



**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE BIOFILTRO CON PLANTAS
FITORREMIADORAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES
DOMÉSTICAS EN VIVIENDA SIN CONEXIÓN AL SISTEMA DE
ALCANTARILLADO**

**GLENDYS VANESSA GAMEZ BARRIOS
KAREN MARCELA NARVÁEZ MERCADO**

Corporación Universitaria Reformada

Facultad de Ingeniería Ambiental

Barranquilla-Atlántico

2025

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE BIOFILTRO CON PLANTAS
FITORREMEDIASDORAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES
DOMÉSTICAS EN VIVIENDA SIN CONEXIÓN AL SISTEMA DE
ALCANTARILLADO**

**GLENDYS VANESSA GAMEZ BARRIOS
KAREN MARCELA NARVÁEZ MERCADO**

Investigación presentada como requisito para optar por el título de **Ingeniero Ambiental**

Tutor:

Duvan Salomon Cervantes Fuentes

Cotutora:

Sofía Brisseth De Jesús Sulbaran Siado

Corporación Universitaria Reformada

Departamento de Ingeniería

Barranquilla – Atlántico

2025

AGRADECIMIENTOS

“No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia.” Isaías 41:10

Primero que todo, queremos expresar nuestra más profunda gratitud a Dios, por brindarnos la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar con éxito esta etapa tan significativa en nuestras vidas. Su guía constante y su bendición nos acompañaron en cada desafío, recordándonos que con fe y dedicación todo es posible.

A nuestras familias, pilares fundamentales de este logro, les agradecemos infinitamente por su amor incondicional, apoyo moral, comprensión y motivación en cada paso del camino. Gracias por ser nuestro ejemplo, por impulsarnos a seguir adelante aún en los momentos de mayor dificultad, y por celebrar con nosotras cada pequeño avance como un gran triunfo.

Queremos expresar un especial agradecimiento a nuestro tutor, el Ing. Duván Cervantes, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de este proyecto. Su acompañamiento fue esencial para el fortalecimiento de nuestras habilidades investigativas y profesionales, y por guiarnos con sabiduría y dedicación en cada etapa del proceso.

De igual manera, extendemos nuestro reconocimiento a todos los docentes del programa de Ingeniería Ambiental, quienes con su conocimiento, exigencia y ejemplo profesional contribuyeron de manera significativa a nuestra formación académica, fomentando en nosotras el sentido de responsabilidad, ética y compromiso con el medio ambiente.

A nuestras amigas (L, D), que más que compañeras se convirtieron en una familia elegida, gracias por compartir risas, desvelos, sueños y desafíos. Han sido nuestro apoyo incondicional y parte esencial de los mejores recuerdos de esta etapa universitaria.

Finalmente, agradecemos a todas las personas e instituciones que de una u otra manera, aportaron a la realización de este proyecto, ya sea brindándonos su tiempo, conocimientos o recursos. Este logro no solo nos pertenece a nosotras, sino también a todos aquellos que creyeron en nuestro potencial y nos acompañaron en el camino.

Con gratitud y cariño, Karen y Glendys.

Contenido

1. Introducción	10
2. Planteamiento del Problema	12
3. Justificación	15
4. Objetivos	17
4.1 Objetivo General	17
4.2 Objetivos Específicos	17
5. Marco referencial	18
5.1 Marco teórico	18
5.2 Marco Legal	25
5.3 Estado Del Arte	26
6. Metodología	33
6.1 Tipo de investigación	33
6.2 Alcance de investigación	33
6.3 Área de estudio	34
6.4 Población y muestra	36
6.5 Fase de investigación	36
7. Resultados	51
8. Conclusiones	56
9. Recomendaciones	58

10. Referencias	59
-----------------	----

Listado de Tablas

TABLA 1 Propiedades de plantas fitorremediadoras seleccionadas	38
TABLA 2 Resultados obtenidos	51
TABLA 3 Eficiencia del biofiltro- monitoreo 2	52
TABLA 4 Variación temporal del biofiltro (m1 vs m2)	53
TABLA 5 Análisis comparativo con la resolución 631 de 2015 – artículo 8	54

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1 Medidas trampa de grasas	43
Ilustración 2 Medidas del biofiltro antes del ajuste	44
Ilustración 3 Medidas biofiltro luego del ajuste. Obsérvese el cambio del punto de salida del efluente.	47

Listado de Gráficos

DIAGRAMA 1 Fase metodológica	36
DIAGRAMA 2 Descripción del sistema	41

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo implementar y evaluar un prototipo de biofiltro con plantas fitorremediadoras para el tratamiento de aguas grises domésticas generadas en la cocina de una vivienda rural sin conexión al sistema de alcantarillado, ubicada en el corregimiento de Cuatro Bocas, municipio de Tubará (Atlántico). El estudio se desarrolla en un contexto donde la falta de infraestructura de saneamiento básico conduce al vertimiento directo de aguas residuales a cuerpos de agua naturales, generando contaminación, proliferación de microorganismos patógenos y afectaciones a los ecosistemas y a la salud pública. La metodología empleada combina un enfoque cuantitativo y experimental. Se realizó una caracterización inicial del sitio, selección de especies fitorremediadoras enea (*Typha latifolia*), papiro (*Cyperus papyrus*), Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) y Junco (*schoenoplectus californicus*), diseño y construcción de un sistema de biofiltración de flujo subsuperficial, e implementación en condiciones reales de operación. Se monitorearon parámetros fisicoquímicos como turbiedad, pH, SST, cloro y conductividad. El prototipo incluyó una trampa de grasas domiciliaria y un biofiltro compuesto por capas de piedras y plantas acuáticas, con un tiempo de retención adecuado según el RAS 2000. Los resultados obtenidos mostraron que el biofiltro presentó inicialmente un periodo de adaptación, durante el cual algunos parámetros aumentaron debido al arrastre de partículas y la estabilización del sustrato y las plantas. No obstante, tras los ajustes operativos implementados, el sistema evidenció mejoras significativas especialmente en la reducción de turbidez y de compuestos químicos presentes en el agua, confirmando el funcionamiento progresivo del prototipo. Estos hallazgos demuestran que la biofiltración con plantas fitorremediadoras constituye una alternativa viable, sostenible y de bajo costo para el tratamiento descentralizado de aguas grises en viviendas rurales sin acceso a alcantarillado.

Palabras clave: biofiltro, fitorremediación, aguas grises, tratamiento descentralizado, saneamiento rural.

Abstract

This research aims to implement and evaluate a prototype biofilter using phytoremediation plants for the treatment of domestic greywater generated in the kitchen of a rural home without a connection to the sewer system, located in the Cuatro Bocas district, municipality of Tubará (Atlántico). The study is conducted in a context where the lack of basic sanitation infrastructure leads to the direct discharge of wastewater into natural water bodies, causing pollution, proliferation of pathogenic microorganisms, and negative impacts on ecosystems and public health. The methodology employed combines a quantitative and experimental approach. An initial site characterization was performed, along with the selection of phytoremediation species (*Typha latifolia*, *Cyperus papyrus*, *Pistia stratiotes*, and *schoenoplectus californicus*), the design and construction of a subsurface flow biofiltration system, and its implementation under real operating conditions. Physicochemical parameters such as turbidity, pH, total suspended solids (TSS), chlorine, and conductivity were monitored. The prototype included a household grease trap and a biofilter composed of layers of stones and aquatic plants, with a retention time appropriate according to RAS 2000. The results showed that the biofilter initially underwent an adaptation period, during which some parameters increased due to particle entrainment and the stabilization of the substrate and plants. However, after the implemented operational adjustments, the system showed significant improvements, especially in the reduction of turbidity and chemical compounds present in the water, confirming the progressive performance of the prototype. These findings demonstrate that biofiltration with

phytoremediation plants constitutes a viable, sustainable, and low-cost alternative for decentralized greywater treatment in rural homes without access to sewage systems.

Key Words: biofilter, phytoremediation, greywater, decentralized treatment, rural sanitation.

1. Introducción

El manejo inadecuado de las aguas residuales domésticas representa uno de los principales problemas ambientales y sanitarios en zonas rurales de América Latina, donde la falta de infraestructura de saneamiento básico ha favorecido la descarga directa de efluentes a cuerpos de agua superficiales. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023), más del 40 % de la población mundial carece de sistemas de tratamiento adecuados, lo que incrementa los riesgos de contaminación hídrica y enfermedades de origen hídrico. En Colombia, esta situación se evidencia especialmente en zonas rurales, donde la cobertura de alcantarillado apenas alcanza el 15 %, en contraste con las zonas urbanas (Moreno Henao, 2024).

Ante esta problemática, las tecnologías naturales de tratamiento descentralizado, como los biofiltros con plantas fitorremediadoras, surgen como una alternativa sostenible y de bajo costo. Estos sistemas aprovechan la capacidad fisiológica de ciertas especies vegetales para absorber, transformar o inmovilizar contaminantes presentes en el agua, proceso conocido como fitorremediación. Estudios recientes demuestran que los sistemas vegetados pueden eliminar hasta el 90 % de la materia orgánica y los nutrientes disueltos en aguas residuales domésticas (Valverde Quispe, 2021)

Entre las especies más utilizadas se destacan *Typha latifolia* (enea), *Cyperus papyrus* (papiro) y *Scirpus lacustris* (junco de agua), *Pistia stratiotes* (lechuga de agua) debido a su alta capacidad de crecimiento y a su eficiencia en la remoción de contaminantes. Investigaciones desarrolladas por Chávez Arenas, (2023) evidencian su efectividad en la depuración de aguas domésticas, con reducciones significativas en parámetros fisicoquímicos como DBO, DQO y sólidos suspendidos.

Asimismo, artículos recientes publicados por Arivukkarasu & Sathyanathan, (2024) confirman que los sistemas de biofiltración con macrófitas alcanzan eficiencias de remoción superiores al 85 % en la depuración de aguas residuales domésticas.

El presente proyecto propone la implementación de un biofiltro experimental con plantas fitorremediadoras (enea, papiro, lechuga de agua y junco) para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la cocina, con el fin de mejorar la calidad del agua mediante procesos biológicos naturales. Este tipo de tratamiento local y ecológico resulta viable para comunidades rurales, ofreciendo una alternativa de bajo costo y fácil mantenimiento.

La investigación se llevó a cabo en una vivienda rural del corregimiento de Cuatro Bocas, municipio de Tubará (Atlántico), donde actualmente las aguas residuales de cocina son vertidas sin tratamiento previo. A través del diseño y evaluación de un prototipo de biofiltro a escala piloto, se busca determinar la eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes y proponer una alternativa viable para zonas sin acceso a alcantarillado. Este estudio responde a los lineamientos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2016), en particular al ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y al ODS 13 (Acción por el clima), los cuales promueven el uso sostenible de los recursos hídricos y la reducción de la contaminación ambiental.

Finalmente, la implementación de biofiltros con especies fitorremediadoras como enea, papiro, lechuga de agua y junco que constituyen una alternativa real y ecológica para avanzar hacia un modelo de saneamiento rural sostenible, basado en principios naturales y comunitarios que contribuyan a mejorar la calidad del agua y la salud ambiental del entorno.

2. Planteamiento del Problema

El acceso a sistemas de saneamiento básico es esencial para la salud pública y la protección del recurso hídrico. En Colombia persiste una marcada desigualdad entre las zonas urbanas y rurales en cuanto al acceso a estos servicios. Según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, (2019), solo 312 de los 1.122 municipios del país contaban con algún tipo de tratamiento de aguas residuales, lo que indica que aproximadamente el 72 % de los municipios carecían de sistemas adecuados de tratamiento. Esta desigualdad se refleja también en el acceso al agua potable, pues mientras en las zonas urbanas el 98 % de la población cuenta con este servicio, en las áreas rurales el porcentaje desciende al 73 %, evidenciando una brecha del 25 % (UNAL, 2024).

La limitada disponibilidad de sistemas de alcantarillado y de tratamiento adecuado de aguas residuales obliga a numerosas familias rurales a disponer sus vertimientos directamente en el suelo o en fuentes hídricas, lo que incrementa la contaminación ambiental y genera impactos negativos en la salud pública. Esta problemática resulta especialmente crítica en viviendas rurales, donde las aguas residuales domésticas, en particular las generadas en la cocina, contienen grasas, detergentes y materia orgánica que deterioran la calidad del agua superficial y subterránea. En consecuencia, esta situación afecta la calidad de vida de las comunidades y representa un riesgo significativo para los ecosistemas locales (Monzón-Reyes et al., 2025).

Además, la falta de saneamiento básico contribuye a la proliferación de enfermedades transmitidas por el agua, como las Enfermedades Diarreicas Agudas (EDA) y las Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETA). Un estudio publicado en la Revista de Salud Pública señala que, aunque ha habido incrementos en las coberturas de alcantarillado, las brechas existentes no han permitido una disminución significativa en la prevalencia de estas enfermedades en los últimos años (Rodríguez Miranda et al., 2016).

Ante este panorama, una alternativa sostenible y de bajo costo para el tratamiento de aguas grises domésticas provenientes de la cocina es la implementación de biofiltros con plantas fitorremediadoras. La fitorremediación utiliza especies vegetales acuáticas capaces de absorber, degradar o transformar contaminantes presentes en el agua. Especies como junco de agua (*Schoenoplectus californicus*), enea (*Typha domingensis*), papiro (*Cyperus papyrus*) y lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) han demostrado ser eficaces en la remoción de nutrientes, grasas y otros contaminantes de las aguas residuales (Moreno Henao, 2024)

Diversos estudios han evidenciado que los sistemas de biofiltros que incorporan plantas acuáticas pueden alcanzar altos porcentajes de remoción de contaminantes, mejorando parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la turbidez y la concentración de sólidos suspendidos. Estos parámetros son esenciales para evaluar la eficiencia del tratamiento, ya que reflejan la carga orgánica y la presencia de grasas y partículas típicas del agua residual de cocina (Arivukkarasu & Sathyanathan, 2024)

En atención a la problemática identificada, el presente proyecto se orienta al desarrollo y evaluación de un prototipo de biofiltro a escala piloto, empleando especies vegetales con capacidad fitorremediadora, con el propósito de optimizar el tratamiento de las aguas residuales domésticas generadas en la cocina antes de su disposición final. El estudio se llevará a cabo en una vivienda rural que no cuenta con sistema de alcantarillado, lo que permitirá analizar la eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes físicos y orgánicos, así como su viabilidad como alternativa de saneamiento descentralizado.

Desde un enfoque de sostenibilidad ambiental, la implementación de este tipo de biofiltros constituye una estrategia tecnológica apropiada y replicable para contextos rurales, al contribuir a la disminución de la carga contaminante vertida al entorno y al fortalecimiento de prácticas locales de gestión del agua, en concordancia con los principios del ODS 6: Agua limpia y saneamiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación busca responder la siguiente pregunta:

¿Cuál es la eficiencia de un prototipo de biofiltro con plantas fitorremediadoras (enea, papiro, lechuga de agua y junco) en la remoción de contaminantes (sólidos disueltos totales y cloro) presentes en las aguas grises de cocina en viviendas sin conexión al sistema de alcantarillado?

3. Justificación

El acceso a servicios de saneamiento básico sigue siendo una de las principales problemáticas ambientales y sociales, especialmente en zonas rurales y sectores que carecen de conexión a redes de alcantarillado. Esta deficiencia genera el vertimiento inadecuado de aguas grises domésticas provenientes del lavado de ropa, duchas y actividades de cocina, directamente al suelo o a cuerpos hídricos, ocasionando contaminación por materia orgánica, grasas, detergentes y metales pesados. Dichos vertimientos afectan la calidad del agua superficial y subterránea, alterando los ecosistemas acuáticos y representando un riesgo sanitario para las poblaciones cercanas. Ante esta situación, se hace necesario desarrollar alternativas tecnológicas sostenibles que permitan el tratamiento descentralizado de las aguas grises, reduciendo su impacto ambiental y fortaleciendo la gestión integral del recurso hídrico (Ortigoza & Corredor, 2021). (Ortigoza & Corredor, 2021)

Los sistemas naturales de tratamiento, como los biofiltros y los humedales artificiales con plantas fitorremediadoras, se han consolidado como soluciones efectivas, sostenibles y adaptables a diversas condiciones geográficas. Estas tecnologías emplean procesos biológicos, físicos y químicos presentes en los sustratos y raíces de las plantas para eliminar contaminantes de las aguas residuales domésticas; su eficiencia depende de la interacción entre microorganismos, materiales filtrantes y especies vegetales que contribuyen a la degradación de materia orgánica, la retención de sólidos suspendidos y la asimilación de nutrientes. Además, se caracterizan por su bajo consumo energético, simplicidad operativa y adecuada integración al entorno, lo que las convierte en una opción viable frente a los sistemas convencionales de tratamiento (Valverde Quispe, 2021).

El presente proyecto propone la implementación de un prototipo de biofiltro con plantas fitorremediadoras para el tratamiento de aguas grises en viviendas sin acceso a alcantarillado. El

diseño incluye especies vegetales seleccionadas por su reconocida capacidad depuradora, como la (Schoenoplectus californicus), enea (Typha domingensis), papiro (Cyperus papyrus) y lechuga de agua (Pistia stratiotes), las cuales han demostrado altos niveles de eficiencia en la remoción de contaminantes (Haro et al., 2023; Darío et al., 2025; Valverde Quispe, 2021).

Diversos estudios reportan porcentajes de remoción superiores al 80 % en demanda bioquímica de oxígeno (DBO), 85 % en sólidos suspendidos totales (SST) y hasta 90 % en nutrientes como nitrógeno y fósforo. Estas especies, además de contribuir a la eliminación de contaminantes, favorecen la oxigenación del medio filtrante y la proliferación de microorganismos que potencian los procesos de biodegradación, incrementando la eficiencia global del sistema (Hamad, 2023)

Desde el punto de vista técnico y económico, el biofiltro propuesto representa una alternativa de bajo costo, alta eficiencia y fácil operación, ya que al ser un método pasivo no requiere energía eléctrica ni monitoreo constante, lo que garantiza su aplicabilidad en zonas con infraestructura limitada. Este tipo de soluciones basadas en tecnologías limpias promueve la gestión responsable del agua y fomenta la sostenibilidad ambiental a nivel doméstico y comunitario (Haro et al., 2023).

La relevancia científica de este trabajo radica en su aporte al desarrollo y validación de tecnologías naturales orientadas al tratamiento descentralizado de aguas residuales; el proyecto integra los principios de fitorremediación y biofiltración en un modelo funcional adaptado al entorno doméstico, contribuyendo a la innovación en sistemas de saneamiento sostenible. Asimismo, se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente el ODS 6: Agua limpia y saneamiento, al promover prácticas que garantizan la disponibilidad y el manejo sostenible del recurso hídrico (Arivukkarasu & Sathyanathan, 2024)

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

- Implementar un prototipo de biofiltro con plantas fitorremediadoras para el tratamiento de aguas grises domésticas en vivienda sin conexión al sistema de alcantarillado

4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar parámetros físicos y químicos de las aguas residuales domésticas de la vivienda.
- Seleccionar las especies de plantas fitorremediadoras que puedan llevar a cabo la biofiltración del agua residual doméstica.
- Diseñar y construir un sistema de biofiltración con plantas fitorremediadoras para el tratamiento de aguas residuales domésticas en viviendas sin acceso a alcantarillado.
- Evaluar el porcentaje de remoción de carga contaminante de las aguas grises domésticas una vez tratadas por el biofiltro.

5. Marco referencial

5.1 Marco teórico

Principales especies macrófitas utilizadas en humedales artificiales

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento natural diseñados para reproducir las condiciones de los ecosistemas acuáticos, utilizando plantas macrófitas, microorganismos y sustratos como medio de depuración. Estas plantas no solo aportan oxígeno al sistema, sino que también participan en la fitorremediación, proceso mediante el cual las especies vegetales absorben, transforman o estabilizan contaminantes presentes en el agua residual. (Ortigoza & Corredor, 2021)

Las macrófitas emergentes y flotantes juegan un papel esencial en la remoción de contaminantes como la materia orgánica (DBO y DQO), nutrientes (nitrógeno y fósforo), sólidos suspendidos y metales traza. Su efectividad depende de las características fisiológicas, la densidad del sistema radicular y su capacidad de crecimiento en ambientes anóxicos o saturados. (Moreno Henao, 2024).

En el presente proyecto se seleccionaron las especies Enea (*Typha domingensis*), Papiro (*Cyperus papyrus*), Junco (*Schoenoplectus californicus*) y Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), debido a su eficiencia comprobada en procesos de fitorremediación y su adaptación a las condiciones climáticas tropicales.

Enea (*Typha domingensis*)



Fuente: Google imágenes 2025

La Enea es una planta macrófita emergente ampliamente utilizada en humedales artificiales por su alta capacidad de retención de nutrientes y materia orgánica, además de su resistencia a cargas contaminantes elevadas. Su extenso sistema radicular favorece la aireación del sustrato y promueve la actividad bacteriana, facilitando la degradación de la materia orgánica.

Estudios han demostrado que *Typha domingensis* puede alcanzar eficiencias superiores al 80% en la remoción de DBO y DQO, además de absorber nitrógeno y fósforo (Amarilla et al., 2024).

Papiro (*Cyperus papyrus*)



Fuente: Google imágenes 2025

El papiro es una planta emergente robusta con un sistema radicular fibroso que proporciona soporte físico para microorganismos epifíticos y aumenta el área superficial de

contacto entre el agua y el sustrato. Se caracteriza por su alta tolerancia a variaciones en la carga contaminante y su crecimiento rápido, lo que la hace ideal para humedales de flujo subsuperficial.

Además, *Cyperus papyrus* ha demostrado ser efectiva en la reducción de sólidos suspendidos totales (SST) y en la oxigenación del medio ((Henaó & Johanna, 2024).

Junco (*Schoenoplectus californicus*)



Fuente: Google imágenes 2025

El junco es otra macrófita emergente frecuentemente empleada en sistemas naturales de tratamiento de aguas por su resistencia a las variaciones hidráulicas y su capacidad para filtrar sólidos y absorber nutrientes. Su estructura vertical densa contribuye a reducir la velocidad del flujo, permitiendo una sedimentación más eficiente de partículas.

Asimismo, esta especie participa activamente en la transformación biogeoquímica del nitrógeno, mediante procesos de nitrificación y desnitrificación, contribuyendo al equilibrio ecológico del humedal. (Coleman et al., 2001)

Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)



Fuente: Google imágenes 2025

La lechuga de agua es una planta flotante con gran capacidad de absorción de contaminantes disueltos, especialmente nitratos, fosfatos y metales pesados. Su sistema radicular cuelga libremente en el agua, permitiendo un contacto directo con los contaminantes.

Gracias a su rápido crecimiento y fácil reproducción, *Pistia stratiotes* puede reducir significativamente los valores de DBO, DQO, fósforo total y amonio, actuando como un biofiltro natural que mejora la calidad del efluente tratado.(Ali et al., 2024)

Tratamiento de aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas se componen principalmente de materia orgánica, detergentes, grasas, restos de alimentos y microorganismos patógenos. Su vertimiento sin tratamiento previo genera graves impactos ambientales, como la eutrofización, la pérdida de oxígeno disuelto y la contaminación de cuerpos hídricos superficiales y subterráneos. (Valverde 2021).

De acuerdo con la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se establecen límites máximos permisibles para vertimientos de aguas residuales, con el fin de proteger la salud pública y los ecosistemas acuáticos.

La implementación de tecnologías limpias como biofiltros vegetales o humedales artificiales surge como una alternativa ecológica y de bajo costo para el tratamiento

descentralizado de aguas residuales domésticas, especialmente en comunidades rurales sin acceso a sistemas convencionales de alcantarillado. (Sierra Mesa, 2007)

Biofiltros con plantas fitorremediadoras

Los biofiltros son sistemas naturales de tratamiento que combinan sustratos filtrantes (arena, grava, carbón, zeolita) y plantas acuáticas macrófitas capaces de remover contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

Según Moreno Henao, (2024), las plantas y el material filtrante actúan conjuntamente para reducir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y los nutrientes (Nitrógeno y Fósforo).

El proceso de tratamiento se realiza en varias etapas:

- Filtración física de sólidos a través del medio granular.
- Adsorción química de compuestos orgánicos en el sustrato.
- Absorción biológica de nutrientes por las raíces de las plantas.
- Degradación microbiana de materia orgánica y detergentes.

Diversas investigaciones han demostrado la eficiencia de estos sistemas en el tratamiento de aguas grises. Por ejemplo, el estudio de la Universidad Técnica de Cotopaxi (2022) evidenció que la combinación de Enea y Papiro logró una reducción del 80% en DQO y 75% en SST en efluentes domésticos rurales. (Guanin Pallasco & Reatiqui Chiluisa, 2022)

Principios hidráulicos del sistema de biofiltración

El desempeño de un biofiltro depende de parámetros hidráulicos que garantizan el tiempo suficiente para la depuración del agua. Entre los más importantes se encuentran:

Flujo subsuperficial: el agua se mueve horizontal o verticalmente a través del sustrato, evitando olores y proliferación de mosquitos.

Tiempo de retención hidráulica (TRH): periodo en que el agua permanece en el sistema; influye directamente en la eficiencia de remoción de contaminantes.

Caudal de entrada: volumen de agua tratada por unidad de tiempo; debe regularse para evitar saturación del medio filtrante.

Según la tesis de la Universidad Politécnica Salesiana (2023), un tiempo de retención entre 3 y 5 días es ideal para la depuración de aguas grises con concentraciones medias de materia orgánica. (Zambrano Intriago, 2023)

El diseño hidráulico busca un equilibrio entre la eficiencia del tratamiento y la capacidad del sistema, promoviendo la aireación natural, el flujo constante y la regeneración biológica del medio filtrante.

Mecanismos de fitorremediación

La fitorremediación es el proceso mediante el cual las plantas eliminan, estabilizan o transforman contaminantes del agua y del suelo. En el contexto de los biofiltros, las plantas cumplen un papel crucial a través de mecanismos como:

Fitofiltración: retención y adsorción de contaminantes por las raíces.

Fitodegradación: transformación enzimática de compuestos orgánicos.

Fitoextracción: absorción de nutrientes o metales por las raíces y traslado hacia los tejidos.

Rizofiltración: remoción de contaminantes mediante biofilm microbiano adherido a las raíces.

De acuerdo con Valverde (2021), las especies *Typha domingensis*, *Juncus effusus* y *Cyperus papyrus* muestran una alta capacidad de remover detergentes, grasas y compuestos nitrogenados, gracias a la interacción simbiótica entre sus raíces y las bacterias nitrificantes.

(Valverde Quispe, 2021)

Tecnologías limpias y sostenibilidad

El uso de biofiltros vegetales representa una tecnología limpia, ya que no requiere energía eléctrica, genera bajos costos operativos y aprovecha procesos naturales de depuración. Estas características los hacen idóneos para zonas rurales y viviendas sin alcantarillado.

Además, se enmarca en los principios de la Ingeniería Ambiental Sostenible, que promueve soluciones ecológicas, sociales y económicamente viables para la gestión del recurso hídrico (FAO, 2013) ..

Porcentaje de remoción y eficiencia de tratamiento

Los sistemas de humedales construidos (CW por sus siglas en inglés) y biofiltros vegetados han demostrado una eficiencia elevada en la remoción de contaminantes domésticos cuando se optimizan correctamente los parámetros de diseño y operación. Por ejemplo, un estudio en Turquía que empleó flujo vertical y plantas macrófitas, registró valores de remoción promedio de DBO₅ entre 72-96 % y Sólidos Suspendidos Totales (SST) entre 94-98 %. (Sengorur & Ozdemir, 2006)

Otra revisión sistemática reciente señala que, en sistemas domésticos descentralizados, los humedales pueden alcanzar eficiencias superiores al 80 % en materia orgánica y sólidos suspendidos, siempre que se mantenga un tiempo de contacto adecuado entre agua y biomasa vegetal. (Domínguez-Solís et al., 2025) Esta evidencia es relevante para el presente proyecto, ya que justifica la adopción de especies vegetales como la Enea, Papiro, Junco y Lechuga de agua para buscar altos porcentajes de remoción en aguas residuales de cocina.

Parámetros de control en la calidad del agua tratada

DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno): mide la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica.

DQO (Demanda Química de Oxígeno): cuantifica la materia orgánica total (biodegradable y no biodegradable).

SST (Sólidos Suspendidos Totales): representan partículas que pueden causar turbidez y obstrucción del flujo.

pH y conductividad: indicadores del equilibrio químico del agua.

Turbidez y cloro residual: permiten evaluar el grado de clarificación y la presencia de desinfectantes.

Estos parámetros se encuentran regulados por la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece los límites máximos permisibles para vertimientos a cuerpos de agua superficiales.

5.2 Marco Legal

El presente proyecto se sustenta bajo la normativa ambiental y sanitaria relacionada con el manejo y disposición adecuada de aguas residuales domésticas, por lo cual, las siguientes normativas garantizan que el sistema diseñado cumpla con los criterios de calidad exigidos para los vertimientos, la viabilidad técnica y su reconocimiento como opción válida dentro de las estrategias de saneamiento básico ambiental:

Resolución 0330 de 2017: Por medio del cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las Resoluciones números 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. En el capítulo 5, sección 3 se habla de los sistemas de tratamiento descentralizados para vivienda rural dispersa.

Resolución 0631 de 2015 (Norma sobre Vertimientos): Esta norma define los criterios y los límites máximos permisibles para los vertimientos directos a cuerpos de agua superficiales, al sistema de alcantarillado público y al terreno. Aunque el proyecto está dirigido a hogares sin alcantarillado, las normas aquí establecidas son cruciales para medir la efectividad del biofiltro y asegurar la protección de las fuentes de agua.

Decreto 1594 de 1984 (Reglamentación Parcial de la Ley 9 de 1979 y del Decreto-Ley 2811 de 1974 sobre el uso de agua y desechos líquidos): A pesar de su antigüedad, este decreto establece directrices sobre la calidad del agua y regulaciones sobre los desechos, sirviendo como referencia para definir las metas de tratamiento del biofiltro.

Decreto 050 del 2018 por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible: Este decreto compila y actualiza diversas regulaciones ambientales, incluyendo las relacionadas con la gestión del agua y los vertimientos. Es esencial examinar las partes relevantes a la calidad del agua y los métodos de tratamiento.

Ley 142 de 1994 (Ley de Servicios Públicos Domiciliarios) Establece el marco general para la prestación de los servicios públicos domiciliarios, incluyendo el sistema de alcantarillado, y define las responsabilidades de los prestadores y usuarios en la gestión de aguas residuales.

Resolución 0699 de 2021 Reglamenta los límites máximos permisibles para vertimientos puntuales de aguas residuales tratadas al suelo y establece los parámetros de control y seguimiento para proteger la calidad ambiental. Esta normativa resulta especialmente pertinente para el presente proyecto, dado que el sistema de biofiltro está orientado al tratamiento y disposición de aguas residuales domésticas en zonas sin conexión a alcantarillado, permitiendo evaluar su cumplimiento frente a los estándares ambientales vigentes.

5.3 Estado Del Arte

El tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas ha cobrado relevancia en los últimos años como una alternativa frente a la falta de infraestructura convencional en zonas rurales. En este contexto, los sistemas de tratamiento basados en tecnologías naturales como los biofiltros con plantas fitorremediadoras han demostrado ser soluciones eficaces, sostenibles y de bajo costo (Valverde 2021).

Diversas investigaciones han explorado el potencial de la fitorremediación para eliminar contaminantes presentes en las aguas grises, aprovechando la capacidad de ciertas especies vegetales para absorber, transformar o retener sustancias contaminantes. Esta línea de estudio ha abierto un campo amplio de posibilidades para el desarrollo de prototipos funcionales orientados a mejorar la calidad del agua y mitigar los impactos ambientales derivados del vertimiento inadecuado de aguas residuales. A continuación, se presentan una serie de investigaciones científicas relacionadas con el presente proyecto:

En la investigación titulada “Análisis de alternativas para la descontaminación de aguas residuales de orígenes domiciliarios y contaminadas con metales pesados mediante el uso de humedales artificiales y macrófitas”, Ortigoza y Corredor (2021) tuvieron como objetivo determinar las especies vegetales y los tipos de humedales más eficientes para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias contaminadas con metales pesados. A través del análisis de diversos estudios, se evaluó principalmente la eficiencia de humedales artificiales en la remoción de estos contaminantes. Los resultados evidenciaron que el humedal horizontal de flujo subsuperficial presentó mayor eficiencia, debido a su alta capacidad de tratamiento, así como a la reducción del riesgo de contacto directo con el agua y la proliferación de insectos.

En el año 2021, Valverde Quispe, con la investigación “Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante el uso de humedales artificiales mejorados con las especies *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis*”, examinó la eficiencia de humedales artificiales mejorados en la remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas durante la investigación se utilizaron

cuatro prototipos con diferentes combinaciones de *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis*, destacando la combinación de ambas especies como la más eficiente en la reducción de contaminantes y coliformes termotolerantes.

Del mismo modo, el artículo científico denominado “Eutrofización de aguas residuales domiciliarias con absorción biológica de nitrógeno y fósforo, sector San José de Pichul, período 2021 – 2022”, Guanin & Reatiqui (2022). evaluaron la fitorremediación con *Lemna minor* para la eliminación de nitrógeno y fósforo en aguas grises domiciliarias donde se alcanzó una remoción del 60% de nitrógeno y 98.16% de fósforo.

En la investigación “Reducción de la materia orgánica de las aguas residuales del canal municipal de Supe, mediante plantas fitorremediadoras a escala piloto”, llevada a cabo por Haro et al., (2023) se evaluó la eficiencia de *Nasturtium officinale*, *Eichhornia crassipes* y *Thypha latifolia* en la reducción de DBO₅ y DQO en aguas residuales, donde el tratamiento con *Thypha latifolia* obtuvo el mayor porcentaje de reducción, alcanzando una disminución del 70 % en DQO y del 89,1 % en DBO₅, demostrando su alta capacidad para la remoción de materia orgánica en sistemas de tratamiento natural a escala piloto.

Zambrano Intriago, en el año 2023 realizó la investigación denominada “Diseño de un biofiltro utilizando *Lemna Minor* y *Eichhornia Crassipes* para la captación de metales pesados del Ramal B del Estero Salado, Guayaquil-Ecuador” que tuvo como objetivo reducir concentraciones de metales pesados (Cd, Pb y Cr) de la muestra de agua del Estero Salado con el uso de las plantas *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes*. Mediante el diseño de un biofiltro con *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* para remover cadmio, plomo y cromo en el Estero Salado se lograron tasas de remoción superiores al 98%, destacando la fitorremediación como una alternativa eficiente y de bajo costo.

El estudio titulado “Revisión de plantas fitorremediadoras con capacidad de remoción de plomo en cuerpos de agua”, realizado por Ballen Garzón (2023) que tenía como objetivo realizar

un análisis de la literatura sobre la remoción de plomo en cuerpos de agua a partir de plantas fitorremediadoras con el fin de identificar beneficios y limitaciones. Logró identificar 36 especies con capacidad de absorción de plomo, con especial énfasis en *Chrysopogon zizanioides* y *Alternanthera philoxeroides* mostrando altos porcentajes de remoción de plomo en poco tiempo, siendo viables para procesos de fitorremediación.

En el año 2023, Pérez et al., realizaron la investigación sobre “Tratamiento de aguas de efluentes domésticas con sistemas de biofiltros en Chontamuyo, Banda de Shilcayo. La investigación analizó el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando sistemas de biofiltros en Chontamuyo. Se analizaron parámetros fisicoquímicos iniciales y finales, demostrando que especies como *Pistia stratiotes* y *Lemna minor* son efectivas en la remoción de contaminantes, representando una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Por otro lado, Chávez Arenas, (2023) en su proyecto titulado “Métodos de fitorremediación en aguas residuales municipales y domésticas”, analizó la eficacia de distintos sistemas de fitorremediación para el tratamiento de aguas residuales. Se identificó a *Eichhornia crassipes* y *Phragmites australis* como las especies más eficientes en diferentes tipos de aguas y se evaluaron parámetros como DBO5, DQO, turbidez y coliformes, con altos porcentajes de reducción.

Así mismo, la investigación denominada “Diseño de un sistema de biofiltración para el tratamiento de aguas residuales domésticas de una vivienda sin sistema de alcantarillado”, llevado a cabo por Moreno Henao, (2024), Propuso el diseño de un sistema de biofiltración para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una vivienda de la vereda Ambalá Parte Alta, municipio de Ibagué, departamento del Tolima, utilizando plantas como el papiro (*Cyperus papyrus*) y el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para la remoción de contaminantes. Se

compararon tres tipos de humedales artificiales, determinando que el humedal de flujo subsuperficial (HAFSS) es la mejor opción por su eficacia en la remoción de contaminantes por su bajo costo, fácil construcción y operación sencilla.

En el marco de investigaciones orientadas al desarrollo de soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas, Arivukkarasu y Sathyanathan (2024), en su estudio titulado “A sustainable green solution to domestic sewage pollution: Optimizing floating wetland treatment with different plant combinations and growth media”, investigó la eficacia de los sistemas de tratamiento de humedales flotantes (THF) con balsas de bambú y distintas combinaciones de plantas para el tratamiento de aguas residuales domésticas. El estudio probó *Canna indica*, *Chrysopogon zizanioides* e *Hibiscus rosa-sinensis* en sustratos de tierra y turba de coco, y descubrió que el sistema basado en turba con *Canna indica* y *Chrysopogon zizanioides* lograba la mayor eficiencia de eliminación de contaminantes. Las principales reducciones fueron nitrógeno total (78,9%), amoníaco (90,2%), fósforo (86,9%), DQO (92,8%), DBO5 (94,8%) y *E. coli* (78%). Estos resultados demuestran que los sistemas FWT son una solución sostenible y rentable para el tratamiento de aguas residuales, aprovechando la filtración natural a base de plantas para mejorar la calidad del agua.

En el año 2024 (Guevara et al., 2024) realizaron una investigación denominada “Enhancement of Domestic Wastewater Treatment Plants Employing *Eichhornia crassipes* Biofilters” investigaron el uso de biofiltros de *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) en el tratamiento de aguas residuales domésticas, destacando su idoneidad para zonas rurales debido al bajo consumo de energía y la facilidad de implementación. Se desarrolló un prototipo a escala reducida para evaluar su eficiencia en la eliminación de contaminantes como nutrientes, materia orgánica y metales pesados (arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo y mercurio). El estudio tuvo como objetivo reducir los niveles de contaminantes por debajo de los límites de descarga permisibles y analizó las ventajas y limitaciones de las plantas flotantes en el tratamiento de aguas residuales. Los resultados mostraron mejoras significativas en algunos parámetros de

calidad del agua, aunque ciertos aspectos siguieron sin ser concluyentes, lo que destaca la necesidad de una mayor optimización.

En el año 2024, (Muguirrima et al., 2024) realizaron una investigación titulada “*Treatment of domestic effluents using sustainable biofilter methods*”, en la que exploraron métodos de biofiltración de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, con un enfoque en la sostenibilidad y la accesibilidad. El estudio desarrolló un sistema de biofiltros utilizando materiales reciclables, diseñado para ser implementado en comunidades de bajos ingresos y con fines educativos. Estos biofiltros funcionan mediante la filtración y depuración progresiva del agua residual a través de capas de materiales específicos, como arena, grava y carbón activado, que ayudan a eliminar contaminantes físicos, químicos y biológicos. Además, la incorporación de plantas fitorremediadoras potencia la capacidad del sistema para absorber y transformar sustancias nocivas. Los resultados de la investigación evidenciaron que estos biofiltros permiten mantener niveles aceptables de parámetros como pH, turbidez, cloración, temperatura y conductividad eléctrica, asegurando una descarga más segura del agua y su posible reutilización en actividades domésticas. La simplicidad, bajo costo y facilidad de replicación del sistema destacan su potencial como una alternativa viable para el saneamiento en comunidades sin acceso a infraestructura convencional de tratamiento de aguas residuales.

(Buslima et al., 2024) en el año 2024 con “*Water recovery from domestic wastewater using integrated biofilm-phytoremediation technology: A review*” revisaron el potencial de un sistema integrado de biofilm-fitorremediación como alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas y la recuperación de agua. El estudio destaca las limitaciones de los tratamientos biológicos convencionales para gestionar todos los contaminantes debido a su baja capacidad. El sistema propuesto combina un reactor de biofilm de lecho móvil (MBBR) con *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) como un sistema de fitorremediación flotante, optimizando

la eficiencia de eliminación de contaminantes. La revisión enfatiza sus condiciones operativas, el rendimiento de eliminación de contaminantes y los beneficios y limitaciones del jacinto de agua como fitorremediador. Este enfoque integrado se alinea con el concepto de economía circular al promover la recuperación de biomasa y agua, presentando una solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales y la reutilización de recursos.

En el año 2025, los autores Darío et al., con la investigación “Eficacia de fitorremediación de las especies *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* en las aguas de la subcuenca del río Pinto, de la Amazonía ecuatoriana.” Evaluaron la capacidad de *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* para mejorar la calidad del agua en la subcuenca del río Pinto. Se midieron parámetros fisicoquímicos y biológicos en 30 días, evidenciando una reducción significativa de coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno, y un aumento en oxígeno disuelto. Por lo que se concluye que estas especies son efectivas en la fitorremediación de ríos amazónicos.

Así mismo, la investigación denominada “Performance of Integrated Biofilm-Phytoremediation Process in Reclaiming Water from Domestic Wastewater” de los autores Buslima et al., (2025) evaluaron la eficiencia de un sistema integrado de biopelícula y fitorremediación para la recuperación de aguas residuales domésticas. Se utilizó un reactor en forma de cubo de 15 L, que incorporaba *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y un portador de polietileno como medio de soporte. El estudio se llevó a cabo en dos fases: adaptación bacteriana a aguas residuales domésticas y sintéticas (Fase I) e integración de biopelícula y fitorremediación a diferentes concentraciones de $\text{NH}_3\text{-N}$ y tiempos de retención hidráulica (Fase II). Los resultados mostraron altas eficiencias de eliminación de contaminantes, con tasas de reducción de DQO y $\text{NH}_3\text{-N}$ entre 86,7-100% y 79,0-99,6%, respectivamente, mientras que la eliminación de fosfato alcanzó el 80%. El sistema demostró el potencial para producir agua tratada de alta

calidad adecuada para la reutilización no potable, presentando una solución alternativa para la escasez de agua.

6. Metodología

6.1 Tipo de investigación

El presente estudio corresponde a una investigación mixta con predominio cuantitativo, de tipo aplicada y experimental. Es aplicada porque busca ofrecer una solución tecnológica sostenible al problema de vertimiento de aguas grises domésticas en zonas sin conexión a sistemas de alcantarillado mediante la implementación de un biofiltro con plantas fitorremediadoras (Moreno Henao, 2024).

Es experimental porque se diseña y se implementa un prototipo, midiendo parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento para determinar su eficiencia.

El enfoque cuantitativo predomina, dado que el análisis se basó en mediciones objetivas de la calidad del agua (pH, conductividad, turbidez y SST, Cloro) (Pérez et al., 2023).

Paralelamente, se integraron observaciones cualitativas que permitieron identificar fallas operativas y comportamientos del sistema.

6.2 Alcance de investigación

El alcance de esta investigación se centra en el diseño y desarrollo de una solución innovadora y de bajo costo para el tratamiento de aguas grises domésticas generadas por la cocina de la vivienda específicamente del lavaplatos - conectada directamente al sistema de tuberías del biofiltro a través de la trampa de grasas domiciliaria - empleando métodos descriptivos y experimentales. El estudio busca caracterizar la situación actual de los vertimientos en zonas sin

alcantarillado, para luego proponer un prototipo de biofiltro con plantas fitorremediadoras como una alternativa eficaz de gestión y saneamiento a escala piloto.

6.3 Área de estudio

La investigación se desarrolló en una vivienda rural del corregimiento Cuatro Bocas, municipio de Tubará, Atlántico (Colombia).

Actualmente, las aguas residuales del baño (aguas negras) son dirigidas hacia un pozo séptico, mientras que las aguas grises provenientes de la cocina (lavado de utensilios, preparación de alimentos, etc.) son vertidas directamente a un cuerpo de agua superficial ubicado a aproximadamente 20 metros de la vivienda.

Este cuerpo de agua corresponde a una depresión natural del terreno, conocida por la comunidad como “el pozo”, aunque técnicamente se clasifica como un jagüey, es decir, un reservorio de agua superficial que se forma de manera natural. Este jagüey recoge escorrentía de agua de lluvia y otras escorrentías, y funciona como un punto de retención temporal o permanente de agua.

En la vivienda residen tres personas (un hombre, su esposa y su hija), quienes practican formas básicas de reutilización del agua, como el uso del agua del lavado de ropa para tareas de limpieza del hogar. Además, crían 7 perros, 3 gatos y 20 gallinas, lo que representa una fuente adicional de residuos orgánicos en el entorno inmediato. Cabe resaltar que el jagüey tiene un uso comunitario no oficial: ocasionalmente, personas de los alrededores se bañan allí, lo cual representa un riesgo para la salud pública, especialmente considerando que el cuerpo de agua recibe aguas residuales domésticas sin tratamiento.

Estas condiciones evidencian la necesidad de intervenir mediante una solución eco-tecnológica que permita el tratamiento de las aguas grises antes de su vertimiento. Por ello, se propone la implementación de un biofiltro con plantas fitorremediadoras, como una estrategia de depuración sostenible y adaptada a las condiciones rurales.



*Fotografía 1 Vista del cuerpo de agua “El pozo”
Fuente: Autores*



*Fotografía 2 Vista del patio de la vivienda
Fuente: Autores*

6.4 Población y muestra

- **Población:** Viviendas del corregimiento de Cuatro Bocas sin conexión a sistemas de alcantarillado.
- **Muestra:** Vivienda donde se instalará el prototipo (Calle 7B Cra 4 - 17 Cuatro Bocas, Tubará).

6.5 Fase de investigación

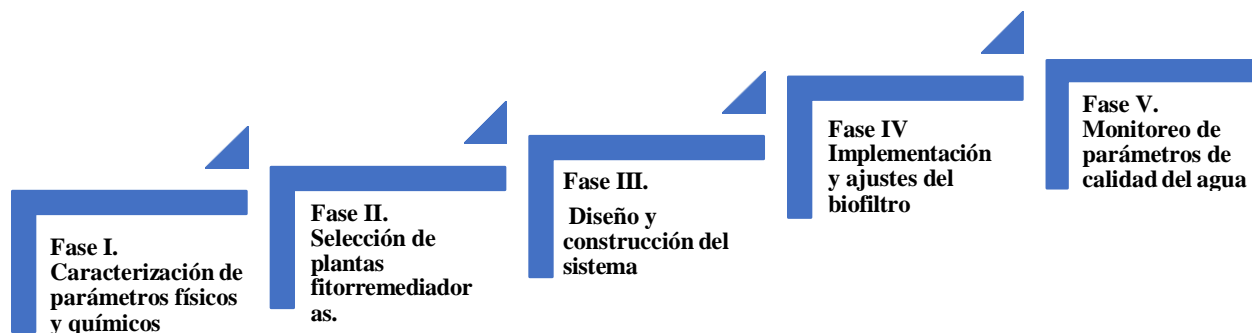


Diagrama 1 Fase metodológica

Fase I. Caracterización de parámetros físicos y químicos

En la primera fase del proyecto se realizó la caracterización de las aguas residuales domésticas provenientes del lavaplatos de la vivienda, a través del primer monitoreo efectuado en la salida de la trampa de grasas. Los análisis fueron desarrollados por el laboratorio de la empresa Drink Food S.A.S., empleando los equipos disponibles para la medición de parámetros básicos de calidad del agua, de acuerdo con los lineamientos de la Resolución 631 de 2015 y el RAS 2000, Título E.

Los resultados evidenciaron una turbiedad de 194 NTU, indicando una alta presencia de partículas suspendidas y residuos orgánicos propios del lavado de utensilios de cocina. El pH de 6,17 mostró una ligera tendencia a la acidez, posiblemente asociada al uso de detergentes o residuos alimenticios. En cuanto a los sólidos disueltos totales (0,38 g/L) y la conductividad (0,77 mS/cm), ambos valores reflejan la presencia de sales y compuestos derivados de productos de limpieza. Finalmente, el cloro (1,04 mg/L) sugiere una posible acumulación de agentes oxidantes, lo que puede influir en la actividad biológica del sistema de tratamiento posterior.

Parámetro	Valor	Unidad	Interpretación técnica
Turbiedad	194	NTU	Alta presencia de partículas suspendidas y materia orgánica
pH	6,17	--	Ligera tendencia a la acidez
Sólidos disueltos totales	0,38	g/L	Presencia moderada de sales disueltas
Conductividad eléctrica	0,77	mS/cm	Indica compuestos iónicos derivados de detergentes
Cloro residual	1,04	mg/L	Posible acumulación de agentes oxidantes

Estos resultados permitieron establecer la línea base de las condiciones iniciales del afluente, información fundamental para evaluar el desempeño del biofiltro en las siguientes etapas de monitoreo.

Fase II. Selección de plantas fitorremediadoras.

A través de una revisión de literatura científica se evaluaron diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas que emplean especies vegetales fitorremediadoras para la depuración de contaminantes. En esta fase se llevó a cabo un análisis comparativo con el

fin de identificar las plantas más adecuadas para el diseño del sistema considerando su capacidad de remoción de contaminantes, compatibilidad con el diseño propuesto, ventajas para la fitorremediación y facilidad de adquisición o disponibilidad de individuos en las zonas de estudio, además, se valoró su adaptabilidad a las condiciones ambientales locales.

Tabla 1 *Propiedades de plantas fitorremediadoras seleccionadas*

Planta	Nombre científico	Propiedades	Referencia
Enea	<i>Typha latifolia</i>	Oxigena el agua y los lodos mediante su sistema radicular hueco, segrega ácidos que eliminan bacterias patógenas y absorbe metales pesados, nitratos, fosfatos y materia orgánica.	Haro et al., 2023
Lechuga de agua	<i>Pistia stratiotes</i>	Reduce la turbidez y la DBO ₅ , mejora la oxigenación del agua, absorbe nutrientes y metales pesados, y disminuye los coliformes fecales; aunque puede aumentar ligeramente los sólidos suspendidos por la descomposición de su biomasa	Darío et al., 2025
Papiro	<i>Cyperus papyrus</i>	Posee alta capacidad fitorremediadora, eliminando sólidos, nitrógeno y fósforo, además de reducir la DBO ₅ . Su sistema radicular funciona como filtro biológico que mejora la depuración del agua.	Valverde Quispe, 2021
Junco	<i>Schoenoplectus californicus</i>	Planta macrófita emergente, con alta tolerancia a cargas orgánicas y metales; favorece la aireación del sustrato por su sistema radicular; eficiente en la remoción de DQO, DBO y sólidos suspendidos; resistente a variaciones de pH y temperatura.	Carlos et al., 2024

Fase III. Diseño y construcción del sistema

Se consideró que el sistema se instalará en una vivienda sin conexión al sistema de alcantarillado, lo cual exige un tratamiento in situ de aguas grises de la cocina.

- Cálculo del tiempo de retención hidráulica (TRH)

De acuerdo con el caudal estimado proveniente de una vivienda ocupada por dos adultos y un infante, se calculó el caudal diario del lavaplatos (Q) mediante un flujo intermitente típico en usos domésticos de cocina:

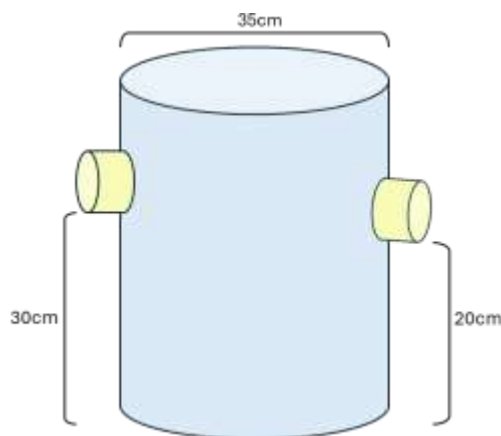
$$Q = 60 \text{ L/persona} \cdot d'1a \times 3 \text{ personas} = 180 \text{ L/d'1a}$$

No obstante, es necesario tener presente que debido a que se trata de un caudal intermitente a lo largo del día, no se puede utilizar este caudal para realizar el cálculo del Tiempo de Retención Hidráulica – TRH, de manera que el diseño de la trampa de grasas cumpla con el RAS 2017, debe partir de los caudales punta, el cual se puede estimar dividiendo el caudal total de **180 L/día** en tres tandas correspondiente a las jornadas de preparación de alimentos, teniendo así **60L** por tanda. La cual se puede ejecutar en 10 minutos. Así las cosas, podemos establecer una *caudal punta* de **6 L/min**, resultado de dividir el caudal de 60L durante los 10 minutos.

El TRH se obtiene de la relación entre el volumen del tanque (V) y el caudal (Q):

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

Para calcular el volumen de la trampa de grasas fue necesario tener en cuenta que el tanque utilizado para el diseño y construcción de esta tiene una capacidad total nominal de 50 litros, pero debido a la ubicación de los puntos de entrada y desfogue, no se puede tener en cuenta todo el volumen del tanque, por tanto, se procede a realizar el cálculo del volumen aproximado del tanque de la trampa de grasas.



Se convierte el diámetro a radio:

$$d = 35 \text{ cm} \rightarrow r = \frac{d}{2} = \frac{35}{2} = 17,5 \text{ cm}$$

Se calcula el valor del radio al cuadrado r^2 :

$$r^2 = 17,5^2 = 306,25 \text{ cm}^2$$

Ya con el área calculada se determina la altura $h = 20 \text{ cm}$:

$$r^2 \cdot h = 306,25 \text{ cm}^2 \times 20 \text{ cm} = 6125 \text{ cm}^3$$

Multiplicar por π nos permite definir el volumen definitivo de:

$$V = \pi \times 6125 \approx 3,14 \times 6125 \text{ cm}^3 = 19242,26 \text{ cm}^3$$

Resultados (redondeados):

$$V \approx 19242,26 \text{ cm}^3 = 19,24 \text{ L} \approx 19 \text{ L}$$

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

$$TRH = \frac{19 \text{ L}}{6 \frac{\text{L}}{\text{min}}} = 3,3 \text{ min}$$

La Resolución 330 de 2017 presenta valores orientativos de tiempo de retención hidráulica (TRH) según la tecnología de tratamiento, por ejemplo, minutos en procesos de alta tasa, horas en sedimentadores y días en lagunas. Aunque un TRH de 3,3 minutos es inferior a los TRH orientativos para unidades convencionales de clarificación y tratamiento biológico, la norma no impone un único TRH obligatorio para sistemas naturales o descentralizados de pequeña escala. Por tanto, para este biofiltro doméstico que trata exclusivamente aguas de cocina (aguas grises) se adoptó un TRH de 3,3 min, justificado por la naturaleza intermitente y de baja carga del afluente.

Descripción del sistema

El sistema se compone de dos unidades secuenciales:

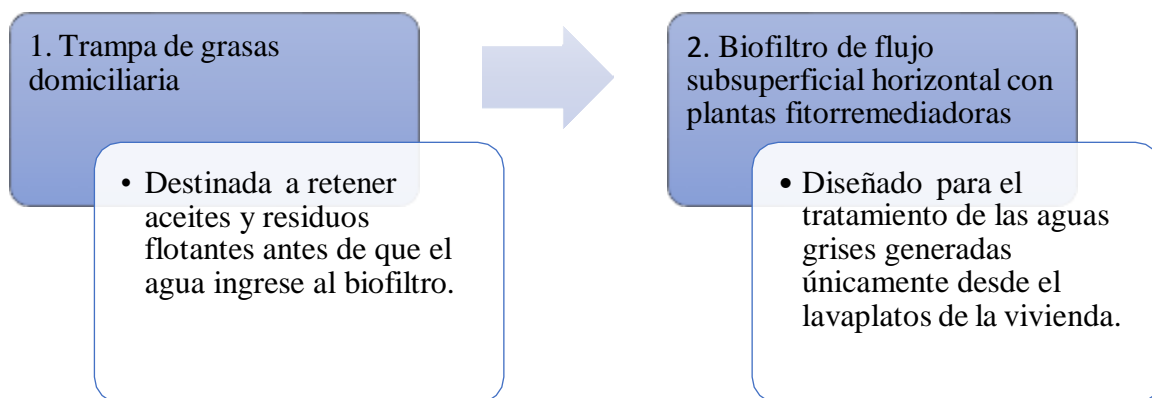


Diagrama 2 Descripción del sistema

Fuente: Autores.

Diseño de la trampa de grasas.

De acuerdo con el Artículo 172 de la Resolución 0330 de 2017, las trampas de grasa deben diseñarse considerando un tiempo de retención hidráulica (TRH) mínimo de 2,5 minutos, una relación largo–ancho entre 1:1 y 3:1, y una profundidad útil no menor de 0,35 m.

En el presente proyecto se adoptó un TRH de 3,3 minutos, valor que supera el mínimo establecido por la norma y asegura un tiempo de permanencia suficiente para favorecer la separación gravitacional de aceites y grasas antes del ingreso del efluente al biofiltro.

Para el prototipo se utilizó un tanque plástico azul de 50 litros fabricado en polietileno de alta densidad (HDPE) material resistente a la corrosión y de fácil mantenimiento.



Ilustración 1 Medidas trampa de grasas

Fuente: Autores

Estructura interna de la trampa de grasas:

- Entrada superior de 3" (PVC) para el ingreso del agua gris.
- Salida inferior conectada al biofiltro mediante una tubería de 3" de PVC.

Diseño del biofiltro de flujo subsuperficial

Para este prototipo se fabricó un tanque rectangular de fibra de vidrio, material seleccionado por su resistencia estructural, impermeabilidad, estabilidad química y facilidad de limpieza.

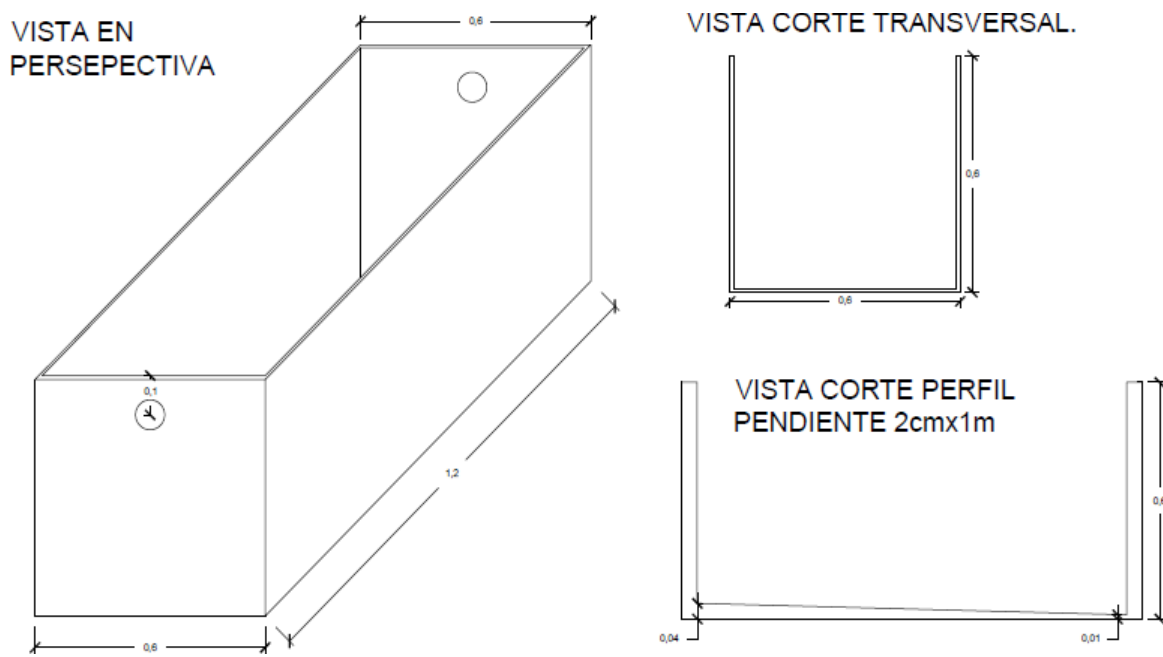


Ilustración 2 Medidas biofiltro antes del ajuste.

Fuente: Autores

Proceso de instalación

La implementación del biofiltro en el sitio requirió el empleo de los siguientes materiales:

- Contenedor rectangular en fibra de vidrio.
- Trampa de grasas
- 2 metros de tubería PVC
- Adaptadores (bujes de diámetro) y codos de PVC
- Plantas fitorremediadoras utilizadas inicialmente: Enea y papiro
- Piedras grandes y pequeñas
- Poli-sombra.

La construcción del sistema se llevó a cabo en el sitio, siguiendo los siguientes pasos: En primer lugar, se realizó la nivelación del terreno para garantizar una base estable; posteriormente, se instaló la trampa de grasas elaborada, la cual se conectó mediante un buje a la tubería e-de

salida del lavaplatos hacia el patio. Luego, se efectuó la adaptación de la tubería, pasando de un diámetro de 3 pulgadas en la salida de la trampa de grasas a una de 1.5 pulgadas que conduce el flujo hacia el biofiltro, ubicado a 2 metros de distancia.

Estructuración interna del biofiltro

- **Capa inferior:** Conformada por piedras grandes que favorecen el drenaje y la aireación.
- **Capa media:** Compuesta por piedras pequeñas que aumentan el área de contacto con el agua y brindan soporte a las plantas desde su raíz, sostenidas por un poli- sombra que evita la obstrucción de las tuberías de entrada y salida.
- **Capa superior:** Integrada por plantas fitorremediadoras sostenidas por las piedras pequeñas, excepto la *Pistia stratiotes* (lechuga de agua), que es una especie predominantemente flotante.

Fase IV Implementación y ajustes del biofiltro

Una vez finalizada la instalación, se realizó una prueba de arranque para verificar el adecuado funcionamiento del sistema

Visita 1

Se efectuó una visita técnica para la toma de muestras y evaluación del sistema en la cual se detectaron dos situaciones críticas:

1. Durante la fase inicial de operación, el punto de salida del biofiltro se encontraba ubicado a una altura superior a la recomendada, lo que generó estancamiento del agua dentro del sistema y condiciones anaerobias, evidenciadas por malos olores, aumento de turbidez y presencia de actividad bacteriana. Como medida correctiva, se realizó la reubicación del punto de salida a nivel de la base del material filtrante, garantizando un flujo continuo y el tiempo mínimo de retención hidráulica requerido. Esta intervención implicó el retiro de la mayoría de las piedras de gran tamaño y el lavado del material filtrante, con el fin de eliminar posibles acumulaciones de biofilm bacteriano que pudieran afectar el desempeño

del sistema.

2. El punto de salida elevado del biofiltro generó estancamiento y condiciones anaerobias (malos olores, turbidez y cultivos bacterianos), lo que requirió ajuste del punto de salida. Que consistió en llevar el punto de salida a ras del piso del biofiltro y elevar un poco el punto de salida para garantizar el tiempo mínimo de retención hidráulica. Esto requirió el retiro de la mayoría de las piedras grandes y el lavado de las piedras que podían mantener adhesiones de biofilm bacteriano.

3. El paso de residuos de comida a la trampa de grasas por falta de una malla en el lavaplatos generó la descomposición de estos en la trampa de grasas. Se realizó recomendación a la propietaria. Posteriormente se instaló una malla para evitar el ingreso de sólidos.

Además de las correcciones realizadas, se incorporaron dos especies vegetales nuevas: junco y lechuga de agua, con el fin de fortalecer el proceso de fitorremediación y evaluar su adaptación al sistema.

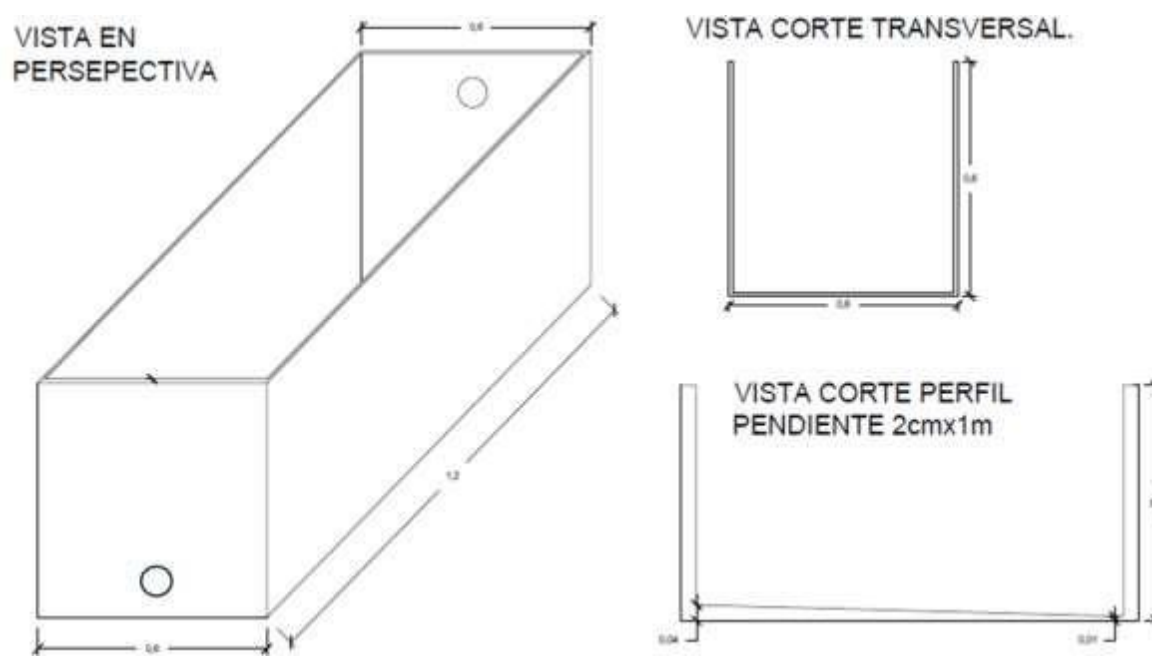


Ilustración 3 Medidas biofiltro luego del ajuste. Obsérvese el cambio del punto de salida del efluente.

Fuente: Autores

Visita 2

Durante la segunda visita técnica se evidenció una mejora significativa en las condiciones del sistema, ya que el biofiltro no presentaba malos olores ni signos de proliferación bacteriana (biofilm). En esta fase se realizó el segundo muestreo para evaluar el desempeño del tratamiento tras las correcciones implementadas.

Fase V. Monitoreo de parámetros de calidad del agua

Toma de muestras: Se realizaron dos monitoreos, tomando muestras tanto en el punto de entrada como en el punto de salida del biofiltro, las cuales se recolectaron en recipientes plásticos esterilizados de 500 ml.

Selección de parámetros: De acuerdo con lo establecido en la Resolución 0330 de 2017, que regula los criterios técnicos para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales, y la Resolución 0631 de 2015, que fija los parámetros de control y los valores máximos permisibles para vertimientos a cuerpos de agua y al alcantarillado, se seleccionaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: turbiedad, pH, sólidos disueltos totales (SDT), cloro residual y conductividad eléctrica.

Turbiedad: Permite evaluar la cantidad de partículas suspendidas en el agua y la eficiencia física del tratamiento. Una disminución en este parámetro refleja la capacidad del biofiltro para remover sólidos mediante procesos de sedimentación, filtración y retención por el sustrato y las raíces.

pH: Según la Resolución 0631 de 2015, es un parámetro obligatorio de control que indica el equilibrio ácido-base del sistema. Mantener valores dentro del rango óptimo (6,0–9,0) garantiza condiciones adecuadas para la actividad microbiana y el crecimiento vegetal.

Sólidos disueltos totales (SDT): Reflejan la concentración de sales minerales, materia orgánica disuelta y compuestos iónicos presentes en el agua. Su comportamiento permite determinar el grado de estabilización del sistema y la acumulación de compuestos provenientes de detergentes o residuos domésticos.

Cloro residual: Su medición es fundamental para identificar la presencia de sustancias oxidantes o restos de agentes de limpieza. Niveles bajos o nulos son deseables, ya que

concentraciones elevadas pueden inhibir la actividad biológica del biofiltro o generar efectos fitotóxicos sobre las plantas.

Conductividad eléctrica: Está relacionada directamente con la concentración de iones disueltos y, por tanto, con los SDT. Es útil para detectar acumulaciones de sales o detergentes que puedan afectar la eficiencia del proceso de fitorremediación y la estabilidad del ecosistema microbiano asociado.

Análisis de laboratorio: Fueron realizados en el laboratorio de la empresa “Drink Food”. En la fase de análisis de laboratorio se emplearon diversos equipos e instrumentos de medición con el propósito de determinar los parámetros fisicoquímicos del agua tratada por el prototipo de biofiltro en dos periodos de monitoreo. Los equipos utilizados pertenecen a la línea HANNA Instruments, reconocida por su precisión en el análisis de la calidad del agua. Cada instrumento permitió obtener valores confiables de turbidez, pH, sólidos suspendidos totales (SST), cloro y conductividad, parámetros fundamentales para evaluar el desempeño y la eficiencia del sistema durante su etapa de funcionamiento.

A continuación, se describen los principales instrumentos empleados y su función dentro del proceso experimental:

1. Medidor portátil de pH y conductividad HANNA Combo (HI 98129)

**Descripción:**

Dispositivo portátil multiparámetro que permite medir pH, conductividad y temperatura de forma simultánea.

Uso en el proyecto:

Se empleó para evaluar el pH y la conductividad del agua en los diferentes puntos del sistema (entrada, trampa de grasas y salida del biofiltro). Estos parámetros fueron claves para determinar la estabilidad química del tratamiento y la presencia de sales o iones disueltos.

2. Turbidímetro portátil HANNA (HI 93703 o similar)

**Descripción:**

Equipo óptico que mide la dispersión de la luz al pasar por una muestra de agua, expresando los resultados en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU).

Uso en el proyecto:

Permitió determinar la turbidez del agua antes y después del biofiltro, indicando la cantidad de partículas en suspensión y la eficiencia de clarificación del sistema.

3. Fotómetro multiparámetro portátil HANNA (HI 83200)

Descripción:

Instrumento digital que utiliza haces de luz a diferentes longitudes de onda para medir la concentración de diversas sustancias químicas en el agua, como cloro, nitratos, fosfatos, entre otros.

Uso en el proyecto:

Se utilizó para medir el contenido de cloro residual en las muestras provenientes de la trampa de grasas y del biofiltro. El principio de funcionamiento se basa en la fotometría de absorción, donde la intensidad del color desarrollado en la muestra indica la concentración del analito.

7. Resultados

Resultados del primer y segundo monitoreo

Se realizaron dos jornadas de monitoreo con el fin de evaluar el desempeño del biofiltro a lo largo del tiempo. El primer monitoreo se efectuó a los 10 días posteriores a la instalación del sistema, momento en el que aún no se había alcanzado el equilibrio biológico ni la adaptación completa de las plantas fitorremediadoras.

Posteriormente, después de siete días de operación adicional se realizaron ajustes al sistema que incluyeron el cambio en el punto de salida del efluente, la instalación de una malla en el lavaplatos para reducir el ingreso de sólidos y la incorporación de nuevas especies vegetales, como Junco y Lechuga de agua con el fin de mejorar los procesos de fitorremediación y aumentar la eficiencia del tratamiento.

Transcurridos ocho días, después de la implementación de estos ajustes se llevó a cabo el segundo monitoreo, cuando el sistema ya presentaba condiciones más estables y un comportamiento hidráulico y biológico más equilibrado.

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2 Resultados obtenidos

Parámetro	Primer Monitoreo (Trampa de grasas)	Primer Monitoreo (Biofiltro)	Segundo Monitoreo (Trampa de grasas)	Segundo Monitoreo (Biofiltro)	Unidad
Turbiedad	194	394	247	124	NTU
pH	6,17	6,53	6,33	6,20	-
Sólidos Disueltos.	0,38	0,75	0,26	0,53	ppt
Cloro	1,04	2,02	1,50	1,13	mg/L
Conductividad	0,77	1,50	0,52	1,07	mS

Cálculo de eficiencia del biofiltro

La eficiencia de remoción se calculó con la fórmula:

$$\% \text{ remoción} = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100$$

Donde:

C_i = concentración inicial (salida trampa de grasas)

C_f = concentración final (salida biofiltro)

(Se utilizó el segundo monitoreo, ya que para ese momento el sistema se encontraba estabilizado.)

Tabla 3 Eficiencia del biofiltro- Monitoreo 2

Parámetro	Trampa (C_i)	Biofiltro (C_f)	Eficiencia (%)
Turbiedad	247 NTU	124 NTU	49,8 %
TDS	0,26 ppt	0,53 ppt	-103,8 % (aumento)
Cloro	1,50 mg/L	1,13 mg/L	24,6 %
Conductividad	0,52 mS	1,07 mS	-105,7 % (aumento)
pH	-	-	Estable

En el segundo monitoreo que representa el desempeño del sistema tras su estabilización, se observó una eficiencia de remoción del **49,8 %** en turbidez, lo que evidencia una mejora notable en la claridad del agua tratada. Esta reducción se atribuye a la mayor retención de partículas suspendidas mediante procesos físicos de filtración, sedimentación y absorción a través de las raíces de las plantas y las superficies de las piedras.

En cuanto al cloro residual, se registró una disminución del **24,6 %**, asociada a procesos de volatilización y absorción por la materia orgánica del medio filtrante.

Por el contrario, los sólidos disueltos totales (SDT) y la conductividad mostraron incrementos de **-103,8 % y -105,7 %**, respectivamente, lo que podría deberse a la descomposición de materia orgánica o a la liberación de sales minerales provenientes del sustrato o del biofilm en formación. Este tipo de comportamiento es común en fases tempranas de estabilización, cuando el sistema aún ajusta su equilibrio fisicoquímico y biológico.

El pH se mantuvo en valores cercanos a la neutralidad entre 6,2 y 6,3 rango adecuado para el desarrollo de las plantas y microorganismos presentes en el biofiltro.

Evolución del biofiltro entre Monitoreo 1 → 2

Se evalúa el desempeño del biofiltro en el tiempo.

$$\text{Variación temporal (\%)} = \left(\frac{M1 - M2}{M1} \right) * 100$$

Tabla 4 Variación temporal del biofiltro (M1 vs M2)

Parámetro	Biofiltro M1	Biofiltro M2	Variación (%)
Turbidez	394	124	68,5 % reducción
SDT	0,75	0,53	29,3 % reducción
Cloro	2,02	1,13	44,0 % reducción
Conductividad	1,50	1,07	28,7 % reducción
pH	6,53	6,20	5,0% Leve descenso

Al comparar el desempeño del biofiltro entre los dos monitoreos se observa una evolución positiva del sistema. La turbidez se redujo en un 68,5 %, los SST en un 29,3 %, el cloro en un 44 % y la conductividad en un 28,7 %. Estos resultados indican que, luego de los ajustes realizados, el biofiltro mejoró significativamente su eficiencia, reflejando la adaptación de las plantas fitorremediadoras, el establecimiento del biofilm microbiano y una mayor estabilidad hidráulica.

El ligero descenso del pH de 6,53 a 6,20 se asocia con la actividad metabólica de los microorganismos y la liberación de compuestos orgánicos durante la descomposición de la materia retenida sin representar afectaciones negativas al sistema.

Aunque algunos parámetros, como los sólidos disueltos totales y la conductividad, presentaron aumentos puntuales, estos se asocian a procesos naturales de estabilización del medio filtrante y al desarrollo del biofilm. En conjunto, el comportamiento observado confirma que el sistema evolucionó favorablemente, alcanzando un funcionamiento más estable, eficiente y coherente con los principios de tratamiento natural mediante fitorremediación.

La Resolución 631 de 2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los parámetros y valores máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y al alcantarillado público. En el caso de las aguas residuales domésticas, el Artículo 8 define límites para parámetros como pH, sólidos suspendidos totales (SST), grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), entre otros.

Si bien el presente proyecto se centró en parámetros básicos de calidad como turbidez, pH, sólidos disueltos totales (SDT), cloro residual y conductividad, el análisis comparativo permite identificar la correspondencia y cumplimiento parcial frente a los lineamientos de la norma, en los aspectos aplicables:

Tabla 5 Análisis comparativo con la Resolución 631 de 2015 – Artículo 8

Parámetro	Resolución 631 de 2015 (Art. 8) – Valores de referencia para vertimientos domésticos	Resultado del biofiltro (Monitoreo 2)	Cumplimiento
pH	Entre 6,0 y 9,0 unidades	6,20	Cumple. El valor se mantiene dentro del rango permitido

Los resultados obtenidos permiten concluir que el sistema de biofiltración con Junco y Lechuga de agua cumple con los lineamientos básicos establecidos por la Resolución 631 de 2015 en cuanto a pH, mostrando además una tendencia favorable hacia la depuración progresiva del agua. No obstante, para garantizar el cumplimiento total de los límites normativos de vertimiento, sería necesario incluir la medición de parámetros adicionales exigidos por la norma, como DBO₅, DQO, SST y grasas y aceites, en futuros monitoreos.

8. Conclusiones

El sistema de tratamiento propuesto basado en un biofiltro con plantas fitorremediadoras demostró ser una alternativa viable y sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de actividades de cocina. A pesar de desarrollarse a escala piloto, los resultados evidencian su potencial para reducir contaminantes físicos y químicos de manera progresiva. El biofiltro alcanzó su mayor eficiencia en la segunda etapa de monitoreo luego de ser objeto de ajustes de diseño, con reducciones del 49,8 % en turbidez, 44 % en cloro y 28,7 % en conductividad, lo que indica que el sistema sigue un proceso de estabilización tras los ajustes. Los ajustes consistieron en el cambio del punto de salida del efluente del biofiltro, la instalación de una malla en el lavaplatos para prevenir la introducción al sistema de sólidos, y la reconfiguración de los sustratos (eliminación de grandes rocas debido a la reducción de altura del punto de salida del efluente); y la incorporación de nuevas especies fitorremediadoras (Junco y Lechuga de agua) que pudieron influenciar un impacto positivo en el desempeño general del sistema, favoreciendo la aireación, la distribución del flujo y la eficiencia de remoción.

Los incrementos observados en los sólidos disueltos totales y en la conductividad durante el segundo monitoreo no representan un fallo del sistema, sino un comportamiento propio de la fase de estabilización, en la cual se liberan sólidos finos y sales disueltas como resultado de la descomposición de materia orgánica y la formación del biofilm. En conjunto, el comportamiento de los resultados de los parámetros fisicoquímicos analizados del efluente, indica que el biofiltro mantiene una efectividad de los procesos naturales de filtración, sedimentación y muy posiblemente fitorremediación, alcanzando un funcionamiento estable y eficiente en un periodo corto de tiempo, lo que respalda la aplicabilidad de este tipo de sistemas en contextos domésticos o rurales donde no cuentan con conexión a sistemas de alcantarillado.

En cuanto al comportamiento individual de los parámetros evaluados, la turbidez mostró una reducción constante a lo largo del tiempo, lo que evidencia la eficiencia del sistema en la remoción de partículas suspendidas mediante procesos de filtración, sedimentación y acción biológica de las plantas. Del mismo modo en que el cloro residual disminuyó de manera progresiva debido principalmente a su volatilización y a la absorción por la materia orgánica y las raíces, lo que refleja una depuración más estable en la segunda etapa. Por otro lado, la conductividad y los sólidos disueltos totales (TDS) presentaron incrementos iniciales propios del periodo de maduración del biofiltro, asociados a la liberación de sales minerales y a la descomposición de materia orgánica. Sin embargo, estos valores tienden a estabilizarse conforme el sistema alcanza su equilibrio biológico. Por su parte, el pH se mantuvo dentro del rango óptimo para la actividad microbiana y el crecimiento vegetal (6,2–6,3), lo que demuestra un medio químicamente estable y adecuado para la continuidad del proceso de fitorremediación.

Con el tiempo y la operación continua del sistema, se espera que la remoción de turbidez y cloro mejore de forma gradual, impulsada por la consolidación del biofilm y la madurez del ecosistema microbiano asociado al biofiltro. De igual manera, los valores de conductividad y SDT tenderán a estabilizarse a medida que disminuya la liberación de sales del sustrato, logrando un equilibrio entre los procesos de disolución y retención. El pH probablemente se mantendrá estable en el rango neutro, reflejando la autorregulación del sistema y su adaptación a las condiciones naturales de operación. En conjunto, este comportamiento sugiere una mejora progresiva en la calidad del efluente y una mayor eficiencia de remoción a medida que el biofiltro madura biológica y estructuralmente.

9. Recomendaciones

- Realizar mantenimiento periódico al biofiltro, incluyendo la limpieza de la malla instalada en el lavaplatos, para evitar obstrucciones y mantener la eficiencia hidráulica y de tratamiento.
- Continuar evaluando el biofiltro por un periodo mayor, realizando nuevos monitoreos con el fin de permitir una mayor estabilización biológica y obtener resultados más representativos del comportamiento del biofiltro a largo plazo.
- Evaluar también el desarrollo en el biofiltro de las diferentes especies fitorremediadoras, considerando su adaptación a las condiciones climáticas locales, velocidad de crecimiento y capacidad de absorción de contaminantes, con el fin de optimizar la eficiencia del proceso de tratamiento.
- Dar continuidad al seguimiento del sistema en el tiempo, mediante el monitoreo periódico de los parámetros establecidos en la Resolución 0631 de 2015 (pH, DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, entre otros), con el fin de identificar tendencias de estabilización, posibles ajustes en el flujo hidráulico y requerimientos de mantenimiento, asegurando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

10. Referencias

- Ali, M., Aslam, A., Qadeer, A., Javied, S., Nisar, N., Hassan, N., Hussain, A., Ali, B., Iqbal, R., Chaudhary, T., Alwahibi, M. S., & Elshikh, M. S. (2024). Domestic wastewater treatment by *Pistia stratiotes* in constructed wetland. *Scientific Reports 2024 14:1*, 14(1), 1–13.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-57329-y>
- Amarilla, S., Samudio-Oggero, A., Nakayama, H. D., Avalos, C., Méndez, C., & Ries, A. (2024). Development of a protocol with *Typha domingensis* Pers. for the treatment of wastewater from paper recycling. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9(100628), 100628. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100628>
- Arivukkarasu, D., & Sathyanathan, R. (2024). A sustainable green solution to domestic sewage pollution: Optimizing floating wetland treatment with different plant combinations and growth media. *Water Cycle*, 5, 185–198. <https://doi.org/10.1016/J.WATCYC.2024.05.002>
- Ballen Garzón, J. V. (2023). *Revisión de plantas fitorremediadoras con capacidad de remoción de plomo en cuerpos de agua*. [Universidad Cooperativa de Colombia].
<https://repository.ucc.edu.co/items/83e7ac6f-3ad9-4a14-8d9b-6835125ade9f>
- Buslima, F. A., Abu Hasan, H., Alias, J., Jaganathan, J. S., Buhari, J., Subramanian, S. V., & Abdullah, S. R. S. (2025). Performance of Integrated Biofilm-Phytoremediation Process in Reclaiming Water from Domestic Wastewater. *Water 2025*, Vol. 17, Page 163, 17(2), 163.
<https://doi.org/10.3390/W17020163>
- Buslima, F. A., Abu Hasan, H., Sheikh Abdullah, S. R., & Othman, A. R. (2024). Water recovery from domestic wastewater using integrated biofilm-phytoremediation technology: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105875.
<https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2024.105875>

- Chávez Arenas, F. Beatriz. (2023). *Métodos de fitorremediación en aguas residuales municipales y domésticas*. [Profesional.]. Universidad Católica de Santa María.
- Coleman, J., Hench, K., Garbutt, K., Sexstone, A., Bissonnette, G., & Skousen, J. (2001). Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 128(3–4), 283–295.
<https://doi.org/10.1023/A:1010336703606/METRICS>
- Darío, R., Acosta, L., Beltrán, C., & Aníbal, J. (2025). Eficacia de fitorremediación de las especies *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* en las aguas de la subcuenca del río Pinto, de la Amazonía ecuatoriana. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 6624–6635. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V9I1.16362
- Domínguez-Solís, D., Martínez-Rodríguez, M. C., Ramírez-Escamilla, H. G., Campos-Villegas, L. E., & Domínguez-Solís, R. (2025). Constructed Wetlands as a Decentralized Treatment Option for Domestic Wastewater: A Systematic Review (2015–2024). *Water* 2025, Vol. 17, Page 1451, 17(10), 1451. <https://doi.org/10.3390/W17101451>
- FAO. (2013). *Tecnologías para el uso sostenible del agua, una contribución a la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático*. ISBN 978-92-5-307930-8.
- Guanin Pallasco, L. C., & Reatiqui Chiluisa, D. N. (2022). *Eutrofización de aguas residuales domiciliarias con absorción biológica de nitrógeno y fósforo, sector San José de Pichul, período 2021 – 2022*. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/8081820>
- Guevara, J., López, A., Chérrez, D., Choque, E., & Núñez, G. (2024). Enhancement of Domestic Wastewater Treatment Plants Employing *Eichhornia crassipes* Biofilters. *ETCM 2024 - 8th Ecuador Technical Chapters Meeting*. <https://doi.org/10.1109/ETCM63562.2024.10746079>
- Hamad, M. T. M. H. (2023). Comparing the performance of *Cyperus papyrus* and *Typha domingensis* for the removal of heavy metals, roxithromycin, levofloxacin and pathogenic

bacteria from wastewater. *Environmental Sciences Europe* 2023 35:1, 35(1), 1–25.

<https://doi.org/10.1186/S12302-023-00748-X>

Haro, J., Toscano, J. R., & Alvites, J. R. (2023). Reducción de la materia orgánica de las aguas residuales del camal municipal de supe, mediante plantas Fitorremediadoras a escala piloto.

Repositorio UNJFSC. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/7519>

Monzón-Reyes, B. L., González-Moreno, H. R., Month, A. E. Á., Peralta Vega, A. J., Ballut-Dajud, G., & Sandoval Herazo, L. C. (2025). Wastewater Management Strategies in Rural Communities Using Constructed Wetlands: The Role of Community Participation. *Earth* 2025, Vol. 6, Page 18, 6(2), 18. <https://doi.org/10.3390/EARTH6020018>

Moreno Henao, L. J. (2024). *Diseño de un sistema de biofiltración para el tratamiento de aguas residuales domésticas de una vivienda sin sistema de alcantarillado*.

<http://repository.unad.edu.co/handle/10596/65478>

Muguirrima, P. V. M., Chirinza, N. P., León Zerpa, F., & Mendieta Pino, C. A. (2024).

Treatment of domestic effluents using sustainable biofilter methods. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100266. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100266>

ONU. (2016, January 6). *Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible*.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Ortigoza, G. K. B., & Corredor, C. S. M. (2021). *Análisis de alternativas para la descontaminación de aguas residuales de orígenes domiciliarios y contaminadas con metales pesados mediante el uso de humedales artificiales y Macrófitas* [Especialización.].

Universidad Santo Tomás.

Pérez, P., Maylee, K., Sandoval, S., Kiara, A., Ordóñez Sánchez, M., & Alberto, L. (2023).

Tratamiento de aguas de efluentes domésticas, con sistemas de biofiltros, Chontamuyo,

Banda de Shilcayo, 2023. *Repositorio Institucional - UCV*.

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/134537>

Rodríguez Miranda, J. P., García-Ubaque, C. A., & García-Ubaque, J. C. (2016). Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia. *Revista de Salud Pública*, 18(5), 738–745. <https://doi.org/10.15446/RSAP.V18N5.54869>

Sengorur, Bulent., & Ozdemir, Saim. (2006). Performance of a constructed wetland system for the treatment of domestic wastewater. *Fresenius Environmental Bulletin*, 15(3), 242–244. https://www.researchgate.net/publication/270159070_Performance_of_a_constructed_wetland_system_for_the_treatment_of_domestic_wastewater

Sierra Mesa, J. F. (2007). *Tratamiento y reutilización de aguas grises en proyectos de vivienda de interés social a partir de humedales artificiales* <https://hdl.handle.net/1992/9493>

SSPD, S. D. S. P. DOMICILIARIOS. (2019). *Informe Nacional De Coberturas De Los Servicios Públicos De Acueducto Y Alcantarillado- 2019*.

UNAL. (2024, September 26). *Desigualdad de acceso a agua potable en Colombia alcanza un 25 % entre zonas urbanas y rurales*. <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/desigualdad-de-acceso-a-agua-potable-en-colombia-alcanza-un-25-entre-zonas-urbanas-y-rurales>

Valverde Quispe, F. Andrea. (2021). *Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante el uso de humedales artificiales mejorados con las especies *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis** [Profesional]. Universidad Científica del Sur.

Zambrano Intriago, H. A. (2023). *Diseño de un Biofiltro utilizando *Lemna Minor* (Lenteja de agua) y *Eichhornia Crassipes* (Jacinto de agua) para la captación de metales pesados (CD,*

CR Y PB) del Ramal B del estero salado Guayaquil-Ecuador.

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26282>

ANEXOS



