

Biodegradabilidade de águas cinzas e efeito de meio filtrante composto por vidro triturado na eficiência do tratamento

Talys Brendo Sá da Silva^{1*}, Sheila Ferreira Santos², Guilherme Henrique de Lima Freitas³, Cristiane Xavier Galhardo⁴, Miriam Cleide Cavalcante de Amorim⁵

¹Graduando em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Brasil. (*talys.sa@discente.univasf.edu.br)

²Graduanda em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Brasil.

³Graduando em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Brasil.

⁴Docente do Colegiado de Engenharia Agrônoma, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Brasil.

⁵Docente do Colegiado de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 12/05/2025 – Revisado em: 16/07/2025 – Aceito em: 27/09/2025

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a biodegradabilidade e a tratabilidade de águas cinzas domiciliares, além de analisar a eficiência de um biofiltro modificado com meio filtrante de vidro reciclado, em substituição às tradicionais raspas de madeira. A pesquisa foi dividida em duas etapas. Na primeira, amostras de águas cinzas foram coletadas em três municípios e analisadas quanto à razão entre Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅), para determinar a biodegradabilidade. Os resultados revelaram que 33% das amostras apresentaram alta biodegradabilidade, 46,67% intermediária e 20% baixa, indicando que a escolha do tipo de tratamento deve considerar as características específicas de cada amostra. Na segunda etapa, avaliou-se a eficiência de um biofiltro modificado em comparação ao modelo convencional, por meio de treze carreiras de filtração e cinco campanhas de coleta, respectivamente. As análises físico-químicas demonstraram que o biofiltro com vidro reciclado apresentou remoção de DQO variando entre 5 e 72%, além de não elevar os níveis de sódio na água cinza tratada — comportamento oposto ao observado no biofiltro convencional. Os resultados indicam que o vidro triturado é um meio filtrante promissor, com potencial para melhorar a qualidade da água cinza tratada.

Palavras-Chaves: Tratamento biológico, vidro triturado, salinização, biofiltro alternativo.

Biodegradability of gray water and effect of filter media composed of crushed glass on treatment efficiency

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the biodegradability and treatability of household gray water, in addition to analyzing the efficiency of a modified biofilter with recycled glass filter media, replacing traditional wood shavings. The research was divided into two stages. In the first, gray water samples were collected in three municipalities and analyzed for the ratio between Chemical Oxygen Demand (COD) and Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), to determine biodegradability. The results revealed that 33% of the samples presented high biodegradability, 46.67% intermediate and 20% low, indicating that the choice of the type of treatment should consider the specific characteristics of each sample. In the second stage, the efficiency of a modified biofilter was evaluated in comparison to the conventional model, through thirteen filtration runs and five collection campaigns, respectively. The physical-chemical analyses demonstrated that the biofilter with recycled glass presented COD removal ranging from 5 to 72%, in addition to not increasing sodium levels in the treated gray water — a behavior opposite to that observed in the conventional biofilter. The results indicate that crushed glass is a promising filter medium, with potential to improve the quality of treated gray water.

Keywords: Biological treatment, crushed glass, salinization, alternative biofilter.

Silva, T. B. S., Sheila, F. S., Freitas, G. H. L., Galhardo, C. X., Amorim, M. C. C. (2025). Biodegradabilidade de águas cinzas e efeito de meio filtrante composto por vidro triturado na eficiência do tratamento. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.13, n.3, p.94-109.



Biodegradabilidade de águas cinzas e efeito do meio filtrante composto de vidro triturado sobre a eficiência do tratamento

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la biodegradabilidad y tratabilidad de aguas grises domésticas, además de analizar la eficiencia de un biofiltro modificado con medios filtrantes de vidrio reciclado, en sustitución de las tradicionales virutas de madera. La investigación se dividió en dos etapas. En el primero, se recolectaron muestras de aguas grises en tres municipios y se analizaron para determinar la relación entre la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), para determinar la biodegradabilidad. Los resultados revelaron que el 33% de las muestras presentaron biodegradabilidad alta, 46,67% intermedia y 20% baja, lo que indica que la elección del tipo de tratamiento debe considerar las características específicas de cada muestra. En la segunda etapa, se evaluó la eficiencia de un biofiltro modificado en comparación con el modelo convencional, a través de trece corridas de filtración y cinco campañas de recolección, respectivamente. Los análisis físico-químicos demostraron que el biofiltro con vidrio reciclado presentó remoción de DQO que oscila entre 5% y 72%, además de no incrementar los niveles de sodio en las aguas grises tratadas, comportamiento opuesto al observado en el biofiltro convencional. Los resultados indican que el vidrio triturado es un medio filtrante prometedor, con potencial para mejorar la calidad del agua gris tratada.

Palabras clave: Tratamiento biológico, vidrio triturado, salinización, biofiltro alternativo.

1. Introdução

O crescente consumo de recursos hídricos e a necessidade de soluções para o reuso da água têm impulsionado estudos sobre o tratamento de águas cinzas. O termo "água cinza" refere-se à toda água residuária que advém de uma residência, isto é, água de pias da cozinha e banheiro, excetuando-se a da bacia sanitária e mictório/esgotamento sanitário, a qual é classificada como água negra (Dias, 2024; Rapoport, 2004). A composição das águas cinzas é altamente variável. De modo geral, elas contêm matéria orgânica, produtos químicos, gorduras, sabão, fibras e cabelos, além de possíveis traços de excretas, patógenos, poluentes persistentes e metais potencialmente tóxicos (Figueiredo et al., 2019). Seu descarte inadequado pode comprometer a qualidade ambiental e representar riscos à saúde pública, tornando essencial o desenvolvimento de métodos eficientes para seu tratamento.

No contexto do tratamento de águas cinzas, a biodegradabilidade é utilizada a fim de avaliar a estabilidade biológica desses efluentes com base na relação DQO/DBO₅, a qual vai inferir se existe baixa ou alta biodegradabilidade de esgotos ou águas residuárias (Braga et al., 2012), favorecendo ou não tratamentos biológicos (Edwin, Gopalsam e Muthu, 2014). Dentre as alternativas para o tratamento de águas cinzas, os sistemas de biofiltro têm se destacado, pois seu uso para o tratamento de efluentes representa uma opção de baixo custo, com mínimas exigências de operação e manutenção (Passos, Brandão e Carvalho, 2021). No entanto, apesar de ser um tratamento simples e com um custo pouco elevado, é composto de recursos naturais como areia, brita e carvão mineral, gerando assim impactos na disponibilidade desses materiais no meio ambiente (Passos, 2022).

Segundo Marques (2024) o leito filtrante utilizado nos sistemas pode contribuir para a liberação de íons como cálcio e sódio, influenciando diretamente as características da água cinza tratada, devido à composição química dos materiais. Nesse contexto, é fundamental a busca por materiais não convencionais, que ofereçam a vantagem de agregar valor aos resíduos descartados, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais negativos dessa prática, bem como materiais inertes que minimizem a liberação de íons, e possível influência nas características da água cinza. Além disso, essa abordagem visa também garantir uma tecnologia de baixo custo e eficiência, levando em consideração que a escolha dos materiais filtrantes desempenha um papel crucial na eficiência do biofiltro.

A crescente geração de resíduos sólidos exige a busca por soluções sustentáveis para seu manejo e reaproveitamento. Conforme o Conselho Regional de Química (2022), ao redor do mundo, as empresas fabricam cerca de 209 milhões de toneladas de vidro anualmente, sendo este um dos materiais mais consumidos no mundo, com diversas aplicabilidades em diversas áreas. Por outro lado, o vidro é 100% reciclável, podendo

ser utilizado em diversos ciclos sem a perda da qualidade, tornando-o um material sustentável, inerte (não biodegradável) e benéfico do ponto de vista econômico (Bacchi, 2024; Soares, 2018).

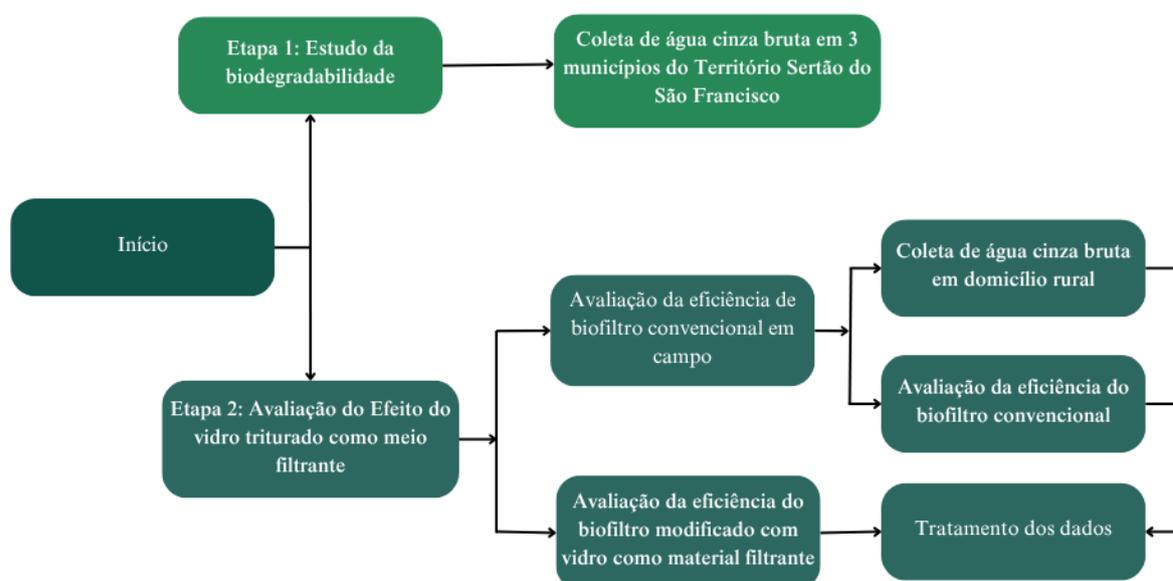
Assim, este estudo tem como objetivo prospectar a biodegradabilidade e a tratabilidade das águas cinzas domiciliares e avaliar a eficiência de um protótipo de biofiltro modificado, no qual o meio filtrante tradicional de raspa de madeira foi substituído por material de vidro reciclado.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

Este estudo constou de duas etapas, sendo a Etapa 1 constituída por uma prospecção da biodegradabilidade e tratabilidade de águas cinzas domiciliares e a Etapa 2 pelo estudo do efeito da substituição do meio filtrante em biofiltro utilizado para tratamento dessas águas (Figura 1).

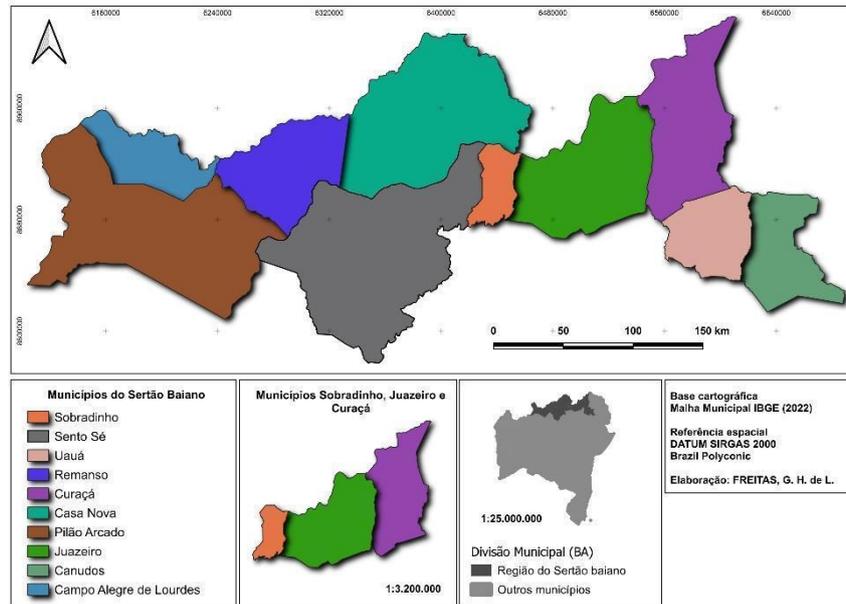
Figura 1 - Fluxograma das etapas do estudo
Figure 1 - Flowchart of the study steps



Fonte: Autores
 Source: Authors

A pesquisa foi conduzida no Território de Identidade Sertão do São Francisco, localizado no semiárido baiano. Este território abrange uma área de 61.750,70 km² e é composto por 10 municípios: Campo Alegre de Lourdes, Canudos, Casa Nova, Curaçá, Juazeiro, Pilão Arcado, Remanso, Sento Sé, Sobradinho e Uauá (Figura 2).

Figura 2. Mapa do Território de Identidade Sertão do São Francisco, destacando os municípios onde as amostras foram coletadas
Figure 2. Map of the Sertão do São Francisco Identity Territory, highlighting the municipalities where the samples were collected



Fonte: Autores
Source: Authors

A população total do território é de 520.782 habitantes, dos quais 148.122 vivem na área rural, o que corresponde a 28,44% do total. Na região, existem 31.768 agricultores familiares, 2.371 famílias assentadas, 1 comunidade quilombola reconhecida e 1 terra indígena (Costa e Silva, 2016).

2.2 Etapa 1 - Coleta e análise da água cinza

Para o estudo da biodegradabilidade, que compõe a Etapa 1 do trabalho, foram realizadas coletas de águas cinzas brutas oriundas de 15 domicílios rurais no Território Sertão Baiano nas cidades de Curaçá, Sobradinho e Juazeiro (Figura 2), sendo uma amostragem no município de Curaçá, quatro no município de Sobradinho e dez no município de Juazeiro (Tabela 1), entre 2021 e 2023.

Tabela 1 – Quantidade de amostras por município e período de avaliação
Table 1 – Number of samples per municipality and evaluation period

Município	Amostras	Período
Curaçá	1	2021
Sobradinho	4	2022 a 2023
Juazeiro	10	2021 a 2023
Total	15	

Os processos de coleta, preservação e análises da água cinza foram realizados conforme procedimentos do *Standard Methods for the Examination Water and Wastewater* (APHA, 2012). Todas as análises foram realizadas em triplicata no Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco, onde procedeu-se à caracterização dos parâmetros: Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅).

2.2.1 Procedimentos para prospecção da biodegradabilidade e tratabilidade da água cinza

Para avaliar a biodegradabilidade e a adequação ao tratamento das águas cinzas, foi adotado conceituação teórica de Von Sperling (2005), cuja magnitude da relação DQO/DBO₅ permite tirar conclusões sobre a biodegradabilidade e a tratabilidade do efluente, bem como a adequação do método de tratamento utilizado, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Biodegradabilidade e tratabilidade em função da magnitude da relação DQO/DBO₅
Table 2 - Biodegradability and treatability as a function of the COD/BOD₅ ratio

DQO/DBO ₅ baixa (<2,5)	Fração biodegradável elevada Indicação para tratamento biológico
DQO/DBO ₅ intermediária (entre 2,5 e 3,5)	Fração biodegradável não elevada Indicação de estudos de tratabilidade para Verificar viabilidade do tratamento biológico
DQO/DBO ₅ alta (> cerca de 3,5 ou 4,0)	Fração inerte (não biodegradável) é elevada. Indicação para tratamento físico-químico

Fonte: Von Sperling (2005)
Source: Von Sperling (2005)

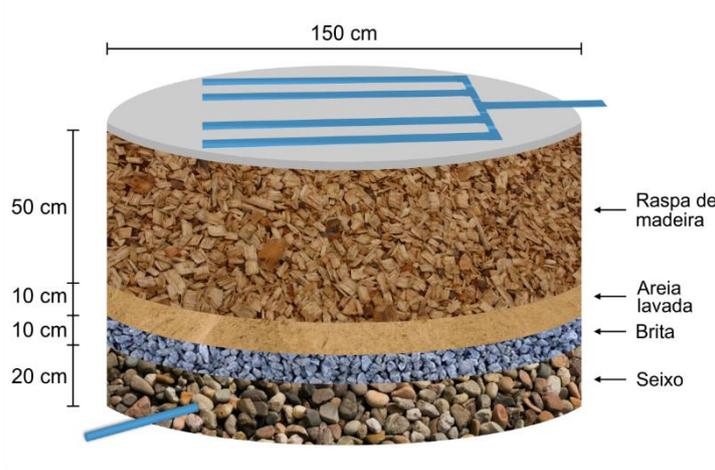
Com base nisso, analisaram-se as relações DQO/DBO₅ de amostras de águas cinzas. A metodologia consistiu em determinar a DQO e a DBO₅ das amostras seguindo os procedimentos descritos nos métodos 5220D e 5210D do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2023). Em seguida, calcularam-se os valores da relação DQO/DBO₅ para cada amostra, de cada residência, permitindo a posterior interpretação de sua biodegradabilidade e adequação ao tratamento.

2.3 Etapa 2 - Avaliação do efeito do meio filtrante: eficiência do biofiltro convencional e eficiência do biofiltro modificado com vidro como material filtrante

O estudo foi realizado a partir de dois biofiltros, sendo um biofiltro convencional, instalado no Centro de Formação Dom José Rodrigues, pertencente ao Instituto Regional da Pequena Agropecuária Apropriada (IRPAA), situado a 12 km da cidade de Juazeiro, na Bahia, cujas coordenadas geográficas são 9° 26' 20.286" S e 40° 29' 22.747" L. E um biofiltro modificado, instalado no Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) campus Juazeiro-BA.

O biofiltro convencional segue a metodologia de Santiago et al. (2015), em que possui fluxo descendente, sendo composto por uma camada inicial de seixo rolado, seguido por brita, areia lavada e raspas de madeira (Figura 3). O biofiltro opera em fluxo descendente e é integrado por uma caixa coletora de gordura antes de sua entrada e precedido por tanque de armazenamento da água cinza tratada, de onde foram coletadas as amostras para caracterização química, física e microbiológica.

Figura 3 – Biofiltro familiar para o tratamento de água cinza
Figure 3 – Family biofilter for greywater treatment



Fonte: Autores
Source: Authors

Em função dos aumentos nos teores de sódio observados durante o período de avaliação da eficiência do biofiltro convencional (Tabela 5), optou-se pelo uso do vidro como novo material filtrante, em substituição as raspas de madeira, com o objetivo de minimizar possível interferência do material filtrante usado no biofiltro convencional de Santiago *et al.* (2015), nas concentrações de sódio na água cinza tratada.

Assim, o protótipo de biofiltro modificado, com vidro como material filtrante, em substituição às raspas de madeira adotou um sistema de fluxo também descendente, construído com dimensões de 35 cm de altura útil e 12 cm de diâmetro, em PVC, composto por uma camada de brita 1 (19 mm) com 9,33 cm de espessura, seguida por uma camada de brita 0 (10 mm) com 4,67 cm de espessura, uma camada de areia lavada com 3,50 cm de espessura, uma camada de pedrisco com 3,50 cm de espessura e, por fim, uma camada de vidro (4,74 mm) com 14 cm de espessura (Figura 4).

Figura 4 - O protótipo de biofiltro modificado com leito de vidro
Figure 4 - The prototype of a modified biofilter with a glass bed



Fonte: Autores
Source: Authors

O vidro utilizado foi obtido a partir de vidrarias danificadas do Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA) e passaram por um processo de trituração em máquina de abrasão, modelo CONTENTCO LOS ANGELES I-3021 (Figura 5a e 5b), do Laboratório de Materiais e Técnicas de Construção (LABMATEC) da UNIVASF. Posteriormente foi submetido ao peneiramento para garantir frações de tamanho uniforme, tendo as peneiras tela com abertura de 4,75 mm.

Figura 5 - Máquina de abrasão utilizada (a) e processo trituração das vidrarias (b)
Figure 5 - Abrasion machine used (a) and glassware crushing process (b)



Fonte: Autores
 Source: Authors

A vazão estabelecida para as filtrações da água cinza foi de 24 mL/min, resultando em uma taxa de filtração de 3 m³/m³. dia com tempo de detenção hidráulica de 60 minutos.

O filtro foi operado por batelada contínua de 4 horas, sendo coletadas amostras compostas a cada 18 minutos para análise de DQO e sódio, totalizando 13 carreiras de filtração e 13 amostragens.

2.3.1 Coleta e análise da água cinza bruta e tratada pelos biofiltros

Para avaliar o tratamento pelo biofiltro convencional, foram realizadas coletas de águas cinzas brutas e tratadas oriundas da república estudantil localizada na área do Centro de Formação Dom José Rodrigues, pertencente ao Instituto Regional da Pequena Agropecuária Apropriada (IRPAA). O período de avaliação foi de 225 dias, sendo compreendido cinco amostragens, realizadas em intervalos de 45 dias.

Quanto ao biofiltro modificado, foram realizadas 15 amostragens de água cinza tratada. O afluente do biofiltro modificado foi a água cinza oriunda da mesma fonte utilizada para o biofiltro convencional. Os processos de coleta, preservação e análises da água cinza bruta e tratada pelos biofiltros foram realizados conforme procedimentos do *Standard Methods for the Examination Water and Wasterwater* (APHA, 2023).

Todas as análises foram realizadas em triplicata no Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA) da UNIVASF. Foram caracterizados os seguintes parâmetros da água cinza bruta e tratada pelo biofiltro convencional: condutividade elétrica (CE), pH, sólidos totais dissolvidos (STD), demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), nitrogênio amoniacal, fósforo total, cloretos, cálcio, magnésio e sódio. Para a água tratada no biofiltro modificado, foram analisados os parâmetros de DQO e sódio.

2.3.2 Avaliação da eficiência de tratamento das águas cinzas no biofiltro convencional e do biofiltro

modificado

A eficiência do biofiltro convencional foi avaliada quantificando a capacidade do sistema em remover matéria orgânica em termos de DQO e DBO₅. A eficiência foi expressa como um percentual, indicando a proporção de cada parâmetro removida pelo sistema em relação à carga inicial. Para esse cálculo, utilizou-se a seguinte equação:

$$\text{Eficiência (\%)} = \frac{CE - CS}{CE} * 100$$

Onde: CE - é a concentração do parâmetro na água cinza bruta (entrada do biofiltro); CS - é a concentração do parâmetro na água cinza tratada (saída do biofiltro).

2.4 Análise de dados

Para os parâmetros analisados, foi aplicada estatística básica calculando-se as médias, os valores máximos e mínimos, o desvio padrão e a eficiência de remoção do sistema. Foram gerados gráficos para melhor visualização da variação temporal e da eficiência de remoção dos parâmetros ao longo do período de monitoramento. Todos os gráficos e análises dos dados foram realizados com o auxílio do software computacional Microsoft Office Excel versão 2019.

3. Resultados e Discussão

3.1 Prospecção da biodegradabilidade e tratabilidade da água cinza

Os resultados obtidos a partir da caracterização química quanto aos valores de DQO e DBO₅, a relação DQO/DBO₅ e a biodegradabilidade das amostras de água cinza coletadas em cada município estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de DQO, DBO₅, DQO/DBO₅ e fração biodegradável das 15 amostras de águas cinzas analisadas nos municípios de Curaçá, Sobradinho e Juazeiro

Table 3 - Values of COD, BOD₅, COD/BOD₅ and biodegradable fraction of the 15 gray water samples analyzed in the municipalities of Curaçá, Sobradinho and Juazeiro

Amostras	DQO (mg L ⁻¹)	DBO ₅ (mg L ⁻¹)	DQO/DBO ₅	Fração biodegradável
Curaçá	1810.80	666.70	2.72	Não elevada (37%)
Sobradinho A1	7809.10	1233.30	6.33	Inerte (15%)
Sobradinho A2	1883.45	1275.00	1.48	Elevada (68%)
Sobradinho A3	1327.20	375.00	3.54	Inerte (28%)
Sobradinho A4	741.07	260.59	2.84	Não elevada (35%)
Juazeiro A1	2545.50	883.30	2.88	Não elevada (35%)
Juazeiro A2	1750.52	600.00	2.92	Não elevada (34%)
Juazeiro A3	775.03	273.33	2.84	Não elevada (35%)
Juazeiro A4	273.18	53.33	5.12	Inerte (19,5%)
Juazeiro A5	1464.32	516.67	2.83	Não elevada (35%)
Juazeiro A6	147.52	340.00	0.43	Elevada

Juazeiro A7	458.40	233.40	1.96	Elevada (51%)
Juazeiro A8	195.00	148.30	1.31	Elevada (76%)
Juazeiro A9	257.50	116.70	2.21	Elevada (45%)
Juazeiro A10	419.40	150.00	2.80	Não elevada (36%)
Máximo	2545.50	1275.00	5.12	
Mínimo	147.52	53.33	0.43	
Desvio Padrão	552.13	175.04	1.23	

De acordo com a avaliação da biodegradabilidade a partir da razão DQO/DBO₅, das quinze amostras analisadas, cinco apresentaram uma razão igual ou inferior a 2,5, indicando que 33,33% das amostras possuem uma fração biodegradável elevada e, portanto, adequadas para tratamento biológico. Sete amostras (46,67%) apresentaram uma razão entre 2,5 e 3,5, sugerindo uma fração biodegradável moderada, sendo necessário realizar estudos de tratabilidade para verificar a viabilidade do tratamento biológico. Apenas três amostras (20%) apresentaram uma razão superior a 3,5, indicando uma baixa fração de matéria orgânica biodegradável, e portanto, são mais adequadas para tratamento físico-químico, uma vez que o processo biológico seria menos eficiente.

Halalsheh et al. (2008) avaliando as características das águas cinzas e opções de tratamento para as zonas rurais da Jordânia, encontraram relação DQO/DBO₅ da ordem de 2,43. Ghaly et al. (2021) revisando as características das águas cinzas e a sua utilização para a gestão das águas cinza em países como Israel, Austrália e Egito encontraram relações de DQO/DBO₅ que variaram entre 0,35 e 2,73. As amostras com maior percentual de matéria orgânica biodegradável foram as de ETE 2 com 76%; a de Sobradinho PF 1 com 68% e a de ETE 1, com 51%. Em todas as ETES as frações biodegradáveis foram menores que as encontradas por Waqkene et al. (2023) quando avaliaram águas cinzas domésticas e seus adequados tratamentos nas condições climáticas da Etiópia. Os autores observaram que 90% da matéria orgânica presente nas águas cinzas eram biodegradáveis.

Observa-se uma variabilidade nas características das amostras de água cinza coletadas nos quinze municípios, com diferentes níveis de DQO e DBO₅ e, conseqüentemente, frações biodegradáveis distintas. A avaliação da biodegradabilidade das amostras, revelou uma distribuição heterogênea em relação à fração biodegradável. A variação nos resultados, entre os municípios e as amostras, pode ser atribuída a fatores específicos de cada residência, uma vez que a produção de águas cinza em uma casa é diretamente influenciada pelo consumo de água, número de moradores, distribuição etária, características do estilo de vida e pelos padrões típicos de uso doméstico como uso de detergentes, amaciantes e cosméticos (Maiga et al., 2015; Hassan et al., 2024).

Esses fatores podem influenciar diretamente a composição orgânica e a biodegradabilidade das amostras. Tais resultados corroboram o estudo realizado por Edwin et al. (2014), que demonstraram que a relação DQO/DBO₅ varia significativamente de acordo com a origem das águas cinzas. Por exemplo, águas cinzas provenientes de lavanderias apresentam uma relação DQO/DBO₅ elevada, indicando uma baixa fração biodegradável e, portanto, maior adequação para tratamentos físico-químicos. Hassan et al. (2024) encontraram valores de até 4 para a relação DQO/DBO₅.

Em contraste, águas cinza oriundas de banho ou lavatório possuem uma relação DQO/DBO₅ baixa, indicando maior biodegradabilidade e adequação para tratamento biológico, a exemplo de valores encontrados por Waqkene et al. (2023) que obtiveram valores de 0,91 e de 0,87 para a água cinza antes e após tratamento em biofiltro. Esses resultados ressaltam a importância de realizar diagnósticos específicos para cada tipo de efluente, a fim de selecionar o processo de tratamento mais adequado. Tal abordagem permite maior eficiência no tratamento das águas cinzas, considerando suas características particulares.

3.2 Avaliação do efeito do meio filtrante em biofiltros para tratamento da água cinza: eficiência do

biofiltro convencional

A Tabela 4 apresenta os valores médios dos parâmetros físico-químicos avaliados nas amostras de água cinza, tanto na sua forma bruta quanto após o tratamento por meio do sistema de biofiltro convencional, durante o período experimental.

Tabela 4 - Valores médios, desvio padrão, valores mínimos e máximos das amostras de entrada e saída do biofiltro convencional e eficiência de remoção

Table 4 - Av Average values, standard deviation, minimum and maximum values of the input and output samples of the conventional biofilter and removal efficiency

Parâmetro	Entrada	Saída	Eficiência (%)
Fósforo (mg L ⁻¹)	6.1 ± 5.8	3.7 ± 0.59	40
	15.9 - 0.5	4.01 - 2.63	
Nitrogênio amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	24.3 ± 7.1	10.7 ± 12.2	56
	33.9 - 17.5	32.4 - 3.7	
Magnésio (mg L ⁻¹)	432.8 ± 412.03	344.4 ± 272.8	NA*
	1078.3 - 85.9	704.2 - 116.2	
STD (mg L ⁻¹)	332.3 ± 115.2	249.2 ± 89.8	25
	484 - 164	362 - 134	
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	882.1 ± 707.7	348.6 ± 266.3	60
	1750.5 - 147.5	656.1 - 19.6	
DBO ₅ (mg O ₂ L ⁻¹)	356.6 ± 214.5	105.9 ± 86.5	70
	600 - 53.3	233.3 20	

Média ± Desvio Padrão (Mínimo - Máximo); *Não se aplica
Mean ± Standard Deviation (Minimum - Maximum); *Not applicable

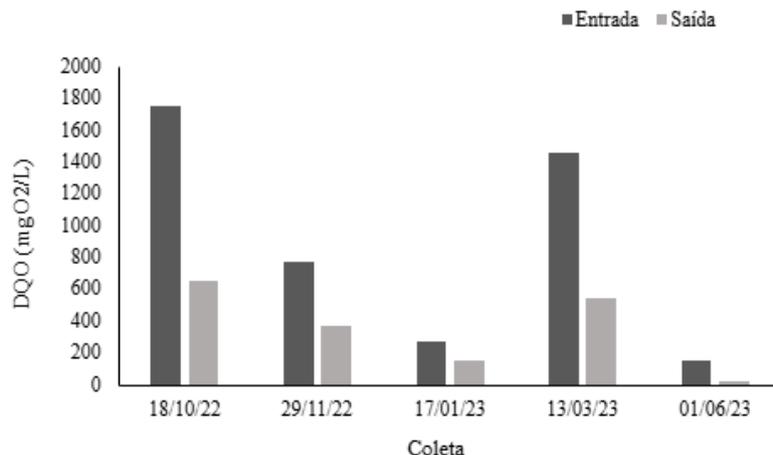
Conforme os dados apresentados, o biofiltro utilizado neste estudo demonstrou eficiência na redução de fósforo, nitrogênio amoniacal, magnésio, sólidos totais dissolvidos (STD), DQO e DBO₅. Para o parâmetro fósforo, os valores médios na entrada e saída do sistema foram de 6,1 mg L⁻¹ e 3,7 mg L⁻¹, respectivamente, resultando em uma eficiência de remoção de 60%. Os valores médios de nitrogênio amoniacal foram de 24,3 mg N-NH₃ L⁻¹ na entrada e 10,7 mg N-NH₃ L⁻¹ na saída, com uma eficiência de 56%.

Em relação ao magnésio, os valores médios observados foram de 432,8 mg L⁻¹ na entrada e 344,4 mg L⁻¹ na saída, com uma eficiência de remoção de 20%. Já para os STD, os valores médios foram de 332,3 mg L⁻¹ na entrada e 249,2 mg L⁻¹ na saída, correspondendo a uma eficiência de 25%.

Os valores médios de entrada e saída para a DQO foram de 882,1 mg L⁻¹ e 348,6 mg L⁻¹, respectivamente, resultando em uma remoção média de 60%. Para a DBO₅, os valores médios de entrada e saída foram de 356,6 mg L⁻¹ e 105,9 mg L⁻¹, alcançando uma eficiência de 70%. Esses resultados indicam que o sistema estudado demonstrou eficiência comparável a estudos semelhantes, como o de Costa et al. (2022), que avaliaram o desempenho de um sistema de vermifiltro no tratamento de efluentes domésticos, obtendo remoções equivalentes para DQO e DBO₅. Da mesma forma, Dombroski et al. (2019) analisaram a eficiência de remoção desses parâmetros em três unidades de biofiltro, registrando remoções médias de DQO de 82, 91 e 64%. Para a DBO₅, a eficiência média foi de 93 e 98% em dois dos biofiltros analisados.

A Figura 6 apresenta a variação dos valores de DQO nas amostras de entrada e saída do biofiltro convencional, ao longo do período de monitoramento. Observou-se variações nos valores de DQO em todas as amostragens realizadas, refletindo flutuações nas características das águas cinzas brutas. No entanto, em todas as coletas, houve uma redução nos valores de DQO após a passagem pelo sistema de tratamento, demonstrando a eficiência do biofiltro convencional na remoção de matéria orgânica. A eficiência do sistema variou entre 46 e 87%, com valores de 63, 52, 46, 62 e 87% nas cinco campanhas realizadas, respectivamente.

Figura 6 - Variação temporal dos valores de DQO na água cinza bruta e tratada ao longo do período de monitoramento
Figure 6 - Temporal variation of COD values in raw and treated gray water over the monitoring period



Observou-se que o pH não sofreu alterações significativas durante o processo de tratamento, apresentando valores médios de 6,58 na entrada do sistema e 6,92 na saída. Esse parâmetro é de grande importância no tratamento de águas cinzas, devido à sua alta influência em tratamentos biológicos (Rojas et al., 2020). Quanto à condutividade elétrica (CE), verificou-se uma leve redução ao final do tratamento, com médias de 624 µS/cm na entrada e 611 µS/cm na saída.

Ao analisar os resultados dos parâmetros cloretos, sódio e cálcio (Tabela 5), observou-se um aumento nas concentrações desses íons na saída do biofiltro convencional em comparação à entrada. Esse comportamento indica que o leito filtrante utilizado no sistema pode estar contribuindo para a liberação desses íons, uma vez que o tipo de substrato utilizado pode influenciar diretamente as características da água cinza tratada, devido à composição química dos materiais (Marques et al., 2024).

Tabela 5 - Valores médios, desvio padrão, valores mínimos e máximos das concentrações de Cálcio, Cloretos e Sódio nas amostras de entrada e saída do biofiltro convencional

Table 5 - Average values, standard deviation, minimum and maximum values of Calcium, Chloride and Sodium concentrations in the input and output samples of the conventional biofilter

Parâmetro	Entrada	Saída
Cálcio (mg L ⁻¹)	301.01 ± 131.6	432.1 ± 185.6
	437.1 - 168.7	641.9 - 207.5
Cloretos (mgCl/L ⁻¹)	52.302 ± 21.30	60.89 ± 18.7
	72.72 - 21.81	86.22 - 35.45
Sódio (mg L ⁻¹)	62.2 ± 23.5	83.6 ± 18.5
	98 - 33	109 - 60

Quanto ao sódio, observa-se que em 60% das amostras houve aumento dos teores na água cinza ao passar pelo biofiltro, com aumentos nos valores das concentrações de sódio da ordem de 75%. Este aumento pode estar associado ao material utilizado como leito filtrante no biofiltro, como palhas e raspas de madeira. Considerando que o elemento sódio, em concentração excessiva promove a salinização do solo ou sodificação, provocando a dispersão das partículas, e, ocasionando a diminuição da porosidade e permeabilidade do solo (De Jesus et al., 2020), este acréscimo deve ser investigado. De fato, Franca et al. (2022) observaram que a irrigação com água cinza aumentou a salinidade do solo ao se irrigar frutícola no semiárido com água cinza.

Dessa forma, decidiu-se alterar em um protótipo de biofiltro, uma das camadas do leito filtrante,

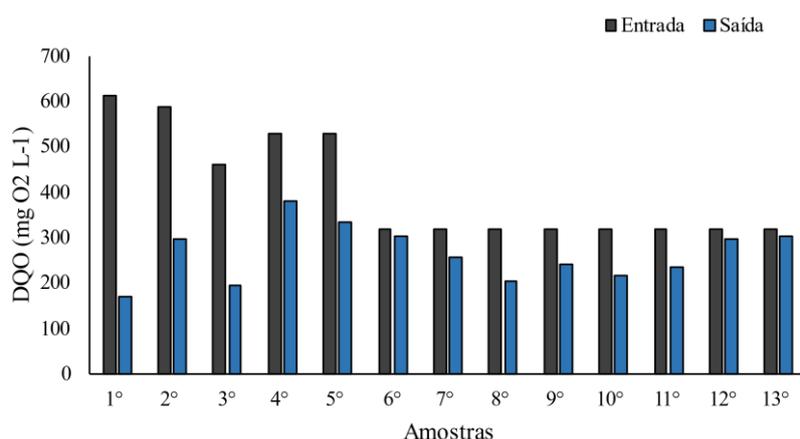
trocando as raspas de madeira por vidro, tal como está exposto na metodologia e resultados apresentados a seguir.

3.3 Avaliação do efeito do meio filtrante em biofiltros para tratamento da água cinza: eficiência do biofiltro modificado com vidro como material filtrante

Para avaliar o desempenho do biofiltro adaptado com leito filtrante de vidro na remoção de matéria orgânica, foi realizada a análise de DQO. Os resultados referentes à variação deste parâmetro antes e após a filtração estão presentes no gráfico da Figura 5 e na Tabela 6.

Figura 5 - Variação dos valores de DQO na água cinza bruta e tratada pelo protótipo do biofiltro ao longo do período de monitoramento

Figure 5 - Variation of COD values in raw gray water and in water treated by the biofilter prototype over the monitoring period



Observa-se uma redução no parâmetro DQO após a passagem do efluente pelo biofiltro modificado. Os resultados obtidos ao longo do período experimental demonstram níveis consistentes de remoção, com todos os valores indicando diminuição na saída do sistema.

O biofiltro convencional, avaliado nas cinco campanhas, apresentou eficiências de 63, 52, 46, 62 e 87%, variando entre 46 e 87%. Já o biofiltro modificado foi monitorado em treze carreiras de filtração, com eficiências variando de 5 a 72% conforme apresentado na Tabela 6. Resultados semelhantes foram observados por Barros (2017) em um estudo que utilizou uma unidade de tratamento de água cinza com camadas filtrantes compostas por areia e resíduos de vidro da construção civil, alcançando uma eficiência média de 63,96% na redução do parâmetro DQO.

Tabela 6 - Eficiência de remoção de DQO nos biofiltros convencional e modificado ao longo do período de monitoramento

Table 6 - COD removal efficiency in conventional and modified biofilters over the monitoring period

Amostra	Biofiltro Modificado (%)	Biofiltro Convencional (%)*
1°	72	63
2°	49	52
3°	57	46
4°	28	62

5°	37	87
6°	5	*
7°	19	*
8°	36	*
9°	24	*
10°	32	*
11°	26	*
12°	7	*
13°	5	*

*Resultados

*Results

No entanto, a performance do biofiltro deste estudo sofreu variações ao longo da filtração. A melhor performance de remoção ocorreu nas primeiras carreiras de filtração. Caindo para metade na sexta carreira. Observa-se que não foi realizado nenhum procedimento de limpeza ou lavagem do biofiltro e, no entanto, a eficiência de remoção vai crescendo com 19% na sétima carreira e atinge 36% na oitava carreira, mantendo um percentual médio de 30% até a décima primeira carreira, quando volta a cair atingindo 5% de remoção. Tais resultados também são similares aos encontrados por Mohammed et al. (2024), com remoções de 28,67%, porém utilizando pseudocaule de bananeira como meio filtrante.

Para avaliar o desempenho do biofiltro com leito de vidro em relação às concentrações de sódio no efluente tratado, a Tabela 7 apresenta os valores de sódio obtidos em 13 amostras de água cinza filtradas no biofiltro modificado e em cinco amostras coletadas no biofiltro convencional (já apresentadas na Tabela 5)

Tabela 7 - Valores de sódio nas amostras de saída das 13 carreiras de filtração do biofiltro modificado e das 5 amostras do biofiltro convencional

Table 7 - Sodium values in the output samples of the 13 filtration rows of the modified biofilter and the 5 samples of the conventional biofilter

Amostra	Sódio (mg L ⁻¹)	
	Biofiltro Modificado	Biofiltro Convencional
1°	30	93
2°	38	60
3°	36	81
4°	38	109
5°	36	75
6°	37	-
7°	38	-
8°	41	-
9°	37	-
10°	38	-
11°	38	-
12°	38	-
13°	41	-

Os valores de sódio na água cinza tratada pelo biofiltro modificado variaram de 30 a 41 mg L⁻¹ ao longo das 13 carreiras de filtração, enquanto no biofiltro convencional os valores oscilaram entre 75 e 109 mg L⁻¹

nas cinco campanhas realizadas. Observa-se que, em todas as amostras de saída do biofiltro modificado, as concentrações de sódio foram menores em comparação às registradas nas amostras tratadas pelo biofiltro convencional. Esses resultados indicam que o aumento da concentração de sódio na água cinza tratada está relacionado ao leito filtrante do biofiltro convencional, apontando a influência do material filtrante na qualidade da água cinza tratada.

A aplicação de biofiltros com materiais alternativos, como o vidro triturado, apresenta diversos benefícios para a sociedade. Do ponto de vista ambiental, contribui para a gestão sustentável dos recursos hídricos, ao promover o reuso de águas cinzas. Essa tecnologia pode ser implementada em comunidades rurais com acesso limitado a sistemas de saneamento, promovendo a melhoria da qualidade de vida e contribuindo para a redução dos riscos à saúde pública associados ao descarte inadequado de efluentes.

O reaproveitamento de resíduos sólidos, como o vidro, reduz os custos de disposição final e agrega valor a materiais que seriam descartados. Trata-se de uma solução sustentável, viável, de baixo custo, fácil operação e manutenção, o que amplia suas possibilidades de replicabilidade em diferentes contextos, especialmente em regiões semiáridas ou com escassez hídrica.

4. Conclusão

As amostras de águas cinzas analisadas apresentam diferentes níveis de biodegradabilidade, sugerindo que a escolha do processo de tratamento deve ser baseada em uma avaliação das características de cada amostra. Os resultados obtidos demonstraram que o vidro triturado pode ser uma alternativa eficiente aos materiais tradicionalmente utilizados, contribuindo para a remoção de matéria orgânica das águas cinzas e consequente melhoria da qualidade da água cinza tratada.

Além disso, os dados referentes às concentrações de sódio mostram que no biofiltro modificado não houve aumento na concentração de sódio no efluente (água cinza) tratado, quando comparado ao biofiltro convencional. Essa diferença reforça a influência do material filtrante na composição final da água tratada e indica que o uso de vidro triturado pode mitigar o aumento da concentração de sódio, tornando-se uma alternativa viável para reduzir a salinização do efluente, fator relevante para o reuso agrícola e conservação do solo no que se refere a sodificação. Além disso, sua aplicação em biofiltros representa uma solução sustentável para o reaproveitamento desse resíduo.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo incentivo financeiro por meio da bolsa PIBIC, ao FNDE e à Universidade Federal do Vale do São Francisco pelo apoio institucional, e ao Instituto Regional da Pequena Agropecuária Apropriada (IRPAA) pela parceria e suporte nas atividades de pesquisa.

6. Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 13.969**. Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 60 p.

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association, Water Environmental Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 edição, Washington, APHA/AWWA/WEF, 2012.

Bacchi, A. A. M. (2024). **Dificuldades inerentes da reciclagem de vidros no Brasil e suas alternativas**.

Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, SP, Brasil.

Barros, J. P. R. (2017). **Análise de eficiência de um filtro com leito de areia associado a resíduos de vidro da construção civil no tratamento de água cinza**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, Instituto Federal de Sergipe, Aracaju, Sergipe, SE, Brasil.

Bezerra, B. H. S.; Souza, N. C.; Santos, W. B.; Ferreira, W. B.; Silveira, T. N.; Negreiros, G. S. V. (2024). Sistema de tratamento de águas cinzas como potencialidade de reuso e autonomia na agricultura familiar de Alagoa Nova - PB. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, 17(1), 8700-8716.

Bissani, A. C.; Castilhos D. D.; Meurer J. E.; Tedesco J. M. (2017). **Fundamentos de química do solo**. CIP - Catalogação Internacional na Publicação F981. 6ª. Ed. / Egon José Meurer, Editor. Porto Alegre.

Braga, E. A. S.; Aquino, M. D.; Malveira, J. Q.; Capelo Neto, J.; Alexandrino, C. D. (2012). Avaliação da biodegradabilidade das águas de lavagem provenientes da etapa de purificação do biodiesel produzido com óleo extraído das vísceras de tilápia. **Rega**, 9(2), 35-45.

Conselho Regional de Química - CRQ. **2022 – Ano Internacional do Vidro**. Disponível em: <https://crqsp.org.br/2022-ano-internacional-do-vidro/>. Acesso em: 4 fev. 2024.

Costa, T. P.; Silva, L. T. (2016). Ater no semiárido: um encontro de possibilidades e desafios para o desenvolvimento rural do território de identidade Sertão São Francisco-Bahia. **EXTRAMUROS-Revista de Extensão da UNIVASF**, 4(2), 33-53.

De Jesus, F. L. F.; Santos, O. N. A.; Junior, M. V. T.; Gomes, T. M.; Rossi, F.; Román, R. M. S. (2020). Águas residuárias para irrigação no Brasil: uma abordagem química, física e microbiológica. **Irriga**, 25(3), 562-589.

Dias, G. F. X. (2024). **Microplásticos em água cinza**. Dissertação de mestrado em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, MS, Brasil.

Dombroski, S. A. G.; Sousa, A. B.; Silva, J. K. M.; Filho, F. C. C.; Costa, T. H. (2019). Sistema simplificado para tratamento de água cinza em escala familiar. **Anais do congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental**. Natal, RN, Brasil, 30.

Edwin, G. A.; Gopalsam, P.; Muthu, N. (2014). Characterization of domestic gray water from point source to determine the potential for urban residential reuse: a short review. **Applied Water Science**, 4(1), 39-49.

Figueiredo, I. C. S.; Duarte, N. C.; Coasaca, R. L.; Magalhães, T. M.; Barbosa, A. C.; Portela, D. G.; Tonetti, A. L. (2019). Águas cinzas em domicílios rurais: separação na fonte, tratamento e caracterização. **Revista DAE**, 67(220).

Franca, C. L. E.; Amorim, M. C. C.; Olszewski, N.; Santos, Belém, C. S. (2022). Use of treated graywater for fruit irrigation in the semiarid region: Legal aspects and soil quality. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, 17(3), 167-177.

Hassan, K.; Alzahrani, A.; Alotaibi, N. M.; Helmy, M. Mohamed Helm. (2024). Performance of an integrated household greywater treatment system for water optimization and reuse. **Applied Water Science**, 14(11), 19

Leonel, L. P.; Bize, A.; Mariadassou, M.; Midoux, C.; Schneider, J.; Tonetti, A. L. (2022). Impacts of disinfected wastewater irrigation on soil characteristics, microbial community composition, and crop yield. **Blue-Green Systems**, 4(2), 247-271.

Maiga, Y.; Takahashi, M.; Somda, T. Y. K.; Maiga, A. H. (2015). Greywater treatment by high rate algal pond under sahelian conditions for reuse in irrigation. **Journal of Water Resource and Protection**, 7(14), 1143.

Marques, V. S. (2024). **Eficiência de biofiltros na qualidade da água em aquicultura**. Dissertação de Mestrado em Agroquímica, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, Espírito Santo, ES, Brasil.

Passos, E. S.; Brandão, L. F. S.; Carvalho, R. S. (2021). Tratamento de águas cinzas por meio de filtro com leito associado de resíduos da construção civil, esponjas utilizadas e antracito. **Revista Tecnologia e Ambiente**, 27, 34-49.

Passos, E. S. (2022). **Reúso de águas cinzas: análise da eficiência de filtro composto por materiais alternativos**. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, SE, Brasil.

PROSAB - Programa De Pesquisas Em Saneamento Básico. **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006, 427 p. Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/Esgoto-Prosab_-_final.pdf. Acesso em: 29 jan. 2025.

Rapoport, B. (2004). **Águas cinzas: caracterização, avaliação financeira e tratamento para reúso domiciliar e condominial**. Dissertação de Mestrado em Saúde Pública, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Rojas, E. M.; Rascón, J.; Huantagari, L. Q.; Quintana, S. C.; Oliva, M.; Pino, M. E. M. (2020). Mixed greywater treatment for irrigation uses. **Revista Ambiente & Água**, 15(6), e2599.

Santiago, F.; Felipe, J.; Blackburn, R.; Dombroski, S.; Monteiro, L.; Nanes, M.; Dias, I.; Gurgel, R.; Oliveira, B.; Oliveira, G.; Santos, W.; Pinheiro, M. R.; Sales, F.; Silva, J. (2015). **Manual de implantação e manejo do sistema bioágua familiar: reúso de água cinza doméstica para a produção de alimentos na agricultura familiar do semiárido brasileiro**. Carnaúbas: ATOS, 194.

Soares, T. F. (2018). **Reciclagem do vidro para embalagens de alimentos e bebidas como etapa do Sistema de Gestão Ambiental**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, MG, Brasil.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. (2012). **Guidelines for Water Reuse, Washington D.C. 643**. (EPA/600/R-12/618).

Von Sperling, M. **Introdução à qualidade de águas e ao tratamento de esgotos**. Minas Gerais: 2005, 2 ed.

Waqkene, T.; Mereta, S. T.; Terfe, A.; Ousman, W. Z. (2023). Integrated methods for household greywater treatment: modified biofiltration and phytoremediation. **Journal of Environmental and Public Health**, 7778240.