.63	Efluente MAR 23	164	77.67	89.6%
164	ARS MAR 23	699.03	Efluente MAR 24	165	62.14	91.1%
164	ARS MAR 23	699.03	Efluente MAR 25	166	77.67	88.9%
164	ARS MAR 23	699.03	Efluente MAR 28	169	24.32	96.5%
169	ARS MAR 28	652.43	Efluente MAR 30	171	186.41	71.4%
171	ARS MAR 30	699.03	Efluente ABR 01	173	62.03	91.1%
173	ARS ABR 01	699.03	Efluente ABR 04	176	23.00	96.7%
176	ARS ABR 04	699.03	Efluente ABR 08	180	37.94	94.6%
180	Recirculación ABR 08	699.03	Efluente ABR 11	183	39.87	94.3%
183	ARS ABR 11	605.61	Efluente ABR 13	185	23.24	96.2%
184	Recirculación ABR 13	605.61	Efluente ABR 18	190	23.74	96.1%
190	ARS ABR 18	745.63	Efluente ABR 20	192	77.67	89.6%
192	Recirculación ABR 20	699.03	Efluente ABR 22	194	48.03	93.1%

Día	Afluente	DQO Afluente mg/L DOQ	Efluente	Día	DQO Efluente mg/L DOQ	EFICIENCIA
194	Recirculación ABR 22	699.03	Efluente ABR 25	197	30.32	95.7%
196	ARS ABR 20	699.03	Efluente ABR 27	199	30.32	95.7%
199	ARS ABR 27	690.84	Efluente ABR 30	202	30.38	95.6%
202	ARS ABR 30	829.91	Efluente MAY 2	204	69.28	91.7%
204	ARS MAY 2	829.91	Efluente MAY 4	206	110.04	86.7%
206	ARS MAY 4	829.91	Efluente MAY 18	220	39.09	95.3%
220	ARS MAY 18	695.33	Efluente MAY 20	222	44.07	93.7%
222	ARS MAY 20	740.19	Efluente MAY 23	225	86.12	88.4%
225	ARS MAY 23	785.05	Efluente MAY 25	227	93.16	88.1%
227	ARS MAY 25	780.56	Efluente MAY 27	229	50.62	93.5%
233	ARS MAY 31	780.56	Efluente MAY 31	233	61.34	92.1%

Fuente: Elaboración propia

▪ Comportamiento Alcalinidad total

A continuación se presentan los resultados de la evaluación de alcalinidad total dentro del filtro anaerobio de flujo descendente, durante la fase estable.

Tabla 8-10: Alcalinidad total

Muestra	Día	Vol. muestra	Normalidad H2S04	Volumen H2S04	Dilución	Alcalinidad Total (mgCaCO ₃ /L)
Efluente ENE 25	107	50	0.02	30.1	1	602
Efluente ENE 27	109	50	0.02	6.15	5	615
Efluente ENE 28	110	50	0.02	5.1	5	510
Efluente ENE 31	113	50	0.02	5	5	500
Efluente FEB 02 Recirculación	115	50	0.02	6.15	5	615
Efluente FEB 04	117	50	0.02	5	5	500
Efluente FEB 07 Recirculación	120	50	0.02	5.5	5	550
Efluente FEB 09	122	50	0.02	5.6	5	560
Efluente FEB 11	124	50	0.02	5.3	5	530
Efluente FEB 14	127	50	0.02	5.5	5	550
Efluente FEB 18 Recirculación	131	50	0.02	2.7	10	540
Efluente FEB 21	134	50	0.02	6	5	600
Efluente FEB 23	136	50	0.02	5.9	5	590
Efluente FEB 25	138	50	0.02	5.7	5	570
Efluente FEB 28	141	50	0.02	6.1	5	610
Efluente MAR 02	143	50	0.02	6.75	5	675
Efluente MAR 04	145	50	0.02	6.05	5	605
Efluente MAR 7 Recirculación	148	50	0.02	6.75	5	675
Efluente MAR 9	150	50	0.02	6.75	5	675

102 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Muestra	Día	Vol. muestra	Normalidad H ₂ S ₀₄	Volumen H ₂ S ₀₄	Dilución	Alcalinidad Total (mgCaCO ₃ /L)
Efluente MAR 11	152	50	0.02	6.15	5	615
Efluente MAR 14	155	50	0.02	6.6	5	660
Efluente MAR 16	157	50	0.02	2.6	10	520
Efluente MAR 18	159	50	0.02	2.5	10	500
Efluente MAR 19	160	50	0.02	3	10	600
Efluente MAR 25	166	50	0.02	3.9	10	780
Efluente MAR 28	169	50	0.02	3.8	10	760
Efluente MAR 30	171	50	0.02	2.8	10	560
Efluente ABR 01	173	50	0.02	2.8	10	560
Efluente ABR 04	176	50	0.02	3.15	10	630
Efluente ABR 06	178	50	0.02	2.65	10	530
Efluente ABR 08	180	50	0.02	3.4	10	680
Efluente ABR 11	183	50	0.02	2.95	10	590
Efluente ABR 13	185	50	0.02	2.8	10	560
Efluente ABR 20	192	50	0.02	3	10	600
Efluente ABR 21	193	50	0.02	3.7	10	740
Efluente ABR 22	194	50	0.02	3.1	10	620
Efluente ABR 25	197	50	0.02	3.05	10	610
Efluente ABR 27	199	50	0.02	2.65	10	530
Efluente ABR 30	202	50	0.02	3.6	10	720
Efluente MAY 02	204	50	0.02	3	10	600
Efluente MAY 04	206	50	0.02	2.85	10	570
Efluente MAY 05	207	50	0.02	2.6	10	520
Efluente MAY 20	222	50	0.02	2.6	10	520
Efluente MAY 23	225	50	0.02	4.2	10	840
Efluente MAY 25	227	50	0.02	4.65	10	930
Efluente MAY 27	229	50	0.02	4.5	10	900
Efluente MAY 31	233	50	0.02	4.55	10	910

Fuente: Elaboración propia

▪ Comportamiento Ácidos grasos volátiles

En la Tabla 8-11 se presentan los resultados de la evaluación de ácidos grasos volátiles en el filtro anaerobio de flujo descendente, durante la fase estable.

Tabla 8-11: Ácidos grasos Volátiles

Muestra	Día	Vol. Muestra (ml)	Vol. HCL (ml)	VOL. NaOH (ml)	Acidez Total (meq/L)	AGV (meq/L)	AGV (mgDQO/L)	NaHCO ₃ (g/L)	AGV/ ALC Total
Efluente ENE 25	107	50	5.5	0.5	11	1	100	1.00	0.17
Efluente ENE 27	109	50	5	0.6	10	1.2	120	1.00	0.20
Efluente ENE 28	110	50	4.7	0.4	9.4	0.8	80	1.00	0.16
Efluente ENE 31	113	50	6.5	1.5	13	3	300	1.00	0.60
Efluente FEB 02 Recirculación	115	50	5.3	0.6	10.6	1.2	120	1.00	0.20
Efluente FEB 04	117	50	4.6	0.8	9.2	1.6	160	1.00	0.32
Efluente FEB 07 Recirculación	120	50	4.7	0.5	9.4	1	100	1.00	0.18
Efluente FEB 09	122	50	4.9	0.6	9.8	1.2	120	1.00	0.21
Efluente FEB 11	124	50	4.9	0.5	9.8	1	100	1.00	0.19
Efluente FEB 14	127	50	5.5	0.8	11	1.6	160	1.00	0.29
Efluente FEB 18 Recirculación	131	50	5.5	0.65	11	1.3	130	1.00	0.24
Efluente FEB 21	134	50	6.2	1.4	12.4	2.8	280	1.00	0.47
Efluente FEB 23	136	50	5.2	1.2	10.4	2.4	240	1.00	0.41
Efluente FEB 25	138	50	5.2	1.1	10.4	2.2	220	1.00	0.39
Efluente FEB 28	141	50	5.8	1	11.6	2	200	1.00	0.33
Efluente MAR 02	143	50	6.7	1.2	13.4	2.4	240	1.00	0.36
Efluente MAR 04	145	50	6.8	1.3	13.6	2.6	260	1.00	0.43
Efluente MAR 7 Recirculación	148	50	6.3	1.1	12.6	2.2	220	1.00	0.33
Efluente MAR 9	150	50	6.6	1.7	13.2	3.4	340	1.00	0.50
Efluente MAR 11	152	50	5.4	1.6	10.8	3.2	320	1.00	0.52
Efluente MAR 14	155	50	6	0.6	12	1.2	120	1.00	0.18
Efluente MAR 16	157	50	4	0.6	8	1.2	120	1.00	0.23
Efluente MAR 18	159	50	5.6	1	11.2	2	200	1.00	0.40
Efluente MAR 19	160	50	5	1.4	10	2.8	280	1.00	0.47
Efluente MAR 25	166	50	7.6	0.6	15.2	1.2	120	1.00	0.15
Efluente ABR 11	183	50	5.1	0.6	10.2	1.2	120	1.00	0.20
Efluente ABR 13	185	50	4	0.6	8	1.2	120	1.00	0.21
Efluente ABR 20	192	50	4	0.95	8	1.9	190	1.00	0.32
Efluente ABR 21	193	50	5.8	0.5	11.6	1	100	1.00	0.14
Efluente ABR 22	194	50	4.8	0.5	9.6	1	100	1.00	0.16
Efluente ABR 25	197	50	4.7	0.3	9.4	0.6	60	1.00	0.10

104 Evaluación de un sistema de tratamiento, a escala de laboratorio, para reducir la concentración de carga orgánica, bacterias y/o parásitos utilizando agua residual sintética, con miras a su aplicabilidad en irrigación de cultivos en la sabana occidental de Bogotá - Colombia

Muestra	Día	Vol. Muestra (ml)	Vol. HCL (ml)	VOL. NaOH (ml)	Acidez Total (meq/L)	AGV (meq/L)	AGV (mgDQO/L)	NaHCO ₃ (g/L)	AGV/ ALC Total
Efluente ABR 27	199	50			0	0	0	1.00	0.00
Efluente ABR 30	202	50	5.6	0.4	11.2	0.8	80	1.00	0.11
Efluente MAY 02	204	50	4.8	0.4	9.6	0.8	80	1.00	0.13
Efluente MAY 04	206	50	4.8	0.4	9.6	0.8	80	1.00	0.14
Efluente MAY 05	207	50	4.8	0.5	9.6	1	100	1.00	0.19
Efluente MAY 20	222	50	5.8	0.65	11.6	1.3	130	1.50	0.25
Efluente MAY 23	225	50	5.7	0.4	11.4	0.8	80	1.50	0.10
Efluente MAY 25	227	50	7.3	0.6	14.6	1.2	120	1.50	0.13
Efluente MAY 27	229	50	7.3	0.4	14.6	0.8	80	1.50	0.09
Efluente MAY 31	233	50	7.7	0.4	15.4	0.8	80	1.50	0.09

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Agua residual sintética (ARS)

▪ Preparación agua residual sintética (ARS)

El agua residual sintética utilizada como afluente, se preparó utilizando agua desionizada, centrando su principal fuente de carbono en el contenido de glucosa anhidra, glicerol y cloruro de amonio, tal y como se muestra en la Tabla 8-12. Dicha composición se tomó como referencia del proyecto *“Evaluación de la remoción de azitromicina disuelta en agua residual sintética en un reactor UASB a escala de laboratorio”* (Martínez 2019). Adicionalmente, la preparación del agua residual sintética se acompañó de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) como solución buffer, siendo este un reactivo con pH poco invasivo con la biopelícula formada en el filtro anaerobio y cercano a los valores de pH ideales de operación.

Tabla 8-12: Agua residual sintética

Reactivo	Concentración
Glucosa	3900 mg/l
Glicerol	200 mg/l
Cloruro de amonio	720 mg/l
Cloruro de sodio	100 mg/l
Dihidrógeno de fosfato de potasio	60 mg/l
Cloruro de calcio dihidratado	48 mg/l
Sulfato de magnesio hidratado	15 mg/l

Fuente: adaptado de (Martínez 2019)