



**Biofiltración como Alternativa para reducir las cargas de nitrógeno y fosforo presentes en las aguas residuales y su Posible Uso en Riego Agrícola**

**Valentina Martínez Cardona**

**Cesar Eduardo Caicedo Rosero**

**Corporación Universitaria Minuto de Dios – Uniminuto**

**Especialización en Gerencia de Proyectos**

**Buenaventura- Valle del cauca**

**Noviembre de 2025**

**Biofiltración como Alternativa para reducir las cargas de nitrógeno y fosforo presentes en las aguas residuales y su Posible Uso en Riego Agrícola**

**Valentina Martínez Cardona**

**Cesar Eduardo Caicedo Rosero**

**Trabajo de Grado Presentado como Requisito para Optar al Título de Especialistas en Gerencia de Proyectos**

**Asesor(a)**

**Luz Stella Díaz Benítez**

**Corporación Universitaria Minuto de Dios – Uniminuto**

**Especialización en Gerencia de Proyectos**

**Buenaventura- Valle del cauca**

**Noviembre de 2025**

## Dedicatoria

Dedicamos este proyecto con profunda gratitud y cariño a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida y especialmente durante este proceso académico. A ustedes, que nos han acompañado con paciencia y comprensión en los momentos de mayor exigencia, que han celebrado con nosotros cada pequeño avance y que no han dejado de creer en nuestras capacidades incluso cuando el camino se volvía difícil.

A nuestra familia, gracias por su amor incondicional, por sus palabras de aliento cuando más las necesitábamos y por brindarnos la fortaleza emocional para seguir adelante. Cada sacrificio, cada gesto de apoyo y cada muestra de confianza se convirtió en el impulso que nos permitió llegar hasta aquí.

Este logro no es de nosotros, sino también de ustedes, porque detrás de cada página de este proyecto está el eco de su apoyo, la inspiración de su ejemplo y el amor que me sostiene. Con todo nuestro corazón, les dedicamos este trabajo, como un pequeño reflejo del enorme papel que han tenido en nuestra formación personal y profesional.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por darnos la sabiduría, la fortaleza y la oportunidad de culminar este proceso con éxito.

A nuestra familia, gracias por su paciencia, comprensión y por acompañarnos en cada etapa de este desafío académico. Su apoyo inquebrantable fue fundamental para llegar hasta aquí

## Tabla de contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>10</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>11</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>12</b>
<b>1. Planteamiento del problema</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Justificación</b> .....	<b>14</b>
2.1. Preguntas de investigación .....	15
2.1.1. Pregunta general: .....	15
2.1.2. Preguntas específicas: .....	15
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>16</b>
3.1. Objetivo General .....	16
3.2. Objetivos Especifico .....	16
<b>4. Marco de referencia</b> .....	<b>17</b>
4.1. Marco Teórico .....	17
4.1.1. Indicadores de sodicidad .....	20
4.1.2. Indicadores de salinidad .....	21

4.1.3. Indicadores de toxicidad .....	23
4.2. Marco Conceptual .....	26
4.3. Marco legal.....	29
<b>5. Metodología y Tipo de Investigación .....</b>	<b>32</b>
<b>6. Resultados.....</b>	<b>34</b>
6.1. Eficiencia en la remoción de contaminantes en aguas residuales de la industria textil	34
6.1.1. La problemática de la contaminación hídrica.....	34
6.1.2. Métodos de remoción de contaminantes .....	35
6.1.3. Parámetros para evaluar la eficiencia .....	36
6.1.4. Resultados de la encuesta aplicada .....	36
6.1.5. Recomendaciones técnicas.....	39
6.2. Características clave de los biofiltros para la remoción de nutrientes.....	40
6.2.1. Importancia de la remoción de nitrógeno y fósforo .....	41
6.2.2. Características técnicas de los biofiltros.....	41
6.2.3. Beneficios del uso de agua tratada en riego.....	44



6.2.4. Recomendaciones técnicas.....	45
6.3. Impacto ambiental y aplicabilidad del biofiltro en sistemas de riego .....	46
6.3.1. Reducción de contaminantes y mejora de la calidad del agua .....	46
6.3.2. Ventajas ambientales y agrícolas del biofiltro .....	47
6.3.3. Resultados de la encuesta: disposición al uso de agua residual tratada...	48
<b>7. Discusión.....</b>	<b>53</b>
<b>8. Conclusión .....</b>	<b>57</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>60</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>67</b>



## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> Criterios de la calidad del agua a partir de los valores de la RAS.....	20
<b>Tabla 2</b> Relación de los valores del PSS y la calidad del agua de riego.....	21
<b>Tabla 3</b> Valores del carbonato de sodio residual y su relación con la calidad del agua para el riego .....	21
<b>Tabla 4</b> Relación de los valores de la CE y la correspondiente clasificación de la salinidad .....	22
<b>Tabla 5</b> Relación de los valores del IP y la calidad del agua de riego .....	22
<b>Tabla 6</b> Relación de los valores de la salinidad potencial y efectiva con la calidad del agua de riego .....	23
<b>Tabla 7</b> Relación de los valores las especies tóxicas disueltas en el agua de riego y la clasificación de calidad.....	23
<b>Tabla 8</b> Objetivos y Actividades .....	33
<b>Tabla 9</b> Sistemas de tratamiento utilizados .....	43
<b>Tabla 10</b> Beneficios percibidos del uso de agua tratada.....	44
<b>Tabla 11</b> Ventajas del biofiltro en sistemas de riego.....	47
<b>Tabla 12</b> Tecnologías de tratamiento utilizadas.....	49

## Lista de Gráficos

<b>Gráfico 1</b> Tipo de fuente de agua utilizada para riego.....	37
<b>Gráfico 2</b> Calidad percibida del agua utilizada .....	37
<b>Gráfico 3</b> Eficiencia percibida del sistema actual de tratamiento .....	38
<b>Gráfico 4</b> Uso de agua tratada para riego .....	43
<b>Gráfico 5</b> Disposición al uso de agua residual tratada .....	48
<b>Gráfico 6</b> Eficiencia percibida del sistema actual .....	50
<b>Gráfico 7</b> Frecuencia de monitoreo de calidad del agua .....	51



## Resumen

Este proyecto planteó la biofiltración como una alternativa sostenible para disminuir las cargas de fósforo y nitrógeno presentes en las aguas residuales generadas por la industria textil, con el propósito de reutilizarlas en sistemas de riego agrícola. La investigación se llevó a cabo bajo un enfoque mixto y de tipo descriptivo, integrando revisión documental, encuestas a actores locales y análisis técnico de métodos de tratamiento. En el primer apartado se evidenció que los métodos convencionales no lograban una remoción eficiente de contaminantes, lo cual limitó el reúso del agua en zonas como Buenaventura. En el segundo apartado se identificaron las características críticas de los biofiltros, como el tipo de material filtrante, el tamaño de partícula, el pH y el tiempo de contacto, destacando el potencial de materiales locales como la cáscara de arroz y la fibra de coco. El tercer apartado evaluó el impacto ambiental y la aplicabilidad del biofiltro, encontrando una actitud favorable hacia el uso de agua tratada, siempre que se cumplieran los estándares de calidad. Se concluyó que el biofiltro rediseñado fue una solución viable, replicable y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente en territorios vulnerables como Buenaventura, donde fortaleció la seguridad hídrica, la agricultura sostenible y la gestión ambiental comunitaria.

**Palabras clave:** Biofiltro, Aguas residuales, Nitrógeno, Fósforo, Reutilización agrícola

### **Abstract**

*This project proposes the redesign of a biofilter as a sustainable alternative to reduce phosphorus and nitrogen loads in wastewater from the textile industry, aiming to reuse it in agricultural irrigation systems. The research followed a mixed-method and applied approach, combining literature review, surveys with local stakeholders, and technical analysis of treatment methods. The first section revealed that conventional methods do not ensure efficient contaminant removal, limiting water reuse in areas like Buenaventura. The second section identified key biofilter characteristics—such as filter material type, particle size, pH, and contact time—highlighting the potential of local materials like rice husk and coconut fiber. The third section assessed the environmental impact and applicability of the biofilter, finding a favorable attitude toward using treated water, provided quality standards are met. The study concludes that the redesigned biofilter is a viable, replicable solution aligned with the Sustainable Development Goals, especially in vulnerable regions like Buenaventura, where it can strengthen water security, promote sustainable agriculture, and improve community-based environmental management.*

**Keywords:** *Biofilter, Wastewater, Nitrogen, Phosphorus, Agricultural reuse*

## Introducción

El tratamiento de aguas residuales industriales es un reto urgente en los territorios donde el acceso al agua limpia está cada vez más limitado. La industria textil, en particular, genera efluentes con altas cargas de fósforo y nitrógeno, además de colorantes y compuestos que son difícil degradar, afectando la calidad de los cuerpos de agua y también la salud de los suelos agrícolas. Aunque estos nutrientes pueden ser aprovechados en zonas de la agricultura, industrial o portuarias, su exceso produce problemas como eutrofización y deterioro ambiental que no se controlan fácil.

En territorios como Buenaventura, donde los sistemas de tratamiento convencionales son escasos o casi inexistente, y la agricultura depende de fuentes naturales como ríos y quebradas, la reutilización de aguas tratadas se presenta como una alternativa estratégica para fortalecer la seguridad hídrica y la sostenibilidad territorial.

Este proyecto propone analizar el rediseño de un biofiltro como solución para remover fósforo y nitrógeno de las aguas residuales textiles, permitiendo su aplicación en sistemas de riego agrícola. La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto y aplicado, integrando revisión documental, análisis y percepción social mediante encuestas a actores locales. El estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 12 (producción y consumo responsables), ofreciendo una ruta clara para avanzar hacia una agricultura más resiliente y una gestión comunitaria responsable del recurso hídrico.

## 1. Planteamiento del problema

En Buenaventura, la presión sobre los recursos hídricos proviene de la actividad portuaria, el sector hotelero, las industrias locales y también de la agricultura que depende de ríos y quebradas para el riego. Aunque los biofiltros se han aplicado principalmente en la industria textil para reducir cargas de fósforo y nitrógeno, en este territorio la problemática está más relacionada con descargas de aguas servidas de hoteles, residuos del mantenimiento portuario y efluentes industriales diversos que afectan la calidad del agua disponible para la población y los cultivos. Estos contaminantes, aunque distintos en origen, generan impactos similares: deterioro de la calidad del agua, riesgos para la producción agrícola y afectación de la salud comunitaria. Los sistemas convencionales de tratamiento, cuando existen, no logran responder de manera suficiente, lo que limita la posibilidad de reutilizar el agua en riego y en otras actividades productivas.

Frente a este escenario, el rediseño de un biofiltro se plantea como una alternativa viable y sostenible para Buenaventura, capaz de adaptarse a las condiciones reales del territorio. Su simplicidad operativa y bajo costo lo convierten en una opción más adecuada que los tratamientos químicos o físicos tradicionales, y al integrar materiales locales como fibra de coco o cáscara de arroz se fortalece la economía regional. Aunque la referencia principal de aplicación de biofiltros es la industria textil, su uso puede extenderse a sectores hoteleros, portuarios e industriales, y sobre todo al agrícola, donde la calidad del agua es crítica para mantener la productividad y la seguridad alimentaria.

## 2. Justificación

El consumo creciente de agua en Buenaventura, impulsado por la actividad portuaria, el sector hotelero y las industrias locales, se suma a la presión agrícola que depende de ríos y quebradas para el riego. Esta situación evidencia la necesidad de alternativas sostenibles que permitan garantizar la disponibilidad del recurso hídrico en un territorio donde los sistemas convencionales de tratamiento son limitados o poco eficientes. Aunque los biofiltros se han aplicado principalmente en la industria textil para reducir cargas de fósforo y nitrógeno, su potencial de uso se extiende a otros sectores que generan efluentes con características similares, como descargas de aguas servidas y residuos de mantenimiento portuario.

Los métodos tradicionales de tratamiento, además de costosos, no logran responder de manera suficiente a las condiciones locales, lo que limita la reutilización segura del agua en riego y en actividades productivas. En este contexto, el rediseño de un biofiltro se plantea como una propuesta viable y adaptable, capaz de integrar materiales locales como fibra de coco y cáscara de arroz, fortaleciendo la economía regional y la participación comunitaria. Su simplicidad operativa y bajo costo lo convierten en una opción más adecuada que los tratamientos químicos o físicos convencionales, especialmente en territorios vulnerables como Buenaventura.

Más allá de su aplicación técnica, el proyecto busca explorar cómo esta tecnología puede mejorar la calidad del agua destinada al riego y aportar, en un plano teórico, elementos de resiliencia a la cadena productiva que depende del puerto, el turismo, la

industria y la agricultura. Estos sectores requieren un manejo responsable del recurso hídrico para asegurar su continuidad en el tiempo, y aunque los resultados aquí se presentan como escenarios de aplicación futura, permiten visualizar beneficios potenciales que conectan la sostenibilidad ambiental con la competitividad regional.

## **2.1. Preguntas de investigación**

### **2.1.1. Pregunta general:**

¿Qué condiciones debe tener un biofiltro para que este en la capacidad de reducir las cargas de nitrógeno y fósforo presentes en las aguas residuales provenientes de la industria textil con el fin de que ser reutilizadas en sistemas de riego?

### **2.1.2. Preguntas específicas:**

¿Qué tan eficientes son los métodos de remoción de contaminantes en las plantas de tratamiento de agua residual para disminuir la concentración de fósforo y nitrógeno contenida en los desechos hídricos de la industria textil?

¿Cuáles son las características críticas de los biofiltros que permiten la eliminación de contaminantes, y en especial su capacidad de reducir las altas concentraciones de fósforo y nitrógeno?

### 3. Objetivos

#### 3.1. Objetivo General

Determinar las condiciones que debe tener un biofiltro para poder reducir las cargas de nitrógeno y fósforo presentes en las aguas residuales de la industria textil para que puedan ser reutilizadas en sistemas de riego.

#### 3.2. Objetivos Especifico

- Conocer qué tan eficientes son los métodos de remoción de contaminantes en las plantas de tratamiento de aguas residuales para disminuir la concentración de fósforo y nitrógeno contenidos en los desechos hídricos de la industria textil.
- Establecer las características críticas de los biofiltros que permiten la remoción de los contaminantes, y especialmente su capacidad para reducir las altas concentraciones de nitrógeno y fósforo.
- Describir el impacto ambiental de aplicaciones del biofiltro en términos de reducción de contaminantes y su potencial en la reutilización en sistemas de riego.

#### 4. Marco de referencia

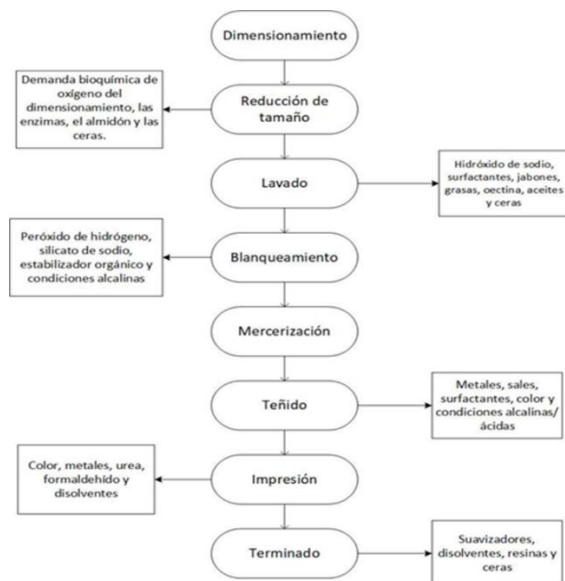
El tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil representa un desafío ambiental y técnico que requiere soluciones sostenibles, eficientes y adaptadas al contexto territorial. Para fundamentar esta investigación, se presenta un marco de referencia que integra antecedentes teóricos, conceptuales y normativos sobre la remoción de contaminantes, el uso de biofiltros y la calidad del agua para riego. Como señala Scholz (2019), “la reutilización segura del agua requiere comprender a fondo los procesos de tratamiento y los parámetros que determinan su idoneidad para usos agrícolas”.

##### 4.1. Marco Teórico

El crecimiento acelerado de la población, junto con el desarrollo industrial y los desafíos de sostenibilidad que enfrenta la sociedad actual, advierten sobre una creciente escasez de los recursos hídricos. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), se estima que para el año 2050 la demanda mundial de agua aumentará en un 55 %, impulsada principalmente por el sector manufacturero (más del 400 %), la generación de energía térmica (140 %) y el uso doméstico (130 %) (OCDE, 2012). En este contexto, el margen para ampliar el uso de agua en riego agrícola resulta bastante limitado, lo cual genera preocupación, ya que se proyecta que la población mundial crecerá en más de 2 mil millones de personas, lo que incrementará la presión sobre los recursos naturales que proveen alimento y energía.

Por otro lado, la industria textil ha sido identificada como una de las principales fuentes de contaminación a nivel global, debido a sus procesos de producción intensivos. Uno de los problemas más relevantes es la generación de grandes volúmenes de aguas residuales con alta carga de colorantes y compuestos orgánicos de difícil degradación (Qayyum, 2007). En este sentido, el aprovechamiento de estas aguas residuales como recurso alternativo para sistemas de riego representa una oportunidad valiosa para enfrentar futuros desafíos ambientales.

En particular, el proceso húmedo de fabricación de fibras textiles emplea grandes cantidades de agua potable, que posteriormente es liberada con altos niveles de contaminación. Dicho proceso incluye etapas como el dimensionado, la reducción de tamaño, el blanqueo, la mercerización, la tintura, la impresión y los acabados (Scholz, 2019). La **Figura 1** muestra los principales contaminantes presentes en las aguas residuales generadas en cada fase del proceso húmedo, evidenciando la carga química específica y su impacto directo en la calidad del efluente final.

**Figura 1***Diagrama de Flujo Proceso Textil*

Las aguas residuales que son descargadas por la industria textil contienen una mezcla compleja de colorantes, metales pesados y otros tipos de contaminantes. Estos efluentes suelen presentar niveles elevados de pH, sólidos suspendidos (SS), demanda química de oxígeno (COD), demanda bioquímica de oxígeno (BOD), temperatura, sales y metales. Por ello, durante su tratamiento es esencial realizar un seguimiento constante de estos parámetros y compararlos con los valores estándar establecidos. Además, se deben considerar otros indicadores como el carbono orgánico total (TOC), el nitrógeno en forma de amonio ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), el nitrógeno en forma de nitrato ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) y el fósforo como fosfato ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ), los cuales también son relevantes para evaluar la calidad del efluente final (Scholz, 2019).

Con base en lo anterior, se identificaron tres variables clave para determinar la aptitud del agua tratada en sistemas de riego: salinidad, sodicidad y toxicidad. A partir de estas se derivan diversos indicadores que permiten establecer si el agua cumple con las condiciones necesarias para su uso agrícola (Aguilarm, 2016). En el caso de la sodicidad, se consideran la relación de absorción de sodio (RAS), el porcentaje de sodio soluble (PSS) y el carbonato de sodio residual (CSR). Para la salinidad, los indicadores incluyen la conductividad eléctrica, el índice de permeabilidad (IP), la salinidad potencial (SP) y la salinidad efectiva (SE). En cuanto a la toxicidad, se evalúan las concentraciones de elementos como el boro y el cloruro. También se toma en cuenta la alcalinidad del agua, cuyo parámetro de referencia es el pH.

#### **4.1.1. Indicadores de sodicidad**

Las tablas 1, 2 y 3 presentan los criterios de sodicidad más relevantes a tener en cuenta para evaluar la calidad en el uso del agua para los sistemas de riego.

**Tabla 1**

*Criterios de la calidad del agua a partir de los valores de la RAS*

<b>RAS</b>	<b>Riesgo de sodicidad</b>	<b>Criterio de uso de calidad</b>
<b>&lt;10</b>	Bajo	Excelente
<b>10-18</b>	Medio	Buena
<b>18-26</b>	Alto	Dudosa
<b>&gt;26</b>	Muy alto	No recomendable

Fuente: (C J. C., 1986) y (L.A.Richards, 1954).

**Tabla 2**

*Relación de los valores del PSS y la calidad del agua de riego*

<b>PSS</b>	<b>Criterio de calidad</b>
<b>&lt;20</b>	Excelente
<b>20-40</b>	Buena
<b>40-60</b>	Aceptable
<b>60-80</b>	Dudosa
<b>&gt;80</b>	No aceptable

Fuente: (C B. W.).

**Tabla 3**

*Valores del carbonato de sodio residual y su relación con la calidad del agua para el riego*

<b>CSR</b>	<b>Criterio de calidad</b>
<b>&lt; 1,25</b>	Buena
<b>1,25-2,50</b>	Condicionada
<b>&gt;2,50</b>	No recomendable

Fuente: (L.A.Richards, 1954).

#### **4.1.2. Indicadores de salinidad**

Las tablas 4, 5 y 6 presentan los criterios de salinidad necesarios para tener en cuenta en la evolución la calidad en el uso del agua para los sistemas de riego.

**Tabla 4**

*Relación de los valores de la CE y la correspondiente clasificación de la salinidad*

Valores de la CE (Arslan y Demir)	Criterio sobre la salinidad	Valores de la CE (Lingaswamy y Saxena)	Criterio sobre la calidad del agua
<b>C1 &lt; 250 <math>\mu\text{S cm}^{-1}</math></b>	Baja	< 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$	Excelente
<b>C2 250-750 <math>\mu\text{S cm}^{-1}</math></b>	Media	250-750 $\mu\text{S cm}^{-1}$	Buena
<b>C3 750- 2 250 <math>\mu\text{S cm}^{-1}</math></b>	Alta	750- 2 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$	Aceptable
<b>C4 &gt; 2 250 <math>\mu\text{S cm}^{-1}</math></b>	Muy alta	2 250-5000 $\mu\text{S cm}^{-1}$	Dudosa
-	-	>5000 $\mu\text{S cm}^{-1}$	No aceptable

Fuente: (Saxena, 2015) y (Demir, 2013).

**Tabla 5**

*Relación de los valores del IP y la calidad del agua de riego*

IP	Criterio de calidad
<b>&gt;75</b>	Clase I (Excelente)
<b>25-75</b>	Clase II (Buena)
<b>&gt;25</b>	Clase III (No recomendable)

Fuente: (C. Balmaseda, 2006).

La salinidad potencial se determina a partir de la ecuación:  $SP = [Cl^-] + \frac{1}{2}[SO_4]$ . Mientras que la salinidad efectiva se calcula en dependencia del valor de las diferentes concentraciones de calcio, magnesio sulfato, carbonato y bicarbonato, todos expresados como meqL<sup>-1</sup>.

**Tabla 6**

*Relación de los valores de la salinidad potencial y efectiva con la calidad del agua de riego*

<b>SP-SE</b>	<b>Criterio de calidad</b>
<b>&lt;3</b>	Buena
<b>3-15</b>	Condicionada
<b>&gt;15</b>	No recomendable

Fuente: (C. Balmaseda, 2006).

#### **4.1.3. Indicadores de toxicidad**

La tabla 7 presenta uno de criterios de toxicidad más críticos a tener en cuenta para evaluar la calidad en el uso del agua para los sistemas de riego.

**Tabla 7**

*Relación de los valores las especies tóxicas disueltas en el agua de riego y la clasificación de calidad*

<b>Clase</b>	<b>Boro (ppm)</b>	<b>Clase</b>	<b>Cloruro (meqL-1)</b>
<b>Buena</b>	<3	Buena	<1
<b>Condicionada</b>	3-4	Condicionada	1-5
<b>No recomendable</b>	>4	No recomendable	>5

Fuente: (C. Balmaseda, 2006).

En la actualidad, diversos estudios han demostrado avances significativos en el tratamiento y reúso de aguas residuales. No obstante, muchos de estos métodos presentan restricciones tecnológicas y económicas que dificultan su aplicación en

contextos reales. En este marco, se identificó que los biofiltros representan una alternativa prometedora, ya que, a diferencia de los tratamientos físicos o químicos convencionales, su operación es relativamente sencilla, su eficiencia en la remoción de contaminantes es alta, y requieren una inversión considerablemente menor. Además, se alinean con los principios del desarrollo sostenible (Ghawi, 2018).

Entre las técnicas más utilizadas en el tratamiento biológico de aguas residuales se encuentra la vermifiltración, un sistema aeróbico que permite la descomposición de materia orgánica mediante procesos de ingestión y digestión llevados a cabo por bacterias y lombrices. Sin embargo, esta tecnología ha sido aplicada principalmente en aguas residuales domésticas, ya que las industriales presentan mayores desafíos debido a su elevada salinidad, pH extremo, presencia de metales pesados y pesticidas (Singh, 2019).

Investigaciones recientes han explorado el uso de sustancias bioaumentadas, diseñadas para acelerar la degradación de contaminantes y mejorar la eficiencia del tratamiento. Estas sustancias permiten reducir parámetros críticos como el pH, amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), nitratos ( $\text{NO}_3$ ), demanda bioquímica de oxígeno (BOD) y demanda química de oxígeno (COD), los cuales son esenciales para evaluar el nivel de contaminación y la efectividad del proceso (Ibrahim, 2020). Paralelamente, otros estudios han centrado su atención en materiales como la turba y la fibra de coco, que poseen capacidad para adsorber metales pesados generados en procesos industriales que utilizan agua como insumo (Henryk, 2016). Estos metales, si no son tratados adecuadamente, pueden

representar un riesgo ambiental significativo, especialmente si se reutilizan en actividades agrícolas.

Estos agroresiduos han sido empleados como medios filtrantes en biofiltros, logrando eliminar concentraciones elevadas de metales como cromo, cadmio, níquel, plomo y cobre. Además, han demostrado capacidad para adsorber olores desagradables, como los generados por el ácido sulfhídrico (Omri, 2013). En 2018 se diseñó un biofiltro que integraba estos materiales, aunque no se proporcionó información detallada sobre la posibilidad de reutilizar el agua tratada en otros usos (Ghawi, 2018).

Otro material que ha sido objeto de estudio es la cáscara de arroz pirolizada, la cual ha mostrado buenos resultados en la mejora de la eficiencia de biofiltros a bajo costo. Algunos estudios indican que el agua filtrada mediante este material puede ser segura para su uso en sistemas de riego (Al., 2019). Sin embargo, su aplicación en el tratamiento de aguas residuales industriales ha sido limitada, debido a la alta concentración de contaminantes y metales presentes. Por esta razón, se ha investigado el uso de filtros continuos con tratamiento microbiano a base de cáscara de arroz, con el objetivo de lograr la biodegradación de los contaminantes provenientes de la industria textil (Forss, 2017).

Para que el agua residual pueda ser reutilizada en riego agrícola, es fundamental realizar un proceso de desnitrificación, que consiste en reducir la carga de nitrógeno, uno de los principales contaminantes. En este sentido, un estudio realizado en 2017 monitoreó una comunidad bacteriana en un biofiltro alimentado con metanol, utilizado

para tratar aguas residuales municipales. Se encontró que la familia bacteriana *Hyphomicrobium* tiene la capacidad de incrementar la tasa de desnitrificación (Rissanen, 2017). Además, se identificó que la cantidad de carbono presente en el agua influye directamente en este proceso, ya que un exceso puede generar acumulación de nitratos residuales, lo cual compromete la calidad del agua para su reutilización (Et al., 2015). Manteniendo una proporción adecuada entre carbono y nitrógeno, y utilizando compuestos biodegradables, se puede mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes, incluso en condiciones de baja temperatura (Rodziewicz, 2019).

El fósforo también representa un desafío importante en el tratamiento de aguas residuales. Aunque es un nutriente esencial para los cultivos, su concentración excesiva puede afectar negativamente la calidad del agua destinada al riego. En 2018, se llevó a cabo un estudio que empleó arena y biochar elaborado a partir de residuos del procesamiento de aceite de oliva como medios filtrantes para reducir el fósforo en aguas residuales provenientes de una planta de tratamiento (Hanandeh, 2018). Este estudio evidenció que, en muchos casos, los tratamientos convencionales no logran eliminar completamente el fósforo, lo que limita el reuso seguro del agua.

#### 4.2. Marco Conceptual

**Efluentes textiles:** Son los residuos líquidos generados por la industria textil, caracterizados por contener colorantes, metales pesados y sustancias químicas que alteran las condiciones del agua, afectando su pH, demanda química de oxígeno (COD), demanda bioquímica de oxígeno (BOD), entre otros parámetros. (Kuhad, 2004)

**Indicadores de calidad del agua:** Son parámetros utilizados para evaluar la idoneidad del agua en distintos usos. En el contexto del riego, los principales indicadores son:

**Salinidad:** Mide la concentración de sales disueltas en el agua, afectando la disponibilidad de agua para las plantas.

**Sodicidad:** Relacionada con el contenido de sodio, influye en la estructura del suelo y su capacidad para absorber agua.

**Toxicidad:** Se refiere a la presencia de elementos perjudiciales como boro y cloruros, que pueden afectar negativamente el crecimiento vegetal. (González-Trujillo, J. R., & Rodríguez-González, M. T., 2017)

**Biofiltros:** Sistemas de filtración biológica que utilizan microorganismos para degradar contaminantes. (Moksa, 2021)

**Vermifiltración:** Uso de lombrices y bacterias para el tratamiento de aguas residuales. (Gutiérrez-Miceli, 2011)

**Bioaumentación:** Aplicación de microorganismos específicos para mejorar la eliminación de contaminantes. (Depuradoras.es., 2015)

**Agro residuos:** Se consideran residuos agrarios aquellos generados por actividades del sector primario tales como la agrícola, la ganadera y la de mantenimiento forestal y de montes. También se incluyen en este término los residuos derivados de la

industria agroalimentaria, maderera, corchera y papelera. (Materiales como fibra de coco y cáscara de arroz empleados como filtros para eliminar metales pesados). (SPAG)

**Aguas residuales:** son un tipo de agua que ha sido afectada negativamente en su calidad por el uso humano. Estas aguas contienen residuos procedentes de actividades humanas o industriales que, en muchos casos, pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y para la salud humana. (agua)

**Sostenibilidad:** se refiere a la capacidad de mantener o preservar un equilibrio en el uso de recursos naturales, sociales y económicos, de manera que satisfaga las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. En otras palabras, se trata de adoptar prácticas y comportamientos que permitan satisfacer nuestras necesidades presentes sin comprometer los recursos y el bienestar de las generaciones futuras. (Group)

**Contaminación hídrica:** La contaminación hídrica o contaminación del agua es la presencia de componentes químicos o de otra naturaleza en una densidad superior a la situación natural, de modo que no reúna las condiciones para el uso que se le hubiera destinado en su estado original. El agua es imprescindible, no solo para la supervivencia de los seres vivos, sino también para el desarrollo socioeconómico, la producción de energía o la adaptación al Cambio Climático. (greenblog, 2021)

### 4.3. Marco legal

El marco normativo colombiano en materia de aguas residuales y su posible reutilización en sistemas de riego se fundamenta en disposiciones constitucionales, leyes nacionales y resoluciones específicas del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, así como en lineamientos locales que buscan garantizar la protección del recurso hídrico y la sostenibilidad territorial. La Constitución Política de 1991 establece en su artículo 79 el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y la obligación del Estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente, lo cual incluye la gestión adecuada de las aguas residuales. Este principio se convierte en la base para el desarrollo de políticas públicas que regulan el uso y el tratamiento del agua en Colombia.

Una de las normas más relevantes es la Ley 99 de 1993, que crea el Ministerio de Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Esta ley otorga al Estado la facultad de regular el uso de los recursos naturales y establece que las actividades productivas deben garantizar la sostenibilidad ambiental. En relación con el agua, la ley señala que su aprovechamiento debe realizarse bajo criterios de conservación y uso racional, lo cual se conecta directamente con la necesidad de implementar tecnologías como los biofiltros para el tratamiento de aguas residuales (Congreso de la Republica de Colombia, 1993).

De manera complementaria, la Ley 373 de 1997 sobre programas de uso eficiente y ahorro del agua obliga a los sectores productivos y a las entidades territoriales a diseñar estrategias que reduzcan el consumo y promuevan la reutilización del recurso. Esta

práctica es clave para los territorios como Buenaventura, donde la presión sobre el agua proviene no solo de la actividad portuaria, sino también del sector hotelero y agrícola. La ley establece que las autoridades ambientales deben fomentar proyectos que permitan la optimización del recurso hídrico, lo cual abre espacio para propuestas académicas y técnicas como el rediseño de biofiltros (Congreso de la República de Colombia, 1997).

En el ámbito reglamentario, la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible constituye un hito importante, pues reglamenta el uso de aguas residuales y adopta disposiciones para su aprovechamiento en diferentes actividades, incluyendo la agricultura. Esta norma establece parámetros de calidad que deben cumplir las aguas tratadas para ser reutilizadas, considerando indicadores como la conductividad eléctrica, el pH y la presencia de nutrientes críticos como fósforo y nitrógeno. Aunque fue diseñada con un alcance nacional, su aplicación en contextos locales como Buenaventura resulta fundamental para garantizar que los proyectos de reutilización de aguas residuales cumplan con estándares mínimos de seguridad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

A nivel local, las autoridades ambientales regionales, como la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), tienen la responsabilidad de implementar y vigilar el cumplimiento de estas prácticas. La CVC regula el uso del agua en actividades agrícolas e industriales dentro de su jurisdicción y promueve proyectos de innovación ambiental que fortalezcan la gestión comunitaria del recurso. En Buenaventura, esta entidad juega un papel clave en la articulación de iniciativas que integren la actividad portuaria, hotelera e industrial con la protección de los ecosistemas hídricos. Además,

los planes de ordenamiento territorial (POT) del municipio incluyen lineamientos sobre el manejo de aguas residuales y la necesidad de tecnologías sostenibles para reducir la presión sobre los ríos y quebradas locales.

El marco legal colombiano establece una ruta clara para la gestión de aguas residuales y su reutilización en sistemas de riego, priorizando la sostenibilidad y la protección ambiental. Aunque los biofiltros se han aplicado principalmente en la industria textil, su incorporación en sectores presentes en Buenaventura como el portuario, hotelero, industrial y agrícola se ajusta a las disposiciones nacionales y locales. Este proyecto se asienta en un escenario teórico que busca demostrar cómo las normas vigentes permiten explorar alternativas sostenibles, sin afirmar resultados inmediatos, pero sí proyectando beneficios potenciales para la seguridad hídrica y la competitividad regional.

## 5. Metodología y Tipo de Investigación

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto de carácter teórico-descriptivo, integrando revisión documental, análisis comparativo de tecnologías y percepción social mediante encuestas exploratorias. El propósito no es validar experimentalmente un biofiltro en condiciones reales, sino construir un marco de referencia que proyecta su aplicabilidad en sectores relevantes de Buenaventura: portuario, hotelero, industrial y agrícola.

Para el cumplimiento de los objetivos, se emplean dos instrumentos principales:

Encuestas estructuradas dirigidas a operarios de plantas y agricultores, con el fin de recolectar información sobre la eficiencia de los métodos de tratamiento, la percepción de la calidad del agua y la disposición al uso de aguas residuales tratadas en sistemas de riego.

Gestión documental, mediante revisión sistemática de literatura científica, normativa ambiental y estudios de caso, que permite identificar parámetros técnicos, criterios de diseño y experiencias previas en el uso de biofiltros para la remoción de fósforo y nitrógeno.

La combinación de estos instrumentos permite observar la información obtenida, fortalecer el análisis y orientar el rediseño del biofiltro hacia condiciones reales de aplicación. Como señalan Hernández, Fernández y Baptista (2014), “la investigación

aplicada busca resolver problemas concretos mediante el uso de métodos rigurosos y contextualizados”.

**Tabla 8**

*Objetivos y Actividades*

Objetivo específico	Actividades asociadas
<p><b>1. Evaluar la eficiencia en la remoción de fósforo y nitrógeno en aguas residuales textiles.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir las concentraciones de fósforo y nitrógeno en las aguas utilizadas en procesos de coloración.</li> <li>• Caracterizar el agua residual después de ser tratada por distintos métodos de remoción.</li> <li>• Calcular y comparar la eficiencia de los métodos de filtración para determinar el más adecuado.</li> </ul>
<p><b>2. Identificar las características críticas de los biofiltros para la remoción de contaminantes.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudiar el funcionamiento de biofiltros aplicados en investigaciones recientes.</li> <li>• Realizar pruebas experimentales con biofiltros modificados, variando materiales y condiciones operativas.</li> <li>• Definir los criterios técnicos de diseño que optimizan la remoción de fósforo y nitrógeno.</li> </ul>

## 6. Resultados

A continuación, se presentan los principales hallazgos obtenidos a partir del análisis documental, técnico y de las encuestas aplicadas. Estos resultados permiten evidenciar la percepción de los actores locales, las características clave del biofiltro propuesto y su viabilidad para el tratamiento de aguas residuales textiles en sistemas de riego agrícola, especialmente en el contexto territorial de Buenaventura

### 6.1. Eficiencia en la remoción de contaminantes en aguas residuales de la industria textil

La industria textil fue una de las principales fuentes de contaminación hídrica a nivel mundial, especialmente por el uso intensivo de agua en sus procesos de producción y por la complejidad química de sus efluentes. Esta situación representó un reto ambiental importante, ya que las aguas residuales generadas contenían niveles altos de contaminantes como nitrógeno, fósforo, colorantes, metales pesados y compuestos orgánicos difíciles de biodegradar. Evaluar la eficiencia de los métodos de remoción de estos contaminantes en las plantas de tratamiento resultó fundamental para garantizar que el agua tratada pudiera ser reutilizada de forma segura en sistemas de riego agrícola.

#### 6.1.1. La problemática de la contaminación hídrica

Los procesos húmedos de la industria como el lavado, blanqueamiento, tinturado, impresión y acabado requirieron grandes volúmenes de agua potable, la cual fue descargada posteriormente con una alta carga contaminante. Según Scholz (2019),

estos efluentes presentaron una combinación compleja de sustancias que afectaron el pH, la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la temperatura y la concentración de metales y sales. Si no fueron tratados adecuadamente, pudieron generar efectos negativos como la eutrofización de cuerpos de agua, la degradación de suelos agrícolas y riesgos para la salud humana.

En el contexto de Buenaventura, donde la presión sobre los recursos hídricos fue alta y la agricultura dependió de fuentes naturales, la contaminación hídrica por parte de industrias representó una amenaza directa a la sostenibilidad territorial.

### **6.1.2. Métodos de remoción de contaminantes**

Los métodos de tratamiento de aguas residuales se agruparon en tres categorías principales:

- Procesos físicos, como la sedimentación y la filtración, que permitieron remover sólidos suspendidos, pero no contaminantes disueltos.
- Procesos químicos, como la coagulación, precipitación y oxidación avanzada, que eliminaron colorantes y metales, aunque generaron residuos secundarios.
- Procesos biológicos, como los biofiltros, que utilizaron microorganismos para degradar compuestos orgánicos y nutrientes como nitrógeno y fósforo. Estos resultaron más sostenibles y adaptables a contextos rurales.

La elección del método dependió de las características del agua residual, los recursos disponibles y los objetivos definidos para el tratamiento. En esta investigación

se analizó el rediseño de un biofiltro como una alternativa eficiente y sostenible, considerando criterios técnicos y ambientales aplicables al contexto de Buenaventura.

### **6.1.3. Parámetros para evaluar la eficiencia**

La eficiencia de los métodos de remoción fue evaluada mediante:

- La reducción porcentual de contaminantes antes y después del tratamiento.
- El cumplimiento de estándares normativos; por ejemplo, la Resolución 631 de 2015 estableció límites de 10 mg/L para nitrógeno total y 2 mg/L para fósforo total.
- El impacto en la calidad del agua para riego, considerando indicadores como salinidad, sodicidad y toxicidad.

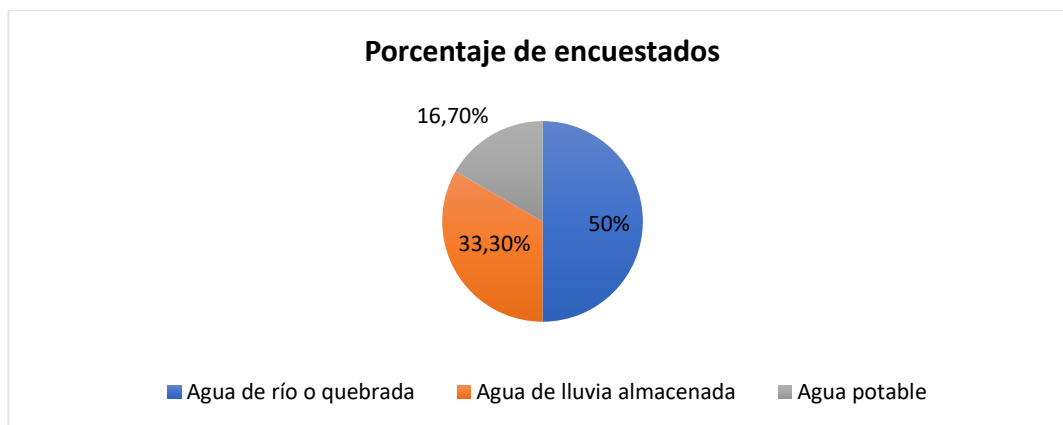
Estudios recientes demostraron que los biofiltros lograron alcanzar eficiencias superiores al 80% en la remoción de nitrógeno y fósforo, especialmente cuando fueron diseñados con materiales como la fibra de coco, la turba o la cáscara de arroz pirolizada (Ghawi, 2018; Ibrahim, 2020).

### **6.1.4. Resultados de la encuesta aplicada**

Como parte del enfoque mixto de la investigación, se aplicaron encuestas a operarios de plantas y agricultores locales. A continuación, se presentan los resultados más relevantes.

## Gráfico 1

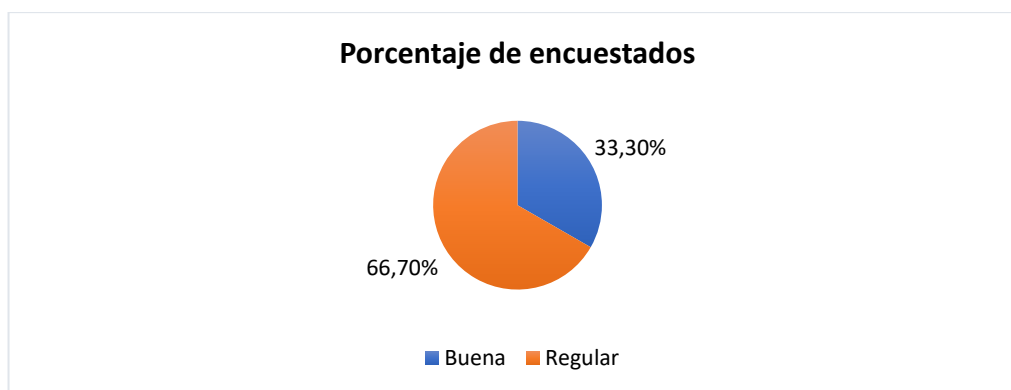
### *Tipo de fuente de agua utilizada para riego*



La totalidad de los encuestados dependió de fuentes naturales o convencionales. Ninguno reportó haber utilizado aguas residuales tratadas, lo cual evidenció una baja adopción de prácticas de reúso hídrico. Esta situación pudo estar relacionada con la ausencia de infraestructura adecuada, el desconocimiento técnico o la desconfianza frente a la calidad del agua que fue tratada.

## Gráfico 2

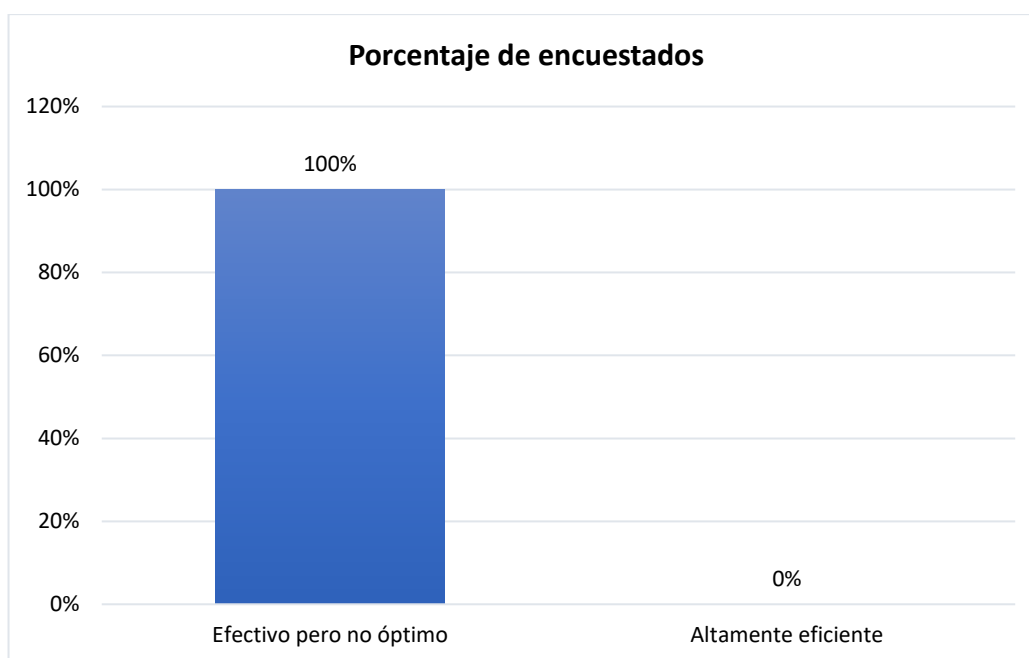
### *Calidad percibida del agua utilizada*



La mayoría de los participantes consideró que la calidad del agua fue “regular”, lo cual sugirió una preocupación por la presencia de contaminantes como salinidad, metales y nutrientes que no fueron controlados adecuadamente. Esta percepción reforzó la necesidad de implementar tecnologías que ayudaran a mejorar los parámetros críticos del agua destinada al riego agrícola.

### Gráfico 3

*Eficiencia percibida del sistema actual de tratamiento*



Aunque los sistemas actuales fueron considerados funcionales, no alcanzaron niveles óptimos de eficiencia. Esto indicó que existió conciencia sobre la necesidad de mejorar los procesos de tratamiento, especialmente en lo relacionado con la remoción de nitrógeno y fósforo.

Los resultados que fueron obtenidos permitieron avanzar en el cumplimiento del objetivo específico 1, el cual buscó conocer qué tan eficientes fueron los métodos de remoción de contaminantes en las plantas de tratamiento de aguas residuales. En particular:

- La ausencia de prácticas de reúso indicó que los métodos actuales no garantizaron una calidad de agua adecuada para riego.
- La percepción de calidad regular reforzó la necesidad de implementar tecnologías que ayudaran a mejorar parámetros críticos como la salinidad, la sodicidad y la toxicidad.
- La revisión documental y los estudios citados demostraron que los biofiltros, cuando fueron diseñados con materiales adecuados y condiciones óptimas de operación, lograron alcanzar eficiencias superiores al 80% en la remoción de fósforo y nitrógeno.

#### **6.1.5. Recomendaciones técnicas**

A partir del análisis, se proponen las siguientes recomendaciones:

- I. **Implementar biofiltros rediseñados** con materiales agroindustriales locales, que permitan reducir costos y aumentar la eficiencia.
- II. **Monitorear parámetros críticos** como DQO, DBO,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  antes y después del tratamiento, para validar la eficiencia.

- III. **Capacitar a operarios y agricultores** en el uso seguro de aguas tratadas, incluyendo criterios de calidad y normativas vigentes.
- IV. **Promover el reúso de aguas residuales tratadas** en zonas agrícolas, como estrategia de sostenibilidad hídrica y adaptación al cambio climático.

La eficiencia en la remoción de contaminantes en aguas residuales fue un componente esencial para garantizar su reúso seguro en sistemas de riego. Los métodos tradicionales presentaron limitaciones, mientras que los biofiltros ofrecieron una alternativa viable, sostenible y adaptable al contexto local. Los resultados obtenidos en la encuesta evidenciaron una brecha entre la disponibilidad de tecnologías y su aplicación práctica, lo cual reforzó la necesidad de rediseñar soluciones que respondieran a las condiciones reales del territorio.

Este apartado aportó evidencia técnica y social que sustentó la necesidad de avanzar hacia sistemas de tratamiento más eficientes, como parte de una estrategia integral de gestión hídrica en zonas vulnerables como Buenaventura.

## **6.2. Características clave de los biofiltros para la remoción de nutrientes**

La remoción de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo en aguas residuales industriales fue una necesidad urgente para prevenir la eutrofización de cuerpos de agua y garantizar la calidad del agua destinada a usos agrícolas. En el caso de la industria textil, estos nutrientes estuvieron presentes en concentraciones elevadas, lo que representó un riesgo ambiental si no fueron controlados adecuadamente. Los biofiltros,

como sistemas de tratamiento biológico, ofrecieron una alternativa eficiente, sostenible y adaptable para la eliminación de estos contaminantes.

Este capítulo se enfocó en identificar las características técnicas que influyeron directamente en la eficiencia de los biofiltros, con base en estudios recientes, revisión documental y resultados de encuestas que fueron aplicadas a actores del sector agrícola.

### **6.2.1. Importancia de la remoción de nitrógeno y fósforo**

El nitrógeno y el fósforo fueron nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, pero su exceso en cuerpos de agua pudo provocar desequilibrios ecológicos. La eutrofización, causada por la acumulación de estos nutrientes, generó proliferación de algas, disminución del oxígeno disuelto y afectación de la biodiversidad acuática. Además, cuando estas aguas fueron utilizadas en riego sin tratamiento adecuado, alteraron la estructura del suelo, afectaron la salud de los cultivos y generaron acumulación de sales y metales.

Según Hanandeh (2018), la remoción de fósforo mediante biofiltros que emplearon biochar y arena demostró ser efectiva en plantas de tratamiento, mientras que Rodziejewicz (2019) destacó la importancia de mantener una relación adecuada entre carbono y nitrógeno para lograr una desnitrificación eficiente.

### **6.2.2. Características técnicas de los biofiltros**

El diseño y operación de un biofiltro influye directamente en su capacidad para remover nutrientes. Las características más relevantes incluyen:

- Tipo de material filtrante: materiales como fibra de coco, turba, cáscara de arroz pirolizada y biochar tienen alta capacidad de adsorción y soporte microbiano.
- Tamaño de partícula: afecta la porosidad y el flujo del agua; partículas más pequeñas aumentan la superficie de contacto, pero pueden obstruir el sistema.
- pH y temperatura del agua: influyen en la actividad microbiana; los biofiltros funcionan mejor en rangos de pH neutro y temperaturas moderadas.
- Tiempo de contacto: cuanto mayor sea el tiempo de retención del agua en el biofiltro, mayor será la eficiencia en la remoción de contaminantes.

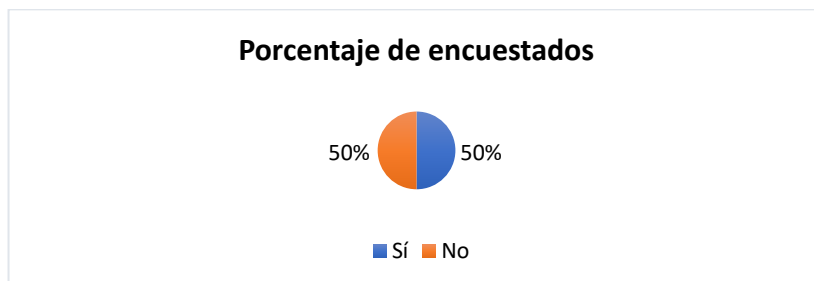
Estos factores deben ser considerados en el rediseño del biofiltro propuesto, adaptándolo a las condiciones reales de las aguas residuales y al contexto agrícola de Buenaventura.

### **2.3. Resultados de la encuesta: uso y percepción del agua tratada**

Para complementar el análisis técnico, se aplicó una encuesta a agricultores locales. A continuación, se presentan los resultados más relevantes.

#### Gráfico 4

##### Uso de agua tratada para riego



La mitad de los encuestados ha utilizado agua tratada para riego, lo que indica una apertura parcial hacia el reúso hídrico. Sin embargo, el otro 50% no lo ha hecho, principalmente por falta de información técnica o desconfianza en la calidad del agua.

#### Tabla 9

##### Sistemas de tratamiento utilizados

Sistema utilizado	Frecuencia mencionada
Filtros de arena y grava	Alta
Otros sistemas	No especificados

Los filtros de arena y grava son los sistemas más comunes entre quienes reutilizan agua. Aunque son efectivos para remover partículas, no garantizan la eliminación de nutrientes como nitrógeno y fósforo, lo que limita su aplicabilidad en contextos agrícolas exigentes.

### 6.2.3. Beneficios del uso de agua tratada en riego

Los encuestados que han utilizado agua tratada para riego identifican varios beneficios, que se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 10**

*Beneficios percibidos del uso de agua tratada*

<b>Beneficio identificado</b>	<b>Frecuencia mencionada</b>
<b>Reducción del consumo de agua potable</b>	Alta
<b>Mejora de la calidad del suelo</b>	Media
<b>Reducción del riesgo de contaminación</b>	Media

El uso de agua tratada permite reducir la presión sobre fuentes de agua potable, mejorar la fertilidad del suelo gracias a los nutrientes presentes en el agua y disminuir el riesgo de contaminación si el tratamiento es adecuado. Estos beneficios refuerzan la necesidad de implementar biofiltros eficientes que garanticen la calidad del agua para riego.

Los resultados obtenidos permiten avanzar en el cumplimiento del objetivo específico 2, que busca establecer las características críticas de los biofiltros para la remoción de contaminantes. En particular:

- Se identifican los materiales filtrantes más utilizados y recomendados en la literatura científica.
- Se reconoce que el diseño del biofiltro debe considerar variables como tamaño de partícula, pH, temperatura y tiempo de contacto.
- Se evidencia que los sistemas actuales, como los filtros de arena y grava, no son suficientes para garantizar la eliminación de nitrógeno y fósforo.
- Se valida que existe disposición al uso de agua tratada, siempre que se garantice su calidad.

#### **6.2.4. Recomendaciones técnicas**

A partir del análisis, se proponen las siguientes recomendaciones:

- I. Diseñar biofiltros con materiales de alta capacidad de adsorción, como cáscara de arroz pirolizada, turba y fibra de coco.
- II. Ajustar el tamaño de partícula para lograr un equilibrio entre porosidad y eficiencia de contacto.
- III. Controlar el pH y la temperatura del agua tratada, manteniéndolos en rangos óptimos para la actividad microbiana.
- IV. Aumentar el tiempo de retención del agua en el biofiltro, mediante diseño de flujo lento o compartimentado.
- V. Capacitar a los agricultores en el uso seguro de agua tratada, incluyendo criterios de calidad y normativas vigentes.

Los biofiltros representan una tecnología clave para la remoción de nutrientes en aguas residuales, especialmente en contextos agrícolas donde el reúso del agua es una necesidad. La eficiencia de estos sistemas depende de múltiples factores técnicos que deben ser considerados en su diseño y operación. Los resultados de la encuesta confirman que existe interés en el uso de agua tratada, pero también barreras relacionadas con la confianza y el conocimiento técnico.

### **6.3. Impacto ambiental y aplicabilidad del biofiltro en sistemas de riego**

La implementación de biofiltros en el tratamiento de aguas residuales representa una estrategia ambientalmente responsable y técnicamente viable para reducir la carga de contaminantes y promover el reúso seguro del agua en sistemas de riego. Este apartado evaluó el impacto ambiental de los biofiltros y analizó su aplicabilidad en contextos agrícolas, considerando tanto los beneficios ecológicos como las condiciones técnicas y sociales que influyeron en su adopción.

#### ***6.3.1. Reducción de contaminantes y mejora de la calidad del agua***

Los biofiltros operan mediante procesos biológicos y físicos que permiten la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, así como de otros compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en las aguas residuales. Esta remoción contribuye directamente a la prevención de la eutrofización, la protección de los cuerpos de agua y la mejora de la calidad del agua para riego.

Según Ghawi (2018), los biofiltros diseñados con materiales como turba, fibra de coco y cáscara de arroz pirolizada pueden alcanzar eficiencias superiores al 80% en la remoción de nutrientes, siempre que se mantengan condiciones óptimas de pH, temperatura y tiempo de contacto.

### 6.3.2. Ventajas ambientales y agrícolas del biofiltro

Las principales ventajas del uso de biofiltros en sistemas de riego se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 11**

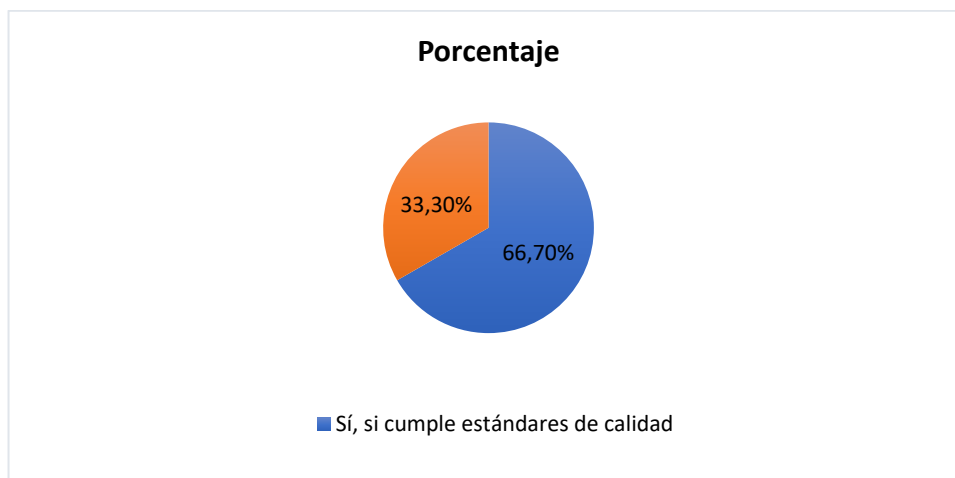
*Ventajas del biofiltro en sistemas de riego*

<b>Ventaja</b>	<b>Descripción breve</b>
<b>Reducción de contaminantes</b>	Elimina nitrógeno, fósforo y compuestos orgánicos, mejorando la calidad del agua.
<b>Sostenibilidad</b>	Utiliza procesos naturales, con bajo consumo energético y mínima generación de residuos.
<b>Reutilización del agua</b>	Permite el reúso seguro del agua tratada en cultivos, reduciendo la demanda de agua potable.
<b>Mejora del suelo</b>	El agua tratada puede aportar nutrientes que favorecen la fertilidad del suelo.
<b>Reducción de costos</b>	Disminuye el uso de productos químicos y energía en el tratamiento convencional.

### 6.3.3. Resultados de la encuesta: disposición al uso de agua residual tratada

#### Gráfico 5

*Disposición al uso de agua residual tratada*



La mayoría de los encuestados estuvo dispuesta a utilizar agua residual tratada en el riego agrícola, siempre que se garantizara su calidad. Esto evidenció una actitud favorable hacia tecnologías sostenibles, pero también una necesidad de generar confianza en los procesos y en el cumplimiento de la normativa vigente.

Los resultados obtenidos tienen implicaciones importantes para la adopción de biofiltros en el sector agrícola:

- **Garantía de calidad:** Es fundamental que el agua tratada cumpla con los parámetros establecidos por la normativa ambiental, como los límites de nitrógeno y fósforo definidos en la Resolución 631 de 2015.

- **Transparencia y comunicación:** Los usuarios requieren información clara sobre los procesos de tratamiento, los materiales utilizados y las certificaciones ambientales.
- **Cumplimiento normativo:** La implementación de biofiltros debe alinearse con las regulaciones locales e internacionales sobre reúso de aguas residuales.

### ***Tecnologías de tratamiento utilizadas actualmente***

**Tabla 12**

*Tecnologías de tratamiento utilizadas*

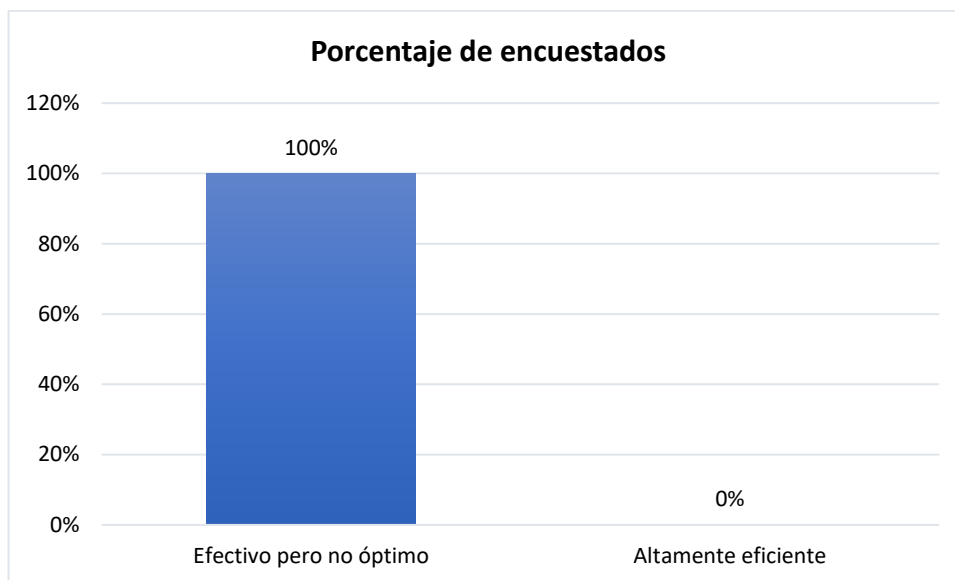
<b>Tipo de tecnología utilizada</b>	<b>Frecuencia mencionada</b>
<b>Físicas (filtración, sedimentación)</b>	Alta
<b>Químicas (coagulación, precipitación)</b>	Alta
<b>Biológicas (biofiltros)</b>	Baja

El predominio de tecnologías físicas y químicas en el tratamiento actual refleja una oportunidad para incorporar soluciones biológicas como los biofiltros, que ofrecen ventajas en eficiencia, sostenibilidad y adaptabilidad.

## ***Percepción sobre la eficiencia de los sistemas actuales***

### **Gráfico 6**

*Eficiencia percibida del sistema actual*



Todos los encuestados consideraron que sus sistemas actuales son funcionales, pero no altamente eficientes. Esto sugiere una conciencia clara sobre la necesidad de mejorar los procesos de tratamiento, especialmente en lo relacionado con la remoción de nutrientes.

### ***Ventajas de los biofiltros rediseñados***

Los biofiltros rediseñados, adaptados a las condiciones locales y con materiales innovadores, pueden ofrecer beneficios adicionales:

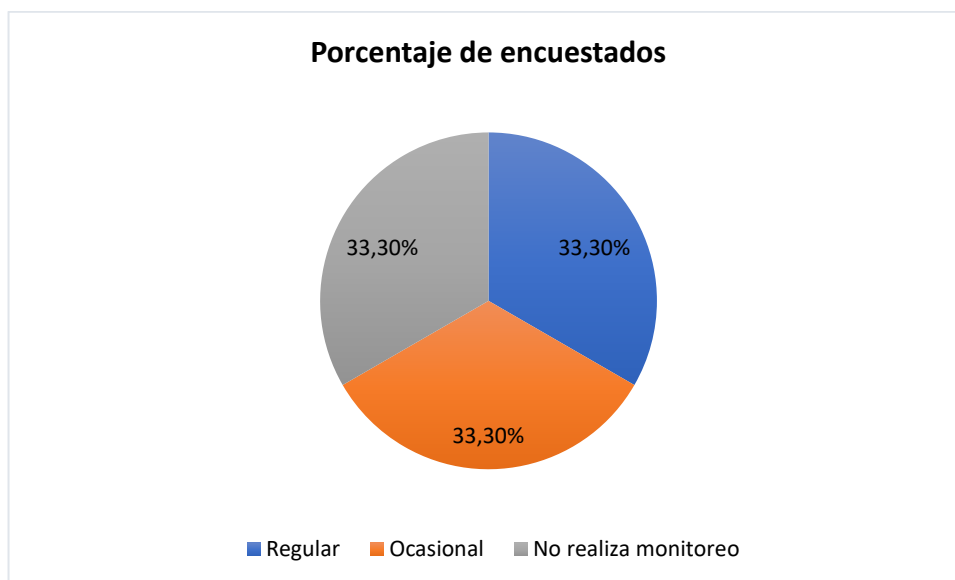
- Mejora de la eficiencia: Optimización del diseño para aumentar la remoción de contaminantes.
- Reducción de costos: Menor uso de energía y productos químicos.
- Sostenibilidad: Uso de materiales reciclables y procesos naturales.

Estos beneficios refuerzan la viabilidad de los biofiltros como solución para el tratamiento de aguas residuales en contextos agrícolas.

### ***Monitoreo de la calidad del agua***

#### **Gráfico 7**

*Frecuencia de monitoreo de calidad del agua*



La falta de estandarización en el monitoreo de la calidad del agua es un aspecto crítico. La capacitación técnica y la implementación de protocolos de seguimiento son necesarios para garantizar la seguridad del recurso hídrico.

Este apartado contribuyó al cumplimiento del objetivo específico 3, el cual buscó describir el impacto ambiental de los biofiltros y su potencial de aplicación en sistemas de riego. En particular:

- Se identificaron los efectos positivos sobre la calidad del agua tratada, especialmente en la reducción de nutrientes como nitrógeno y fósforo.
- Se analizaron las condiciones técnicas que favorecieron la eficiencia del sistema, incluyendo el tipo de material filtrante, el tiempo de retención y la relación carbono-nitrógeno.
- Se reconoció que el uso de biofiltros en contextos rurales como Buenaventura ofreció ventajas en términos de sostenibilidad, bajo costo operativo y adaptabilidad a infraestructuras locales.
- Se evidenció una disposición social favorable hacia el reúso agrícola, siempre que se garantizara la calidad del agua y el cumplimiento normativo.

Los biofiltros representan una herramienta efectiva para reducir la contaminación del agua y mejorar su calidad para riego. Su aplicabilidad depende de factores técnicos, sociales y normativos, pero ofrece ventajas significativas en términos de sostenibilidad, eficiencia y conservación de recursos. Los resultados de la encuesta confirmaron que existe una actitud favorable hacia el uso de agua residual tratada, siempre que se garantice su calidad y se cumplan las regulaciones ambientales.

## 7. Discusión

El análisis de los resultados permitió comprender cómo el rediseño de un biofiltro se convirtió en una alternativa teórica para enfrentar la problemática de las aguas residuales en Buenaventura. Aunque la referencia más común de aplicación de biofiltros se encontró en la industria textil, en este territorio la presión sobre el recurso hídrico provino de sectores como el portuario, el hotelero, el industrial diverso y el agrícola. Todos ellos generaron descargas que afectaron la calidad del agua y limitaron su uso en riego, lo cual obligó a pensar en soluciones sostenibles que pudieran adaptarse a las condiciones locales.

Los métodos convencionales de tratamiento, como la cloración o la sedimentación, mostraron limitaciones importantes. No lograron reducir de manera suficiente las cargas de fósforo y nitrógeno, y tampoco garantizaron la eliminación de otros contaminantes críticos como metales pesados o compuestos orgánicos persistentes. En Buenaventura, donde la agricultura dependió de ríos y quebradas, esta situación se tradujo en suelos con problemas de salinidad y sodicidad que afectaron la productividad. El biofiltro, al integrar materiales de bajo costo como la fibra de coco y la cáscara de arroz, ofreció una alternativa más sencilla y económica, aunque se mantuvo en un plano teórico porque no se realizaron pruebas experimentales en el territorio.

La percepción social recogida en encuestas mostró una disposición favorable hacia el uso de aguas tratadas, siempre que se cumplieran estándares mínimos de calidad. Los actores locales vinculados con agricultura, hotelería y logística portuaria

reconocieron la necesidad de nuevas tecnologías, pero también expresaron dudas sobre la confiabilidad del agua tratada. Esto indicó que la aceptación comunitaria no fue un obstáculo insalvable, aunque sí requirió procesos de sensibilización y capacitación. La confianza dependió de la transparencia en los procesos de monitoreo y de la capacidad institucional para garantizar que los parámetros de calidad se cumplieran de manera constante.

El impacto ambiental proyectado representó otro aspecto relevante. La reutilización de aguas residuales tratadas en riego agrícola pudo disminuir la presión sobre fuentes naturales y reducir la carga contaminante que llegaba a los cuerpos de agua. En Buenaventura, donde las descargas portuarias y hoteleras fueron constantes, esta estrategia pudo evitar procesos de eutrofización y deterioro de ecosistemas acuáticos. Sin embargo, se reconoció que este beneficio se planteó como un escenario posible y no como un resultado inmediato, dado que el proyecto se desarrolló en un marco teórico.

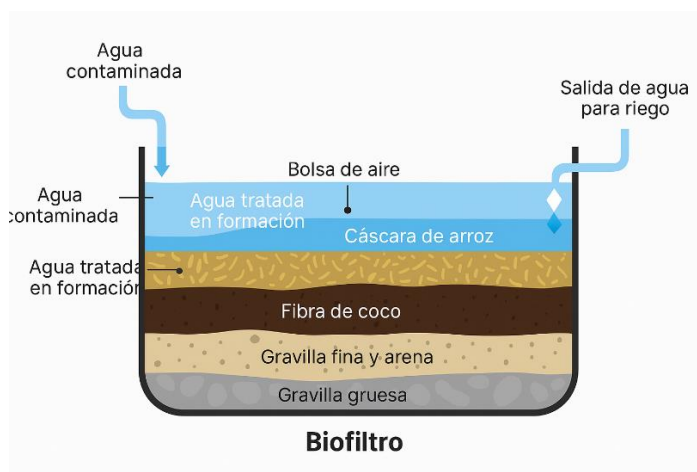
La relación con la normativa nacional y local reforzó la pertinencia de la propuesta. Normas como la Ley 373 de 1997 sobre uso eficiente y ahorro del agua y la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente establecieron parámetros claros para la reutilización de aguas residuales en agricultura. Esto significó que, aunque el proyecto se planteó en un plano académico, existió un respaldo normativo que permitiría su aplicación futura. La articulación con la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y con los planes de ordenamiento territorial de Buenaventura fue

fundamental para garantizar que cualquier iniciativa se ajustara a las regulaciones vigentes.

La viabilidad económica también mereció atención. Los tratamientos convencionales requirieron inversiones altas en infraestructura y operación, lo cual resultó poco realista en territorios con limitaciones financieras. El biofiltro, en cambio, se presentó como una alternativa de bajo costo, que aprovechó materiales locales y redujo la dependencia de insumos externos. Esta característica lo convirtió en una opción atractiva para comunidades rurales y sectores productivos que buscaron soluciones prácticas y sostenibles. No obstante, la eficiencia del biofiltro dependió de factores como el tiempo de contacto, el pH y la temperatura del agua, variables que debieron ser controladas cuidadosamente para garantizar resultados adecuados.

## Figura 2

### *Biofiltro propuesto para tratamiento de aguas residuales en Buenaventura*



*Nota.* Diseño generado por IA con fines académicos. *Fuente:* Imagen elaborada por Copilot (Microsoft), 2025.

La integración de los sectores portuario, hotelero e industrial en el análisis permitió ampliar el alcance de la propuesta. Aunque la referencia principal de aplicación de biofiltros se encontró en la industria textil, en Buenaventura la problemática hídrica estuvo más relacionada con descargas de aguas servidas, residuos de mantenimiento portuario y vertimientos industriales diversos. Esto significó que el biofiltro no solo representó una solución para la agricultura, sino también una opción para mejorar la gestión ambiental de otros sectores estratégicos. En un escenario futuro, la implementación de biofiltros podría haber contribuido a la competitividad regional, al posicionar a Buenaventura como un territorio que integrara sostenibilidad en su cadena productiva.

Posteriormente, fue necesario reconocer las limitaciones del proyecto. Al tratarse de una propuesta teórica, no se contó con datos experimentales que permitieran validar la eficiencia del biofiltro en condiciones reales de Buenaventura. Esto implicó que los resultados se interpretaran como escenarios de aplicación futura y no como evidencias concluyentes. Sin embargo, esta limitación no redujo el valor del trabajo, pues su aporte principal consistió en abrir un camino de reflexión y diseño que pudo ser retomado por investigaciones posteriores. El biofiltro rediseñado representó una alternativa viable y sostenible, pero su implementación requirió estudios adicionales, articulación institucional y participación comunitaria para garantizar que los beneficios proyectados se materializaran en la práctica.

## 8. Conclusión

La investigación permitió establecer que el rediseño de un biofiltro constituye una alternativa con capacidad de responder a las necesidades de tratamiento de aguas residuales en Buenaventura. La propuesta se fundamentó en la integración de materiales locales como fibra de coco y cáscara de arroz, lo cual no solo reduce costos, sino que también fortalece la economía regional y la participación comunitaria. Este planteamiento se inscribió en un escenario académico que buscó demostrar la pertinencia de tecnologías sostenibles frente a la presión hídrica generada por sectores portuarios, hoteleros, industriales y agrícolas, todos ellos vinculados de manera directa con la calidad del agua disponible para riego y otros usos productivos.

El análisis de la literatura y de las experiencias previas evidenció que los biofiltros han sido aplicados principalmente en la industria textil, donde se requiere la reducción de cargas de fósforo y nitrógeno. Sin embargo, la revisión permitió proyectar su aplicabilidad en otros sectores, especialmente en territorios como Buenaventura, donde las descargas provienen de aguas servidas, residuos de mantenimiento portuario y vertimientos industriales diversos. Esta ampliación del alcance mostró que el biofiltro puede convertirse en una herramienta versátil, capaz de adaptarse a diferentes escenarios productivos y ambientales, siempre bajo un marco de referencia teórico que abre posibilidades de investigación futura.

La incorporación de la percepción social aportó un elemento clave para comprender la práctica de los actores locales frente al uso de aguas tratadas. Los

resultados señalaron que existe una aceptación favorable, aunque acompañada de dudas sobre la confiabilidad del agua reutilizada. Este hallazgo indicó que la implementación de tecnologías sostenibles requiere procesos de sensibilización y capacitación, además de mecanismos de monitoreo que garanticen transparencia. La confianza comunitaria se reconoció como un factor determinante para que cualquier propuesta pueda trascender del plano académico hacia escenarios de aplicación práctica.

El impacto ambiental proyectado se destacó como uno de los beneficios más relevantes. La reutilización de aguas residuales tratadas en riego agrícola se planteó como una estrategia para disminuir la presión sobre fuentes naturales y reducir la carga contaminante que llega a las fuentes de agua. En el caso de Buenaventura, donde las descargas portuarias y hoteleras son constantes, esta alternativa podría evitar procesos de eutrofización y deterioro de ecosistemas acuáticos. No obstante, se recalcó que este beneficio se mantiene en un plano hipotético, ya que el proyecto no contó con pruebas experimentales que validaran la eficiencia del biofiltro en condiciones reales.

La revisión normativa reforzó la pertinencia de la propuesta, al mostrar que existen disposiciones nacionales y locales que respaldan la reutilización de aguas residuales en agricultura. Normas como la Ley 373 de 1997 y la Resolución 1256 de 2021 establecieron parámetros claros que permiten visualizar escenarios de aplicación futura. La articulación con la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y con los planes de ordenamiento territorial de Buenaventura se reconoció como fundamental para

garantizar que cualquier iniciativa se ajuste a las regulaciones vigentes y pueda ser considerada viable en términos legales.

La reflexión sobre la viabilidad económica permitió concluir que el biofiltro representa una alternativa de bajo costo frente a los tratamientos convencionales, que requieren inversiones altas en infraestructura y operación. La utilización de materiales locales y la simplicidad operativa lo convierten en una opción atractiva para comunidades rurales y sectores productivos que buscan soluciones prácticas y sostenibles. Sin embargo, se reconoció que su eficiencia depende de variables como el tiempo de contacto, el pH y la temperatura del agua, factores que deben ser controlados cuidadosamente en investigaciones posteriores. En recapitulación, el proyecto abrió un camino de análisis y diseño que, aunque teórico, aporta elementos valiosos para futuras iniciativas orientadas a la sostenibilidad hídrica y a la competitividad regional

## Referencias

- A. Rissanen, A. O. (s.f.). "Methylophilaceae and Hyphomicrobium as target taxonomic groups in monitoring the function of methanol-fed denitrification biofilters in municipal wastewater treatment plants.", En J. I. Biotechnol. 2017.
- agua, I. d. (s.f.). *Aguas Residuales: Todo lo que Necesitas Saber sobre este Tipo de Agua Contaminada*. Obtenido de *Aguas Residuales: Todo lo que Necesitas Saber sobre este Tipo de Agua Contaminada*: [https://institutodelagua.es/aguas-residuales/que-son-aguas-residualesaguas-residuales/#google\\_vignetteV](https://institutodelagua.es/aguas-residuales/que-son-aguas-residualesaguas-residuales/#google_vignetteV)
- Aguilarm, T. P. (2016). "La calidad del agua para el riego: Principales indicadores de medida y procesos que la impactan. *Agroecosistemas*, vol. 4, pp. 47–61.
- al., K. K. (2019). "On-farm wastewater treatment using biochar from local agroresidues reduces pathogens from irrigation water for safer food production in developing countries," . En v. 6. *Sci. Total Environ.*.
- Ambiente, P. d. (1989). *Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación*. Obtenido de *Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación.:* <http://www.basel.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/1275/Default.asp>

C., B. W. (s.f.). "Classification and Use of Irrigation Waters UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE.". En B. W. C.

C., J. C. (1986). "*Calidad agronómica de las aguas de riego.*". Madrid.

C. Balmaseda, D. P. (2006). "*Compendio de suelo.*". La Habana.

C. R. Holkar, A. J. (2016). "A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches," *Journal of Environmental Management*, . vol. 182. *Academic Press*,, pp. 351–366.

C., B. W. (s.f.). "Classification and Use of Irrigation Waters UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE.".

Congreso de la Republica de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993*. Obtenido de Función Pública:

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>

Congreso de la República de Colombia. (1997). *Ley 373 de 1997*. Bogotá: Diario Oficial.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2020). *Lineamientos de gestión ambiental en el uso del recurso hídrico*. Cali: CVC.

Cueva Luza, T., Jara Córdova, O., Arias Gonzáles, J., Flores Limo, F., & Balmaceda Flores, C. (2023). *Métodos mixtos de investigación para principiantes*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C. Obtenido de <https://doi.org/10.35622/inudi.b.106>

Demir, H. A. (2013). "Impacts of seawater intrusion on soil salinity and alkalinity in Bafra Plain, Turkey," . En *Environ. Monit. Assess.*.. vol. 185, no. 2.

Depuradoras.es. (2015). *La bioaumentación para el tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de *La bioaumentación para el tratamiento de aguas residuales.*: [https://www.depuradoras.es/blog/249\\_la-bioaumentacion-para-el-tratamiento-de-agua](https://www.depuradoras.es/blog/249_la-bioaumentacion-para-el-tratamiento-de-agua)

Estado, A. E. (2000). *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524v>

et., V. (2015). "Nitrite accumulation during denitrification depends on the carbon quality and quantity in wastewater treatment with biofilters,". En *E. S. Res.*

Europea, P. E. (2020). *Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, sobre los requisitos mínimos para la reutilización del agua*. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0741>

Ghawi, A. H. (2018). "Design of biofilter odor removal system for conventional wastewater treatment plant2. En *J. E. Eng.*..

González-Trujillo, J. R., & Rodríguez-González, M. T. (2017). *La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de evaluación. Agricultura, Sociedad y Desarrollo*.

Obtenido de Sociedad y Desarrollo:

<https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/75>

greenblog. (2021). *¿Qué es la contaminación hídrica?* Obtenido de *¿Qué es la contaminación hídrica?:* <https://ecolec.es/greenblog/actualidad/que-es-la-contaminacion-hidrica/>

Group, L. E. (s.f.). *¿Que es sostenibilidad?* Obtenido de <https://www.esginnova.com/sostenibilidad/que-es-la-sostenibilidad/>

Gutiérrez-Miceli, F. A.-B.-A. (2011). *Vermifiltración para el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas. Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Obtenido de *Vermifiltración para el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas. Revista Internacional de Contaminación Ambiental*,: <https://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1448/TC-1107.1.pdf>

Hanandeh, M. G. (2018). "Phosphorus removal efficiency from wastewater under different loading conditions using sand biofilters augmented with biochar,". En *I. J. Technol.* 927–934.

Hernández-Sampieri, R., Fernández , C., & Baptista, P. (2018). *Metodología de la investigación* (6 ed.). McGraw-Hill.

I. Omri, F. A. (2013). "Performance study of biofilter developed to treat H<sub>2</sub>S from wastewater odour,". En *v. 2. Saudi J. Biol. Sci.*.

- J. Forss, M. V. (2017). "Microbial Biotreatment of Actual Textile Wastewater in a Continuous Sequential Rice Husk Biofilter and the Microbial Community Involved.,". En v. 1. PLoS One.
- J. Rodziejewicz, K. O. (2019). "Effectiveness of nitrification and denitrification processes in biofilters treating waste water from de-icing airport runways," Water (Switzerland). En W. (Switzerland).
- K. Henryk, C. J. (2016). "Peat and coconut fiber as biofilters for chromium adsorption from contaminated wastewaters,". En v. 2. Environ. Sci. Pollut. Res..
- Kuhad, R. C. (2004). *evelopments in microbial methods for the treatment of dye effluents. Advances in Applied Microbiology*. Obtenido de evelopments in microbial methods for the treatment of dye effluents. *Advances in Applied Microbiology*: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>
- L.A.Richards. (1954). "Diagnosis and improvement of saline and alkali soils." pp. 60–160, 1954. pp. 60–160.
- Moksa. (2021). *Biofiltros: Soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de Biofiltros: Soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales: <https://moksa.com.co/biofiltros/>
- OECD. (2012). *OECD Enironmental Outlook to 2050 the consequences of inaction key facts and figures*. Obtenido de OECD Enironmental Outlook to 2050: <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling->

outlooks/%0Aoeceenvironmentaloutlookto2050theconsequencesofinaction-%20keyfactsandfigures.htm.

Qayyum, A. K. (2007). "Decolorization and removal of textile and non-textile dyes from polluted wastewater and dyeing effluent by using potato (*Solanum tuberosum*) soluble and immobilized polyphenol oxidase," *Bioresour. Technol.* En A. K. Qayyum.

R. Singh, K. S. (2019). "Vermifiltration as a sustainable natural treatment technology for the treatment and reuse of wastewater: A review," *J. Environ. Manage.*, vol. 247. En p. June.

Reddy, K. R. (2013). "Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands." *Water Science and Technology*, 2442-2452.

S. Ibrahim, M. A.-L.-G. (2020). "Design of a bioaugmented multistage biofilter for accelerated municipal wastewater treatment and deactivation of pathogenic microorganisms,". En v. 7. *Sci. Total Environ.*

Saxena, M. L. (2015). "Water Quality of Fox Sagar Lake, Hyderabad, Telangana State, India, Its Suitability for Irrigation Purpose,". En v. 4. *Int. J. Adv. Res. Sci. Technol.*  
*Int. J. Adv. Res. Sci. Technol.*

Scholz, D. A. (2019). "Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review," *Int. J. Environ. Sci. Technol.* vol. 16, no. 2, pp. 1193–1226, doi: 10.1007/s13762-018-2130-z.

Scholz, M. (2019). *Wetland systems to control urban runoff*. Elsevier.

Sostenible, M. d. (2015). Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-631-de-2015.pdf>

Sostenible, M. d. (2021). Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>

SPAG. (s.f.). *Qué son los residuos agrícolas y cómo gestionarlos*. Obtenido de Qué son los residuos agrícolas y cómo gestionarlos: <https://www.grupospag.com/que-son-los-residuos-agricolas-y-como-gestionarlos/>

Unidos, A. d. (1972). *Clean Water Act*. Obtenido de Clean Water Act: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act>

Wang, X. L. (s.f.). "Biofiltration as an alternative for wastewater treatment: Recent advances and future perspectives." . *Chemical Engineering Journal*, 123-145.

Wu, S. W. (2022). "Treatment of industrial wastewater using constructed wetlands: Challenges, operational strategies, and future perspectives.". *Environmental Pollution*, 119646.

Zhou, Y. W. (2019). "Advances in phosphorus removal and recovery technologies: A review." . *Water Research*, 46-5.

## Anexos

### Encuesta 1: Para operarios e ingenieros de la industria textil

**Objetivo:** Conocer qué tan eficientes son los métodos de remoción de contaminantes en las plantas de tratamiento de aguas residuales para disminuir la concentración de fósforo y nitrógeno contenidos en los desechos hídricos de la industria textil.

#### Datos de contacto

1. ¿Qué tecnologías de tratamiento de aguas residuales se utilizan actualmente en la empresa para remover contaminantes? (Marque una o más opciones).
  - Físicas (sedimentación, filtración)
  - Químicas (coagulación, precipitación)
  - Biológicas (biofiltros)
  - Otras (especifique): \_\_\_\_\_
2. ¿Qué tan efectiva considera que es su sistema actual para reducir las altas concentraciones de remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales?
  - Muy efectiva
  - Efectiva
  - Poco efectiva
  - Nada efectiva
  - No estoy seguro
3. ¿Se han implementado biofiltros en la planta de producción para tratar las aguas residuales?
  - Sí
  - No

4. Según su experiencia, ¿qué características del biofiltro considera más importantes para la remoción de nitrógeno y fósforo?

- Tipo de material filtrante
- Presencia de oxígeno disuelto
- Control de pH
- Mantenimiento regular

5. En su opinión, ¿qué tan viable es el reúso de las aguas residuales tratadas en la agricultura?

- Muy viable
- Viable
- Poco viable
- No viable
- No estoy seguro

### Encuesta 2: Para agricultores que usan agua residual tratada

**Objetivo:** Entender como es percibida la calidad del agua que es utilizada en sistema de riego.

1. ¿Qué tipo de fuente de agua utiliza principalmente para el riego del cultivo?

- Agua de río o quebrada
- Agua de lluvia almacenada
- Agua potable
- Agua residual tratada
- Otra: \_\_\_\_\_

2. ¿Cómo calificaría la calidad del agua que utiliza para el riego del cultivo?

- Buena
- Regular
- Mala
- No lo sé

3. ¿Ha utilizado alguna vez agua reutilizada o tratada para el riego del cultivo?

- Si
- No

4. Si respondió "Sí" en la pregunta anterior, indique cómo obtuvo esa agua reutilizada:

- De una planta de tratamiento cercana
- Sistema de tratamiento propio

5. ¿Realiza algún tipo de análisis o monitoreo de la calidad del agua que usa para riego?

- Si, de manera regular
- Solo ocasionalmente
- No
- No sabe cómo hacerlo

6. ¿Estaría dispuesto a usar agua reutilizada tratada si cumple con los estándares de calidad para riego agrícola?

- Si
- No
- Dependería del tipo de tratamiento y garantías