

Evaluación a escala piloto de un filtro percolador para el tratamiento de aguas grises domésticas

Pilot-scale evaluation of a trickling filter for domestic greywater treatment

Deisi Delgado Fernández^{1*} , Omar Jesús Quintana Canlla¹ ,
Mirtha Felicita Valverde Vera¹ 

1 Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto, Perú.



Citar como: Delgado Fernández, D. *et al.* (2026). «Evaluación a escala piloto de un filtro percolador para el tratamiento de aguas grises domésticas». *South Sustainability*, 7(1), e145.
DOI: 10.21142/SS-0701-2026-e145

Recibido: 16/1/2026
Revisado por pares
Aceptado: 21/4/2026



© Los autores, 2026. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
ddelgadof@alumno.unsm.edu.pe

Editor asociado:
John Flores-Alvarez

RESUMEN

El tratamiento inadecuado de las aguas grises domésticas constituye un problema ambiental creciente en zonas urbanas con limitada infraestructura de saneamiento. Este estudio evaluó, a escala piloto, el desempeño de un filtro percolador para el tratamiento de aguas grises domésticas en Moyobamba (Perú). El sistema fue construido con materiales locales y operado bajo condiciones reales de generación en una vivienda unifamiliar. El monitoreo se realizó en cuatro periodos (30, 45, 60 y 93 días), mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, incluyendo pH, turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), coliformes termotolerantes, nitratos, fosfatos y temperatura. Cada periodo correspondió a una campaña de muestreo con una muestra compuesta de afluente y efluente, sin réplicas analíticas ni experimentales adicionales, por lo que los resultados deben interpretarse como representativos de cada condición evaluada. En términos generales, se observaron reducciones en turbidez (68,9 %-97,1 %), SST (66,7 %-98,5 %) y DBO₅ (57,3 %-91,3 %), así como disminuciones en coliformes termotolerantes, mientras que los nitratos y fosfatos presentaron mayor variabilidad. El pH y la temperatura se mantuvieron relativamente estables durante el periodo de evaluación. En conjunto, los resultados sugieren que el filtro percolador puede contribuir a la mejora de la calidad de las aguas grises domésticas en esquemas descentralizados, aunque se requieren estudios con mayor replicación para confirmar su desempeño bajo distintas condiciones operativas.

Palabras clave: *aguas grises domésticas, filtro percolador, manejo de residuos domésticos, tratamiento descentralizado, tratamiento del agua*

ABSTRACT

Inadequate treatment of domestic greywater constitutes a growing environmental concern in urban areas with limited sanitation infrastructure. In this study, we evaluated, at pilot scale, the performance of a trickling filter for the treatment of domestic greywater in Moyobamba, Peru. The system was constructed using locally available materials and operated under real household conditions in a single-family dwelling. Monitoring was conducted over four operational periods (30, 45, 60 and 93 days), through the analysis of physicochemical and microbiological parameters, including pH, turbidity, total suspended solids (TSS), biochemical oxygen demand (BOD₅), thermotolerant coliforms, nitrates, phosphates and temperature. Each period corresponded to a sampling campaign using composite influent and effluent samples, without additional analytical or experimental replicates; therefore, the results should be interpreted as representative of each evaluated condition. Overall, reductions were observed in turbidity (68.9–97.1%), TSS (66.7–98.5%) and BOD₅ (57.3–91.3%), along with decreases in thermotolerant coliforms, while nitrates and phosphates showed greater variability. Both pH and temperature remained relatively stable throughout the evaluation period. Taken together, the results suggest that a trickling filter can contribute to improving greywater quality in decentralized systems; however, further studies with greater replication will be required, in order to confirm performance under different operating conditions.

Keywords: *Domestic greywater, domestic waste management, trickling filter, decentralized treatment, water treatment*



1. Introducción

La gestión de las aguas residuales domésticas constituye un desafío ambiental creciente, impulsado por la urbanización, el aumento del consumo hídrico y la limitada cobertura de saneamiento. En este contexto, la reutilización de aguas grises emerge como una alternativa viable para reducir la demanda de agua potable en usos no potables y disminuir la carga sobre los sistemas convencionales, siempre que se garantice la calidad del efluente y se controlen los riesgos sanitarios (Budeli y Sibali, 2025; Ramazan *et al.*, 2025). Asimismo, el interés científico en este campo ha aumentado, con énfasis en la caracterización del recurso, el desarrollo tecnológico y la gestión del reúso (Yáñez *et al.*, 2024).

El tratamiento descentralizado de aguas grises a nivel domiciliario ha sido ampliamente estudiado debido a su viabilidad técnica, aceptación social y beneficios económicos (Vuppaladiyam *et al.*, 2019; Thaher *et al.*, 2020). Además, la separación de corrientes en aguas grises y negras reduce la carga hidráulica en sistemas centralizados y favorece soluciones más flexibles y resilientes (Bajpai *et al.*, 2020; Rabaey *et al.*, 2020; Van de Walle *et al.*, 2022). Sin embargo, aunque las aguas grises presentan menor carga contaminante que las aguas residuales domésticas, su composición es altamente variable, incluyendo materia orgánica, sólidos suspendidos, surfactantes y microorganismos, lo que condiciona la eficiencia de los sistemas de tratamiento (Hernández Leal *et al.*, 2011; Ferreira *et al.*, 2023; Shaikh y Ahammed, 2020).

Diversas tecnologías han sido evaluadas para su tratamiento, incluyendo procesos físicos, fisicoquímicos y biológicos, así como sistemas híbridos. No obstante, su desempeño depende de las condiciones operativas, el tren de tratamiento y el uso final del agua (Halwani *et al.*, 2018; Galvão *et al.*, 2024). En particular, los sistemas descentralizados basados en filtración han mostrado buenos resultados en la remoción de turbidez, sólidos y materia orgánica; sin embargo, presentan limitaciones en la estabilidad microbiológica y en la remoción de nutrientes, lo que en muchos casos requiere etapas complementarias (Hassan *et al.*, 2024). Asimismo, la selección del medio filtrante influye significativamente en el rendimiento del sistema, al evidenciar diferencias según la naturaleza de los materiales utilizados (Anangadan *et al.*, 2024).

Dentro de estas alternativas, los filtros percoladores destacan por su simplicidad operativa, bajo consumo energético y adaptación a contextos descentralizados. Estos sistemas, basados en biopelículas, favorecen la degradación aerobia de la materia orgánica y la retención de sólidos, aunque su desempeño puede variar según la carga hidráulica y orgánica aplicada (Metcalf & Eddy, 2015; Gupta *et al.*, 2023; Polo *et al.*, 2024). A pesar de los avances reportados, existe una brecha en la evaluación de

estos sistemas a escala piloto bajo condiciones reales de generación de aguas grises, especialmente en contextos urbanos con limitaciones de saneamiento, donde la variabilidad del influente puede afectar su desempeño.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar, a escala piloto, el desempeño de un filtro percolador en el tratamiento de aguas grises domésticas, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos antes y después del proceso. El estudio se desarrolló bajo condiciones reales de generación de aguas grises, con el fin de analizar el comportamiento del sistema frente a la variabilidad del influente y aportar evidencia sobre su aplicabilidad en esquemas descentralizados de tratamiento.

2. Materiales y métodos

Área de estudio y origen de las aguas grises

El estudio se desarrolló en la región San Martín, provincia y distrito de Moyobamba (Perú), específicamente en el barrio Lluyllucucha. La zona presenta topografía irregular con presencia de barrancos y un clima tropical húmedo. La planta piloto del filtro percolador fue instalada en el área posterior de una vivienda unifamiliar, en un espacio disponible aproximado de 9 m², representativa de un contexto urbano con acceso limitado o no continuo al sistema de alcantarillado.

Las aguas grises provinieron exclusivamente de descargas domésticas de ducha, lavamanos, lavaplatos y lavadero, sin incluir inodoro ni aportes de aguas negras. El afluente corresponde a una mezcla combinada de estos puntos, captada aguas abajo de las salidas internas de la vivienda y conducida por tubería hacia el sistema piloto. No se incorporaron efluentes industriales ni de terceros. La composición del afluente refleja el uso habitual de la vivienda (jabones, detergentes y restos orgánicos ligeros), sin alteración de hábitos de consumo durante el periodo de estudio.

El sistema operó con generación intermitente, propia de las actividades domésticas diarias, por lo que el caudal y la carga presentan variabilidad intradía. El afluente ingresó al sistema en condiciones crudas (sin tratamiento previo distinto al pretratamiento del sistema), lo que asegura que las características del agua tratada sean representativas del contexto local. Estas condiciones definen un influente típico de aguas grises domiciliarias y permiten la replicabilidad del estudio en escenarios urbanos similares.

Diseño experimental

Se aplicó un diseño cuasi experimental longitudinal con evaluación pre y postratamiento. La variable independiente fue el filtro percolador a escala piloto, mientras que la variable dependiente fue la eficiencia de remoción de contaminantes. Se analizaron como

variables de respuesta pH, turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5), nitratos, fosfatos y coliformes termotolerantes. Como variables intervinientes se consideraron el tiempo de funcionamiento del sistema y las condiciones ambientales.

El periodo experimental se desarrolló entre julio de 2023 y marzo de 2024 e incluyó las fases de diseño, construcción, instalación y evaluación del sistema mediante campañas periódicas de muestreo.

Diseño y construcción del sistema piloto

El sistema de tratamiento estuvo conformado por una unidad de pretratamiento (tanque de arranque y sedimentador) y una unidad de tratamiento secundario consistente en un filtro percolador. El dimensionamiento se realizó mediante una memoria de cálculo en Microsoft Excel, considerando criterios del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE OS.090 y OS.100), el número promedio de habitantes por vivienda (6 personas), la dotación hídrica para clima templado-cálido y el caudal doméstico estimado. Con base en estos parámetros, se obtuvo un caudal de diseño de $0,02 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$.

El diseño geométrico de la planta piloto se elaboró en AutoCAD. El filtro percolador se construyó en un recipiente plástico (timbo) de 30 L, con un diámetro aproximado de 0,335 m y una altura útil de 0,39 m. El sistema fue instalado sobre una estructura escalonada de madera de cuatro niveles (100 cm, 85 cm, 68 cm y 45 cm), con espaciamientos de 50 cm, 80 cm, 65 cm y 75 cm, respectivamente, con la finalidad de asegurar el flujo descendente por gravedad entre los componentes. El volumen útil del reactor permitió estimar un tiempo de retención hidráulica (TRH) aproximado de 25 minutos, calculado a partir del caudal de operación.

El lecho filtrante se dispuso en capas estratificadas de granulometría decreciente, colocadas de abajo hacia arriba en el siguiente orden: piedra de canto rodado (35 mm), grava mediana (19 mm), grava fina (12 mm), carbón vegetal (25 mm), carbón activado (2 mm) y arena cuarzosa (1,5 mm). Cada capa presentó un espesor aproximado entre 3 y 10 cm, hasta alcanzar una altura total del lecho cercana a 0,20-0,25 m. Todos los materiales fueron previamente lavados con agua potable, secados al ambiente y acondicionados antes de su colocación. Los materiales filtrantes fueron obtenidos de fuentes locales, incluyendo río, canteras y proveedores comerciales.

La conexión hidráulica se realizó mediante tuberías de PVC de $\frac{1}{2}$ " y 2", utilizando accesorios como codos de 90° , tees, nipples, uniones universales y válvulas tipo bola para el control del flujo. La entrada al filtro se ubicó a 7 cm del borde superior y la salida a 3 cm de la base. Sobre la capa superior se instaló un difusor rectangular de $0,20 \times 0,30 \times 0,03 \text{ m}$, diseñado para distribuir uniformemente el afluente sobre toda la superficie del lecho filtrante. El sistema operó bajo un régimen de alimentación intermitente, con una frecuencia aproximada de una a dos veces por día, simulando descargas domésticas reales.

El proceso constructivo incluyó la limpieza y replanteo del terreno en un área disponible de aproximadamente 9 m^2 , ubicada en la parte posterior de la vivienda en el jirón San Francisco, distrito de Moyobamba. Se construyó una tarima de madera como soporte estructural, utilizando listones de diferentes longitudes, clavos de acero, abrazaderas y herramientas manuales. Posteriormente, se realizó la instalación de los componentes hidráulicos y la incorporación de las capas filtrantes.

Cabe señalar que, en sistemas de filtración biológica, el tiempo de contacto efectivo no depende únicamente del TRH, sino también de la dinámica del biofilm,

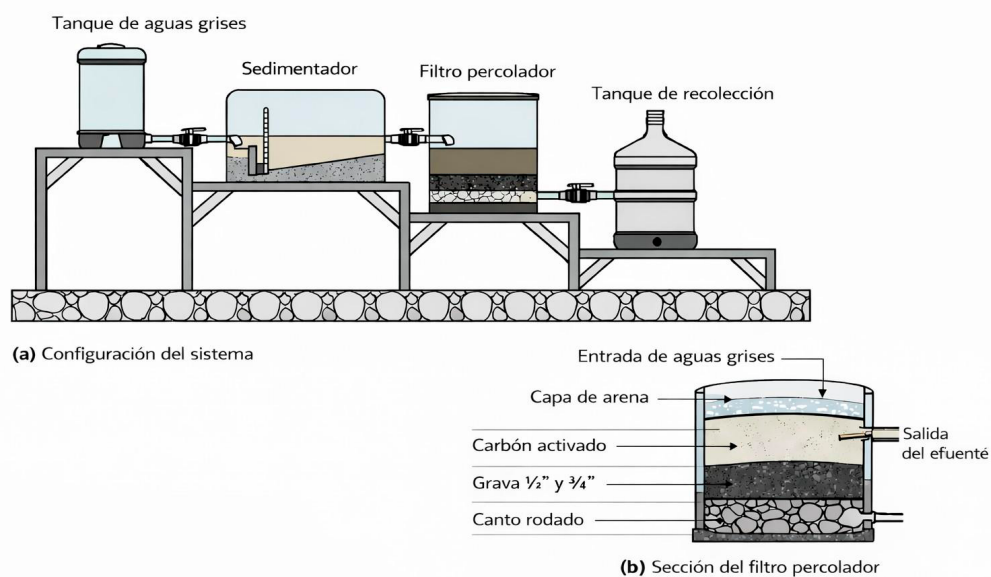


Figura 1. Esquema del sistema de tratamiento de aguas grises: (a) configuración del sistema y (b) sección del filtro percolador

el cual influye en la retención de partículas y en la degradación de la materia orgánica. En este sentido, las condiciones de operación, la frecuencia de alimentación y las características del medio filtrante son factores determinantes en el desempeño del sistema. Por ello, los parámetros descritos permiten establecer condiciones reproducibles para la evaluación del filtro percolador a escala piloto.

Muestreo y preservación de muestras

Las campañas de muestreo se realizaron a los 30, 45, 60 y 93 días de funcionamiento del sistema. En cada campaña se recolectaron muestras del afluente (entrada) y del efluente (salida) del filtro percolador. Cada muestra correspondió a una muestra compuesta, obtenida mediante la integración de submuestras recolectadas durante el periodo de operación diaria, con el fin de representar la variabilidad del influente generado en la vivienda.

Los volúmenes recolectados por campaña fueron de 1000 mL para DBO₅, 125 mL para nitratos y fosfatos, 250 mL para coliformes termotolerantes, 400 mL para SST, pH y turbidez, y 125 mL para temperatura, y alcanzaron un volumen total aproximado de 1900 mL por punto de muestreo (afluente y efluente). Cada determinación analítica se realizó como una medición por parámetro y por tiempo, sin réplicas experimentales; por tanto, los resultados deben interpretarse como representativos de cada campaña de muestreo.

Las muestras se recolectaron utilizando equipos de protección personal, se almacenaron en envases esterilizados y se transportaron en un cooler con gel refrigerante, manteniendo la cadena de frío hasta su análisis. El procesamiento de las muestras se realizó en el menor tiempo posible para minimizar alteraciones en sus características fisicoquímicas y microbiológicas.

Métodos de análisis fisicoquímicos y microbiológicos

La caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas grises se realizó antes y después del tratamiento. El pH se determinó por método electrométrico utilizando un pH-metro Oakton PH450. La turbidez se midió por método nefelométrico con un turbidímetro Hanna. Los sólidos suspendidos totales se cuantificaron mediante método fotométrico con un multiparámetro HACH DR900, previa calibración de los equipos.

La DBO₅ se determinó mediante el método respirométrico estándar. Los nitratos y fosfatos se cuantificaron por métodos espectrofotométricos. Los coliformes termotolerantes se analizaron mediante el método del número más probable (NMP). Los análisis de pH, turbidez y SST se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Nacional de San Martín, mientras que los análisis de DBO₅, nutrientes y

coliformes se efectuaron en el laboratorio acreditado Loayza Murakami S. A. C.

Cálculo de la eficiencia de remoción

La eficiencia de remoción de cada parámetro se calculó mediante la expresión:

$$\%E.R = \frac{(Concentración_{entrada} - Concentración_{salida})}{Concentración_{entrada}} \times 100$$

Los resultados obtenidos fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales y con los Estándares de Calidad Ambiental para agua, categoría 4, con la finalidad de evaluar el comportamiento ambiental del efluente tratado.

Análisis estadístico de los datos

Los datos obtenidos fueron organizados en tablas y representados mediante gráficos de evolución temporal, con el propósito de describir el comportamiento del sistema durante el periodo de operación. Se aplicó estadística descriptiva, incluyendo promedios, rangos (mín-máx) y análisis de tendencias, lo que permitió evaluar la variación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en las condiciones de afluente y efluente.

El análisis se centró en la comparación entre los valores antes y después del tratamiento, así como en la variación relativa de los parámetros a lo largo de los distintos periodos de evaluación. Este enfoque permitió interpretar el desempeño del filtro percolador en función de su comportamiento temporal y de la respuesta del sistema frente a las condiciones de operación.

Consideraciones éticas y bioseguridad

La investigación se desarrolló con autorización del propietario del predio. Durante todas las etapas se aplicaron medidas de bioseguridad, que incluyeron uso de equipos de protección personal, manipulación segura de muestras, desinfección de materiales y disposición adecuada de residuos. Se respetaron los principios éticos de investigación científica, para garantizar la veracidad de los datos y el manejo responsable de la información.

3. Resultados

Evolución temporal de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos antes y después del tratamiento

La figura 1 muestra la evolución temporal de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del efluente a los 30, 45, 60 y 93 días, considerando condiciones antes y después del tratamiento. En términos generales, los resultados evidencian diferencias consistentes entre valores iniciales y finales, lo que sugiere una mejora progresiva en la calidad del agua. A los 30 y 45 días,

se observan reducciones marcadas en turbidez, SST, coliformes termotolerantes y DBO_5 , con descensos notables entre condiciones iniciales y finales. Asimismo, en estos periodos se registran disminuciones en nitratos y valores cercanos a cero en fosfatos, que indican una tendencia favorable en la remoción de estos parámetros.

En los tiempos de 60 y 93 días, se mantienen diferencias entre valores antes y después del tratamiento, aunque con mayor variabilidad. La turbidez, los SST, los coliformes y la DBO_5 continúan mostrando reducciones, pero con menor uniformidad en comparación con los primeros periodos. Esto sugiere que el sistema mantiene su capacidad de tratamiento, aunque su desempeño puede verse influenciado por cambios en las condiciones operativas o

en la composición del influente. En este mismo periodo, los nitratos presentan variaciones entre condiciones iniciales y finales, mientras que los fosfatos permanecen en concentraciones bajas.

Por otro lado, el pH muestra incrementos en los valores posteriores, que alcanzan niveles ligeramente alcalinos, y ello sugiere cambios en las condiciones fisicoquímicas del sistema más que un proceso de remoción. La temperatura presenta variaciones mínimas entre valores antes y después, lo que indica estabilidad térmica durante el tratamiento. En conjunto, los resultados indican una tendencia general de mejora en parámetros clave, aunque con variabilidad en algunos casos, lo cual es coherente con la dinámica de sistemas biológicos en operación.

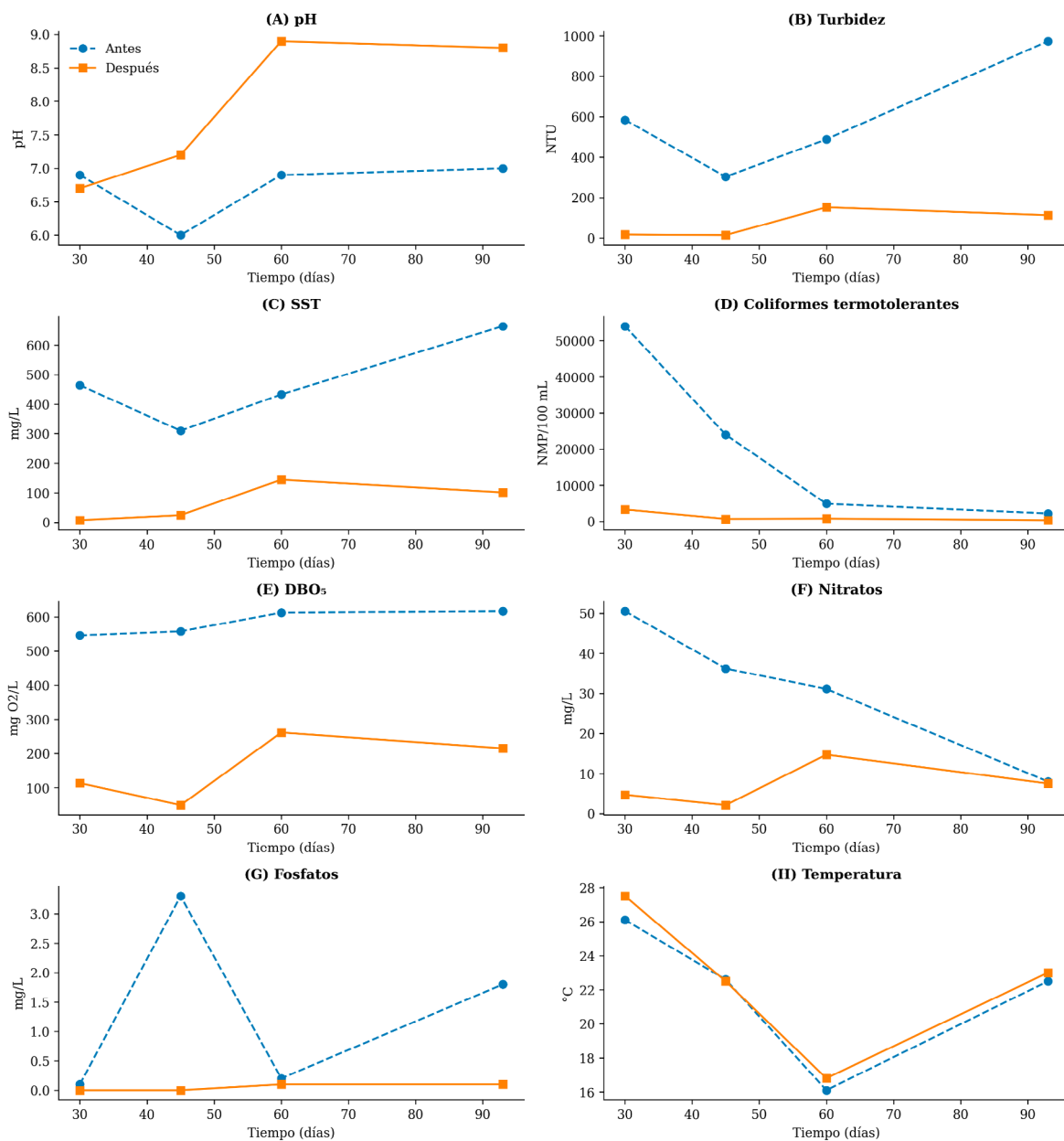


Figura 2. Evolución temporal de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos antes y después del tratamiento

Análisis de la eficiencia de remoción del sistema de filtración biológica a escala piloto

La variación relativa del filtro percolador en la remoción de los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas grises domésticas fue evaluada a los 30, 45, 60 y 93 días de operación. En términos generales, los resultados muestran un desempeño favorable del sistema, especialmente en la remoción de turbidez, sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes termotolerantes, cuyos valores superan el 80 % en la mayoría de los periodos. Esto sugiere una adecuada capacidad del filtro para la clarificación del efluente y la reducción de la carga microbiológica. No obstante, a los 60 días se observa una disminución en la eficiencia de estos parámetros, seguida de una recuperación a los 93 días, lo que indica variaciones en el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo. En el caso de la DBO₅, se evidencia un mejor desempeño a los 45 días (91,3 %), cifra que podría estar asociada a una fase de mayor actividad biológica en el lecho filtrante.

Por otro lado, los nitratos y fosfatos presentan altas eficiencias en los primeros periodos, aunque con una marcada variabilidad temporal; en particular, los nitratos

Tabla 1. Variación relativa del filtro percolador en la remoción de los contaminantes de las aguas grises domésticas

Parámetros	A los 30 días	A los 45 días	A los 60 días	A los 93 días
pH	3,3 %	-20,1 %	-29,3 %	-24,7 %
Turbidez	97,1 %	95,4 %	68,9 %	88,4 %
Sólidos totales en suspensión	98,5 %	92,3 %	66,7 %	84,8 %
Coliformes termotolerantes	93,9 %	97,1 %	83,9 %	84,1 %
DBO ₅	79,2 %	91,3 %	57,3 %	65,1 %
Nitratos	90,6 %	94,1 %	52,8 %	6,1 %
Fosfatos	59,0 %	99,0 %	22,5 %	96,9 %
Temperatura	-5,4 %	0,4 %	-4,3 %	-2,2 %

muestran una disminución progresiva hacia el final del periodo evaluado, lo que refleja la influencia de procesos biológicos complejos. En contraste, el pH y la temperatura presentan variaciones negativas o cercanas a cero, por lo que no deben interpretarse como parámetros de remoción, sino como indicadores de cambios en las condiciones fisicoquímicas del sistema. En conjunto, los resultados indican una tendencia general de mejora en varios parámetros clave, aunque con variaciones operativas que influyen en la eficiencia del filtro percolador a lo largo del tiempo, lo cual es consistente con la dinámica de sistemas biológicos a escala piloto.

Comparación de promedios, reducción absoluta y rangos de mínimos y máximos de los parámetros evaluados antes y después del tratamiento

La tabla 3 presenta los resultados del análisis descriptivo comparativo de los parámetros evaluados antes y después del tratamiento con el filtro percolador, y ello evidencia una reducción significativa en la mayoría de los contaminantes. En particular, la turbidez, los sólidos suspendidos totales (SST), los coliformes termotolerantes y la DBO₅ muestran disminuciones marcadas en sus valores promedio, con reducciones absolutas de 513,5 NTU, 398,8 mg/L, 19,990 NMP/100 mL y 423,4 mg O₂/L, respectivamente. Esto refleja una alta capacidad del sistema para la remoción de materia particulada, carga orgánica y contaminación microbiológica. Asimismo, los nitratos y fosfatos presentan reducciones importantes, aunque con rangos que evidencian variabilidad en el tiempo, lo que sugiere la influencia de procesos biológicos y condiciones operativas del sistema.

El análisis de los rangos (mín-máx) muestra una disminución consistente en los valores después del tratamiento, que confirman la mejora en la calidad del efluente. En contraste, el pH y la temperatura no presentan reducción, sino variaciones en sus valores promedio, que indican cambios en las condiciones fisicoquímicas del sistema más que procesos de remoción. En conjunto, estos resultados evidencian, desde un enfoque descriptivo, que el filtro percolador contribuye de manera efectiva a

Tabla 2. Desempeño del filtro percolador: comparación de promedios, reducción absoluta y rangos de los parámetros antes y después del tratamiento

Parámetro	Promedio antes	Promedio después	Reducción absoluta	Rango antes (mín-máx)	Rango después (mín-máx)
pH	6,7	7,9	-	6,0-7,0	6,7-8,9
Turbidez (NTU)	587,0	73,5	513,5	303-973	14-152
Sólidos suspendidos total (mg/L)	467,8	69,0	398,8	310-664	7-144
Coliformes (NMP/100 mL)	21,275	1,285	19,990	2,200-54,000	350-3,300
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	583,1	159,7	423,4	545,5-616,7	48,7-261,4
Nitratos (mg/L)	31,5	7,3	24,2	8,0-50,5	2,1-14,7
Fosfatos (mg/L)	1,35	0,05	1,30	0,1-3,3	0,0-0,1
Temperatura (°C)	21,8	22,5	-	16,1-26,1	16,8-27,5

la mejora de la calidad de las aguas grises domésticas, aunque con cierta variabilidad en algunos parámetros a lo largo del tiempo.

4. Discusión

El filtro percolador a escala piloto mostró un buen desempeño en la mejora de la calidad del efluente, especialmente en la remoción de sólidos y materia orgánica. En este sentido, la turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) presentaron reducciones altas y relativamente estables a lo largo del tiempo, lo que confirma la eficiencia del sistema en la clarificación del agua. Este comportamiento es característico de los sistemas de biopelícula, donde la maduración del biofilm incrementa la retención de partículas y favorece la degradación aerobia de la materia biodegradable (Menéndez Gutiérrez, 2022; Abbas y Ali, 2023). Asimismo, la DBO₅ mostró una disminución importante, ya que alcanzó su mejor desempeño en la etapa intermedia del proceso, lo que sugiere condiciones favorables de actividad biológica y transferencia de oxígeno en el lecho filtrante. En concordancia con ello, estudios en sistemas de filtración con medios granulares y configuraciones multicapa indican que la eficiencia depende tanto del tiempo de operación como del diseño del sistema (Tusiime *et al.*, 2022; Hassan *et al.*, 2024); de igual manera, investigaciones en filtros percoladores con medios alternativos reportan una adecuada capacidad de adaptación frente a variaciones hidráulicas (Aslam *et al.*, 2017; Pichiyá, 2023). En contraste, tecnologías fisicoquímicas como la electrocoagulación-electrooxidación logran altas remociones en menor tiempo, aunque requieren mayor control operativo y consumo energético (Mousazadeh *et al.*, 2023).

Por otro lado, los nutrientes, particularmente nitratos y fosfatos, evidenciaron una mayor variabilidad temporal; si bien se registraron reducciones importantes en algunos periodos, estas no fueron constantes, lo que indica que su remoción depende de procesos más complejos, como la asimilación biológica y las transformaciones químicas. Este comportamiento es esperable en sistemas aerobios, donde la eliminación de nutrientes no es uniforme y está influenciada por las condiciones operativas (Forbis-Stokes *et al.*, 2018; Sami *et al.*, 2024). En esa misma línea, factores como la carga hidráulica, la granulometría y la profundidad del lecho condicionan la estabilidad del tratamiento (Sharma y Ahammed, 2026).

En cuanto al componente microbiológico, los coliformes termotolerantes mostraron reducciones importantes en términos descriptivos; sin embargo, se observó variabilidad entre los muestreos, lo cual puede atribuirse a la naturaleza fluctuante del influente en aguas grises, cuya composición depende de las actividades domésticas y del uso de productos de limpieza (Ikumapayi *et al.*, 2024). En consecuencia, aunque la filtración biológica contribuye a la reducción de microorganismos, la literatura señala que la eliminación consistente de

indicadores bacterianos suele requerir etapas adicionales de desinfección para garantizar mayor estabilidad sanitaria (Hassan *et al.*, 2024; Gowri *et al.*, 2024).

Respecto al pH, se observaron variaciones entre los valores antes y después del tratamiento, con una ligera tendencia hacia valores más alcalinos en algunos periodos; esto puede explicarse por procesos biológicos como la degradación de materia orgánica y la nitrificación. No obstante, el pH se mantuvo dentro de rangos adecuados para el funcionamiento de sistemas biológicos, lo que indica que no se generaron condiciones adversas para la actividad microbiana. Por tanto, este parámetro debe interpretarse como un indicador de las transformaciones químicas del sistema, más que como un parámetro de remoción (Menéndez Gutiérrez, 2022; Abbas y Ali, 2023).

De manera similar, la temperatura presentó variaciones leves y se mantuvo relativamente estable durante el periodo evaluado; en consecuencia, no se evidencian cambios térmicos significativos atribuibles al sistema, al estar más bien influenciada por las condiciones ambientales. Esta estabilidad es relevante, ya que la temperatura incide en la actividad microbiana; sin embargo, en este estudio no se observaron fluctuaciones que comprometan el funcionamiento del filtro percolador, lo cual es consistente con lo reportado en sistemas descentralizados (Hassan *et al.*, 2024).

Finalmente, es necesario considerar las limitaciones propias del estudio piloto; entre ellas, destacan el tamaño reducido de la muestra, la variabilidad del influente y el control operativo limitado, factores que influyen en la dispersión de los datos y en la estabilidad de algunos parámetros, especialmente nutrientes y microbiología. En este contexto, los resultados deben interpretarse con cautela y asumirse como exploratorios, orientados a identificar tendencias más que a establecer conclusiones generalizables. A pesar de ello, el sistema demuestra un buen potencial como tecnología de tratamiento descentralizado, particularmente eficaz en la remoción de sólidos y materia orgánica; no obstante, para mejorar la estabilidad en la remoción de nutrientes y garantizar mayor seguridad microbiológica, se recomienda su integración con etapas complementarias, como procesos de pulido o desinfección, en concordancia con enfoques actuales de tratamiento y reúso de aguas grises (Anaya Meléndez *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024).

Contribución de autoría

Deisi Delgado: conceptualización, administración de proyectos, adquisición de financiación, investigación, metodología.

Omar Quintana: conceptualización, curación de datos, *software*, redacción, revisión y edición.

Mirtha Valverde: visualización, investigación, adquisición de financiación, investigación, metodología.

Fuente de financiamiento

La presente investigación recibió el apoyo financiero de la Universidad Nacional de San Martín («Concurso de proyectos de tesis de pregrado»).

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés en el trabajo publicado.

Declaración de uso de IA

Los autores declaran que no se ha usado inteligencia artificial en ningún proceso de la elaboración de este manuscrito.

Referencias bibliográficas

- Abbas, E. K. y Ali, S. A. K. (2023).** «Assessment of biological trickling system with different layers of material for grey water treatment». 3rd International Conference for Civil Engineering Science (ICCES 2023). IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 1232(1), 012018. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1232/1/012018>
- Anangadan, S. M., Pradhan, S., Saththasivam, J., McKay, G. y Mackey, H. R. (2024).** «Una evaluación cinética de la eliminación de nutrientes y materia orgánica en aguas grises para muros verdes: evaluación del rendimiento de los medios de soporte de plantas a base de minerales, orgánicos y derivados de desechos». *Separation and Purification Technology*, 349, 127517. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127517>
- Anaya Meléndez, F., Espinosa, E. N., Loayza, J. E., Zamudio, R. A. y Yáñez, M. A. (2022).** «Diseño de un sistema de tratamiento de aguas grises claras para reúso como agua de riego». *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 88(1), pp. 52-62. Disponible en: <https://doi.org/10.37761/rsqp.v88i1.375>
- Aslam, M. M. A., Khan, Z. M., Sultan, M., Niaz, Y., Mahmood, M. H., Shoaib, M., Shakoor, A. y Ahmad, M. (2017).** «Performance evaluation of trickling filter-based wastewater treatment system utilizing cotton sticks as filter media». *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(5), pp. 1955-1962. Disponible en: <https://doi.org/10.15244/pjoes/69443>
- Bajpai, M., Katoch, S. S. y Chaturvedi, N. K. (2020).** «Comparative study on decentralized treatment technologies for sewage and graywater reuse – a review», *Water Science and Technology*, 80(11), pp. 2091-2106. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.039>
- Budeli, P. y Sibali, L. L. (2025).** «Reutilización de aguas grises: perfil de contaminantes, implicaciones para la salud y soluciones sostenibles». *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(5), 740. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph22050740>
- Ferreira, A., Santos, C., Imteaz, M. A. y Matos, C. (2023).** «Hybrid decentralized systems of non-potable water supply: performance and effectiveness analysis». *Water Resources Management*, 37(10), pp. 3897-3919. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03531-y>
- Forbis-Stokes, A. A., Rocha-Melogni, L. y Deshusses, M. A. (2018).** «Nitrifying trickling filters and denitrifying bioreactors for nitrogen management of high-strength anaerobic digestion effluent». *Chemosphere*, 204, pp. 119-129. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.137>
- Galvão, A., Rodrigues, M., Mata, J. y Silva, C. M. (2024).** «Muros verdes para el tratamiento de aguas grises: una revisión exhaustiva de los parámetros operativos y la influencia del clima en el rendimiento del tratamiento». *Water Research*, 272, 122948. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122948>
- Gowri, N. R., Abdul Muizz, M., Raqeeb, K. S. M. y Quisar, M. (2024).** «Biofiltration: a sustainable solution for grey water treatment». *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 12(04). Disponible en: <https://www.ijert.org/biofiltration-a-sustainable-solution-for-grey-water-treatment>
- Gupta, A. K., Uddameri, V., Majumder, A. y Nimbhorkar, S. K. (2023).** *Wastewater Engineering. Issues, Trends, and Solutions*. Boca Raton: CRC Press.
- Halwani, B., Sopheak, R., Ouddane, B. y Halwani, J. (2018).** «Una revisión de los sistemas más populares para el tratamiento de aguas grises». *Desalination and Water Treatment*, 135, pp. 124-132. Disponible en: <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22968>
- Hassan, K., Alzahrani, A., Alotaibi, N. M. y Helmy, M. (2024).** «Performance of an integrated household greywater treatment system for water optimization and reuse». *Applied Water Science*, 14, 242. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02303-2>
- Hernández Leal, L., Temmink, H., Zeeman, G. y Buisman, C. J. N. (2011).** «Characterization and anaerobic biodegradability of grey water». *Desalination*, 270(1-3), pp. 111-115. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.029>
- Ikumapayi, O. M., Laseinde, O. T. y Akinlabi, E. T. (2024).** «An overview of sustainable greywater treatment processes». *E3S Web of Conferences*, 552, 01047. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455201047>
- Menéndez Gutiérrez, C. (2022).** «La sedimentación secundaria en los tratamientos biológicos de aguas residuales». *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(3), pp. 24-33. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382022000300024
- Metcalf & Eddy. (2015).** *Ingeniería sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. (2.ª ed.). Barcelona: Labor.
- Mousazadeh, M., Khademi, N., Kabdaşlı, I., Rezaei, S., Hajalifard, Z., Moosakhani, Z. y Hashim, K. (2023).** «Domestic greywater treatment using electrocoagulation-electrooxidation process: optimisation and experimental approaches». *Scientific Reports*, 13(1), 15852. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42831-6>
- Pichiyá, E. (2023).** «Evaluación de un sistema de tratamiento de agua gris domiciliar a base de filtros múltiples». *Agua Saneamiento & Ambiente*, 18(2), e1521. Disponible en: <https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i2.1521>
- Polo, R., Luna, J., Flores, J., Huamán, M., Tuya, B. y Rodríguez, Y. (2024).** «Capa biológica en los filtros percoladores a diferente carga orgánica en zona andina». *Acta Scientiarum*, 17(1), pp. 47-58. Disponible en: <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n1.1133>
- Rabaey, K., Vandekerckhove, T., Van de Walle, A. y Sedlak, D. L. (2020).** «The third route: using extreme decentralization to create resilient urban water systems». *Water Research*, 185, 116276. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116276>
- Ramazan, A., Syrlybekkyzy, S., Taizhanova, L., Muralev, Y. y Pangaliyev, Y. (2025).** «Environmental assessment of low-carbon water management and recycling on university campuses: A global perspective». *Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series*, 151(2), pp. 270-293. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-151-2-270-293>
- Sami, M., Hedström, A., Kvarnström, E., Österlund, H., Nordqvist, K. y Herrmann, I. (2024).** «Treatment of greywater and presence of microplastics in on-site systems». *Journal of Environmental Management*, 366, 121859. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121859>
- Shaikh, I. N. y Ahammed, M. M. (2020).** «Quantity and quality characteristics of greywater: a review». *Journal of Environmental Management*, 261, 110266. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110266>
- Sharma, S. y Ahammed, M. M. (2026).** «Filtración de aguas grises mediante lodos de tratamiento de agua: optimización de los parámetros de operación». *Environmental Technology*, 47(6), pp. 895-913. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09593330.2025.2607665>
- Silva, J. R. M., Borges, A. C., Fernandes, R. B. A., Lüthi, C. y Spuhler, D. (2024).** «The banana tree circle as a nature-based solution for sustainable greywater management: A new design model». *Water Science & Technology*, 89(9), pp. 2240-2253. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.141>



- Thaher, R. A., Mahmoud, N., Al-Khatib, I. A. y Hung, Y.-T. (2020).** «Reasons of acceptance and barriers of house onsite greywater treatment and reuse in Palestinian rural areas». *Water*, 12(6), 1679. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w12061679>
- Tusiime, A., Solihu, H., Sekasi, J. y Mutanda, O. E. (2022).** «Performance of a lab-scale filtration system for greywater treatment and reuse». *Environmental Challenges*, 9, 100641. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100641>
- Van de Walle, A., Kim, M., Alam, M. K., Wang, X., Wu, D., Dash, S. R., Rabaey, K., & Kim, J. (2023).** «Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management». *Environmental Science and Ecotechnology*, 16, 100277. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100277>
- Vuppaladadiyam, A. K., Merayo, N., Prinsen, P., Luque, R., Blanco, A. y Zhao, M. (2019).** «A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios». *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18, pp. 77-99. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9487-9>
- Yáñez, D., Espinoza, L. C., Vargas, I., Romero, J., Aguirre, M. J., Arce, R., Quijada-Maldonado, E. y Abejon, R. (2024).** «Treated greywater as a novel water resource: The perspective of greywater treatment for reuse from a bibliometric analysis». *Water Science & Technology*, 90(11), pp. 3076-3110. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2024.384>