



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Manta Filtrante Biomimética para Produzir água Potável Baseada na Estrutura Funcional do Xilema do Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*)

Wedsley Oliveira de Melo¹, Humberto Barbosa², Enio P. Souza³, Catarina Oliveira Buriti⁴

¹ Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brazil. Zip code: 58.109-970; wedsley@gmail.com. ² Postgraduate Program of Engineering and Natural Resource Management, Federal University of Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba, Brazil. Zip Code: 58429-900, PB, Brazil; barbosa33@gmail.com. ³ Department of Atmospheric Sciences, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brazil. Zip code: 58.429-900, PB, Brazil; enio.souza@ufcg.edu.br. ⁴ Catarina de Oliveira Buriti - National Semi-Arid Institute (INSA), Ministry of Science, Technology and Innovations, Campina Grande, Paraíba, Brazil. Zip Code: 58434-700. catarina.buriti@gmail.com

Artigo recebido em 13/05/2025 e aceito em 02/06/2026

RESUMO

A escassez e a contaminação da água constituem desafios crônicos no Semiárido brasileiro, exigindo soluções de tratamento no ponto de uso que sejam acessíveis e sustentáveis. Este estudo investiga o potencial do tecido de xilema da planta nativa *Spondias tuberosa* (umbuzeiro) como filtro biomimético para purificação da água. A microestrutura anatômica do xilema foi caracterizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), revelando uma rede porosa de canais vasculares adequados à filtração. A eficácia do sistema foi avaliada experimentalmente por meio da análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos em amostras de água de chuva e água salobra antes e após a filtração por gravidade. Os resultados demonstraram remoção completa (100% de eficiência) da bactéria indicadora de contaminação fecal *Escherichia coli* em ambas as fontes hídricas, reduzindo as concentrações iniciais de 4,0 e 8,0 NMP/100 mL para níveis não detectáveis (0,0 NMP/100 mL), atendendo, assim, a um critério essencial de potabilidade. Embora os níveis de coliformes totais tenham permanecido elevados — característica comum em águas superficiais não tratadas —, a eliminação específica de *E. coli* evidencia a seletividade do filtro. Os parâmetros físico-químicos, incluindo metais, mantiveram-se dentro dos limites seguros. Esses achados indicam que o xilema de *S. tuberosa* é um material promissor, de baixo custo e biodegradável, para o desenvolvimento de tecnologias de filtração baseadas na natureza. Essa abordagem representa uma via viável para aprimorar a qualidade da água e promover a saúde pública em comunidades rurais vulneráveis.

Palavras-chave: biomimética; filtração por xilema; *Spondias tuberosa*; purificação da água; região semiárida; captação de água da chuva; soluções baseadas na natureza.

Radiation balance in a preserved Caatinga ecosystem during a year of drought in the semi-arid region of Pernambuco

ABSTRACT

Water scarcity and contamination are chronic challenges in the Brazilian Semiarid region, demanding accessible and sustainable point-of-use treatment solutions. This study investigates the potential of xylem tissue from the native plant *Spondias tuberosa* (umbuzeiro) as a biomimetic filter for water purification. The anatomical micro-structure of the xylem was characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM), which revealed a porous network of vascular channels suitable for filtration. The system's efficacy was experimentally evaluated by analyzing key physicochemical and microbiological parameters in rainwater and brackish water samples before and after gravity-driven filtration. The results demonstrated the complete removal (100% efficiency) of the fecal indicator bacteria *Escherichia coli* from both water sources, reducing initial concentrations of 4.0 and 8.0 MPN/100 mL to non-detectable levels (0.0 MPN/100 mL), thus meeting a critical standard for potability. While total coliform levels remained high, a common trait for untreated surface water, the specific elimination of *E. coli* highlights the filter's selectivity. Physicochemical parameters, including metals, remained within safe limits. These findings indicate that *S. tuberosa* xylem is a promising, low-cost, and biodegradable material for developing nature-based filtration technologies. This approach represents a viable pathway to improve water quality and enhance public health in vulnerable rural communities.

Keywords: biomimética; filtração por xilema; *Spondias tuberosa*; purificação da água; região semiárida; captação de água da chuva; soluções baseadas na natureza.

Melo, Q. O., Barbosa, H., Souza, E. P., Buriti, C. O.

Introdução

O desafio de garantir o acesso universal à água potável e segura é uma das questões mais críticas do nosso tempo, com impacto direto na saúde pública, no desenvolvimento social e na estabilidade econômica. Globalmente, aproximadamente 2,1 mil milhões de pessoas não têm acesso a serviços de água potável geridos de forma segura, uma lacuna particularmente acentuada em comunidades rurais e periurbanas de regiões em desenvolvimento (WHO & UNICEF, 2023). Este déficit não é apenas uma questão de disponibilidade hídrica, mas também de qualidade, uma vez que a água contaminada é um dos principais vetores de doenças infecciosas como diarreia, cólera e febre tifoide, responsáveis por milhões de mortes anuais, sendo as crianças com menos de cinco anos o grupo demográfico mais vulnerável.

O Semiárido brasileiro exemplifica este desafio de forma marcante. Caracterizada por baixos índices pluviométricos, distribuição irregular de chuvas e altas taxas de evaporação, a região é extremamente vulnerável a secas recorrentes e à escassez hídrica (Lima, 2021). A sobrevivência de grande parte da sua população ocorre frequentemente em condições adversas, com acesso limitado ou inexistente a sistemas formais de abastecimento de água. Desde fins do século XIX, houve a institucionalização das políticas para adaptação à seca, na atual região do Semiárido brasileiro. Até os anos 1990, a política predominante foi a "Solução hidráulica", baseada na construção de grandes açudes e barragens, para centralizar o armazenamento e aproveitamento da água. Em fins dos anos 1990, teve início à política descentralizada de construção de cisternas ou outras tecnologias sociais hídricas para coleta e armazenamento de água (BURITI, BARBOSA, 2018). Embora importantes, estas soluções, por si sós, têm-se revelado insuficientes para satisfazer as crescentes necessidades da população, principalmente em termos da qualidade e da quantidade da água armazenada (Gomes e Heller, 2016). Consequentemente, as comunidades locais dependem fortemente de tecnologias alternativas de armazenamento de água, como os sistemas de captação de água da chuva (cisternas), que são cruciais para a resiliência.

No entanto, a qualidade da água armazenada nestes sistemas é uma preocupação significativa. A seca severa de 2012 evidenciou a fragilidade desta infraestrutura, uma vez que as cisternas foram muitas vezes abastecidas com água de fontes contaminadas, como barreiros e açudes

(Andrade et al., 2015; Machado, Dias, Silva, 2017). Além disso, as superfícies de captação, como telhados precários, e os métodos de transporte, como carros-pipa, introduzem riscos significativos de contaminação química e microbiológica (Gomes et al., 2012; Gould, 1999; Lye, 2002). Esta realidade sublinha uma lacuna crítica: embora a captação de água da chuva seja uma estratégia de adaptação vital, carece frequentemente de um componente de tratamento de água no ponto de uso que seja integrado, acessível e eficaz.

Neste contexto, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e a biomimética — a emulação de modelos, sistemas e processos da natureza para resolver problemas humanos — oferecem uma fronteira promissora para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis (Vincent, 2006; Melo, 2019). Estas abordagens aproveitam a eficiência das adaptações biológicas aperfeiçoadas ao longo de milhares de milhões de anos de evolução. Este estudo foca-se no potencial do tecido do xilema de espécies de plantas nativas, que é naturalmente projetado para o transporte e a filtração de água. Especificamente, investigamos o xilema de *Spondias tuberosa* (conhecida localmente como umbuzeiro), uma espécie de planta endêmica do Semiárido brasileiro e altamente adaptada às suas condições ambientais extremas. As características morfológicas e funcionais únicas do seu xilema sugerem que este pode servir como um filtro natural, biodegradável e de baixo custo.

A presente investigação postula a hipótese de que a arquitetura porosa do xilema de *Spondias tuberosa*, uma espécie vegetal notavelmente adaptada às condições semiáridas, incorpora elementos estruturais e funcionais que servem de inspiração para o desenvolvimento de uma membrana filtrante biomimética. Argumenta-se que esta membrana, concebida a partir da replicação dos nano e microvasos presentes no xilema, demonstrará capacidade eficaz na remoção de contaminantes físicos e microbiológicos da água, estabelecendo-se, assim, como um protótipo de filtro biomimético com aplicabilidade viável. Os objetivos centrais deste estudo são: (1) caracterizar a estrutura anatômica e morfológica do xilema de *S. tuberosa* através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV); e (2) avaliar experimentalmente a sua eficácia de filtração, analisando parâmetros físico-químicos e microbiológicos chave em amostras de água da chuva e salobra, antes e após o tratamento. Ao explorar esta abordagem inovadora, o estudo visa contribuir com uma tecnologia escalável e socialmente apropriada para reforçar a segurança hídrica e a saúde pública em

comunidades vulneráveis, alinhando-se diretamente com o Objetivo de Desenvolvimento

Sustentável 6 da ONU (Bárta, 2021; Albuquerque et al., 2022).

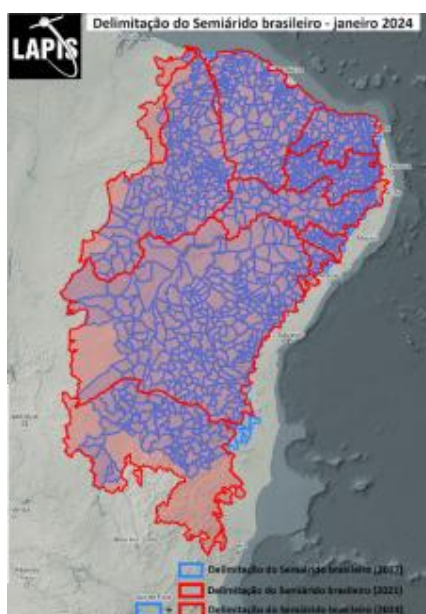


Figura 1. (a) Mapa da região do Semiárido brasileiro, uma área caracterizada por alta vulnerabilidade hídrica. (b) Uma cisterna típica de captação de água da chuva utilizada por comunidades rurais, destacando a necessidade de soluções de tratamento de água no ponto de uso.

Material e métodos

Área de Estudo e Coleta da Amostra de Xilema

O material vegetal foi coletado em Campina Grande, município localizado no estado da Paraíba, no Semiárido brasileiro. A coleta foi realizada na Estação Experimental Professor Ignácio Salcedo, pertencente ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA-MCTI), um centro de referência em pesquisas sobre espécies vegetais adaptadas às condições de aridez e semiaridez.

Um galho de um espécime saudável de *Spondias tuberosa* com 8 anos de idade foi cuidadosamente selecionado e coletado no dia 9 de maio de 2024, seguindo protocolos de coleta profissional para garantir a integridade da planta. O galho coletado tinha aproximadamente 50 cm de comprimento.

Preparação dos Filtros de Xilema

Após a coleta, o galho foi imediatamente processado. A casca foi cuidadosamente removida com o auxílio de um estilete para expor o tecido do xilema. O xilema exposto foi então seccionado em segmentos menores, com comprimentos variando de 1 cm a 10 cm e um diâmetro padronizado de aproximadamente 1 cm. Em seguida, esses segmentos foram submetidos a um processo de secagem em estufa a uma temperatura constante de 65°C por 48 horas, a fim de remover a umidade

residual e preparar o material para os ensaios de filtração.

Coleta das Amostras de Água

Dois tipos de água, representativos das fontes disponíveis para as comunidades rurais da região, foram utilizados nos experimentos de filtração:

1. Água de Chuva: Coletada de um sistema residencial de captação de água pluvial (cisterna) em Campina Grande durante o período chuvoso (junho-julho).

2. Água Salobra: Proveniente de um poço local, caracterizada por uma salinidade naturalmente mais elevada.

Caracterização Morfológica do Xilema

A microestrutura anatômica do xilema de *S. tuberosa* foi analisada utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca TESCAN, modelo VEGA Compact. Antes da análise, as amostras de xilema passaram por um processo de metalização, no qual foram revestidas com uma fina camada de ouro. Este procedimento é essencial para tornar as amostras biológicas condutoras, permitindo a obtenção de imagens de alta resolução de sua superfície e estrutura porosa. A análise focou na identificação e caracterização dos elementos vasculares, como vasos e fibras, que constituem as vias de filtração.



Figura 2. Fluxograma metodológico. (a) Espécime de *Spondias tuberosa* no local de coleta. (b) Preparação dos filtros de xilema através da remoção da casca e seccionamento do material. (c) Imagem de alta resolução obtida por MEV do xilema de *S. tuberosa**, revelando sua microestrutura porosa composta por canais vasculares.

Sistema de Filtração e Ensaio Experimental

Os ensaios de filtração foram conduzidos utilizando um sistema baseado em gravidade, projetado para ser simples e replicável em contextos de poucos recursos. O sistema consistia num reservatório de água (uma garrafa PET) suspenso a uma altura de 1,80 m para criar pressão gravitacional suficiente. O filtro de xilema preparado (com 5 cm de comprimento) foi inserido numa mangueira e fixado de forma segura com uma abraçadeira para evitar vazamentos. A água contaminada (de chuva e salobra) foi introduzida

no reservatório, permitindo a sua percolação através do filtro de xilema. A água filtrada (permeado) foi coletada num recipiente estéril na saída do sistema. O sistema operou de forma contínua e amostras do permeado foram coletadas para análise subsequente.



Figura 3. Configuração experimental do sistema de filtração por gravidade. Um reservatório de água é conectado por uma mangueira ao filtro de xilema, que é fixado com uma abraçadeira. O permeado é coletado na saída para análise.

Análises Físico-Químicas e Microbiológicas

Tanto as amostras de água bruta (afluente) quanto as de água filtrada (permeado) foram submetidas a uma série de análises no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES/UFCG), seguindo os métodos padrão descritos pela American Public Health Association (APHA, 2017).

Parâmetros Físico-Químicos: As análises incluíram pH, turbidez, cor aparente, sólidos dissolvidos totais, alcalinidade, CO₂ livre, sulfato (SO₄²⁻), cloreto (Cl⁻), nitrato (NO₃⁻), nitrito (NO₂⁻), sódio (Na⁺), potássio (K⁺), alumínio (Al³⁺) e ferro total (Fe).

Parâmetros Microbiológicos: A presença e a concentração de Coliformes Totais e *Escherichia coli* foram quantificadas pelo método do Número Mais Provável (NMP/100 mL). Esta é uma análise crítica, visto que a *E. coli* é o principal indicador de contaminação fecal recente.

Os resultados foram comparados com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS N.º 888/2021 do Ministério da Saúde do Brasil para determinar a eficácia do sistema de filtração.

morfológica do xilema de *Spondias tuberosa** e das análises físico-químicas e microbiológicas das amostras de água antes e após o processo de filtração.

Caracterização Morfológica do Xilema

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou a microestrutura interna do xilema de *S. tuberosa**. As imagens obtidas confirmaram a presença de uma estrutura porosa e heterogênea, composta por múltiplos canais vasculares (vasos do xilema) e fibras lignificadas, que são responsáveis pelo transporte de água e pela sustentação estrutural da planta.

Conforme ilustrado na Figura 4, os vasos do xilema apresentam-se como condutos longitudinais de diâmetros variados, dispostos de forma paralela. A estrutura porosa é visível, com aberturas que interconectam os vasos, sugerindo um caminho potencial para a percolação da água. Esta organização anatômica é fundamental para a hipótese de que o xilema pode atuar como um filtro natural, onde partículas e microrganismos podem ser retidos por mecanismos de exclusão por tamanho e adsorção superficial.

3. Resultados

Nesta seção, são apresentados os dados experimentais obtidos a partir da caracterização



Figura 4. Micrografias eletrônicas de varredura (MEV) da estrutura do xilema de *Spondias tuberosa**. (A) Visão longitudinal mostrando os canais vasculares paralelos (Magnificação: 1.00kx). (B) Detalhe da superfície porosa e das paredes dos vasos (Magnificação: 2.00kx), evidenciando a microestrutura relevante para a filtração.

Análise Físico-Química da Água de Chuva Filtrada

Os resultados das análises físico-químicas das três amostras de água de chuva, coletadas em momentos distintos e submetidas ao processo de filtração, são apresentados na Tabela 1 e comparados com os valores de referência da Portaria GM/MS nº 888/2021.

Os parâmetros de sódio, alumínio e ferro mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos

pela legislação em todas as amostras analisadas. O potássio, embora não possua um limite normativo, apresentou uma discreta elevação entre as coletas. A alcalinidade total mostrou-se elevada, com valores consistentemente acima de 680 mg/L, e o CO₂ livre aumentou nas amostras mais recentes.

Tabela 1. Resultados dos parâmetros físico-químicos da água de chuva filtrada em três coletas distintas.

 Quadro Comparativo dos Parâmetros Físico-Químicos				
Parâmetro	Chuva 1	Chuva 2	Chuva 3	Valor de Referência
Sódio (Na ⁺) (mg/L)	168,8	178,1	178,4	200,0 ✓
Potássio (K ⁺) (mg/L)	7,5	8,6	8,9	Não estabelecido
Alumínio (Al ³⁺) (mg/L)	0,00	0,01	0,01	0,2 ✓
Ferro Total (Fe) (mg/L)	0,02	0,03	0,03	0,3 ✓
Alcalinidade em Bicarbonatos	68,0	67,0	68,0	Não estabelecido
Alcalinidade Total (CaCO ₃)	691,1	681,1	683,1	Não estabelecido
Alcalinidade (hidróxidos/carbonatos)	0,0	0,0	0,0	—
CO ₂ livre (mg/L)	7,0	9,0	9,0	Não estabelecido

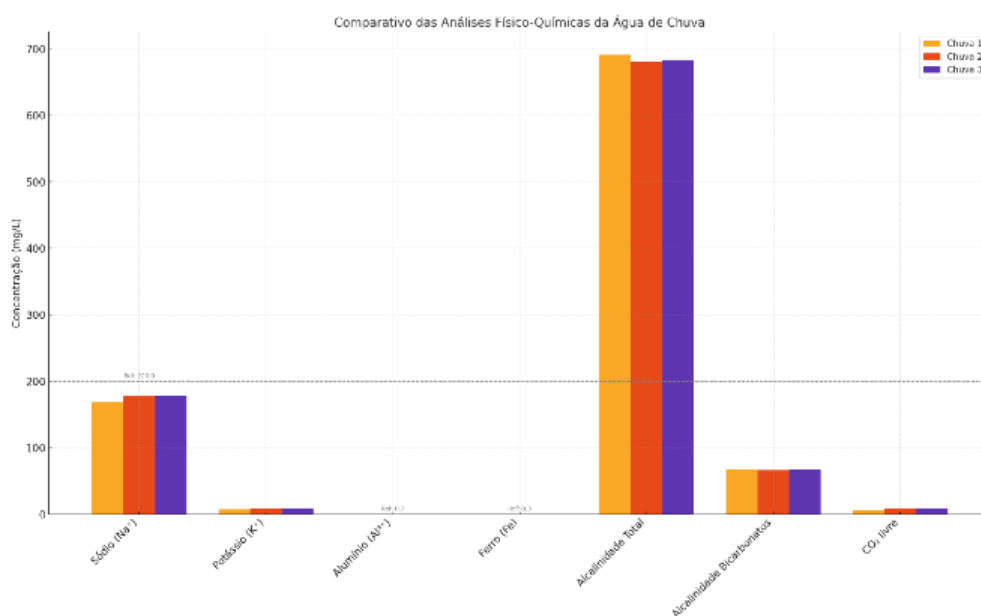


Figura 5. Comparativo gráfico dos níveis de íons e alcalinidade nas amostras de água de chuva filtrada.

Análise Microbiológica da Água

As análises microbiológicas foram determinantes para avaliar a eficácia do filtro na remoção de contaminação de origem fecal. Os resultados para as amostras de água de chuva e de água salobra são apresentados a seguir.

3.3.1. Amostra de Água de Chuva

A amostra de água de chuva bruta (antes da filtração) apresentou uma concentração de *Escherichia coli* de 4,0 NMP/100 mL. Após passar pelo filtro de xilema, a presença de *E. coli* foi completamente eliminada, com o resultado registrado como 0,0 NMP/100 mL. Em contrapartida, a concentração de Coliformes Totais permaneceu elevada em ambas as amostras (bruta e filtrada), ultrapassando o limite de quantificação do método ($>1,01 \times 10^3$ NMP/100 mL).

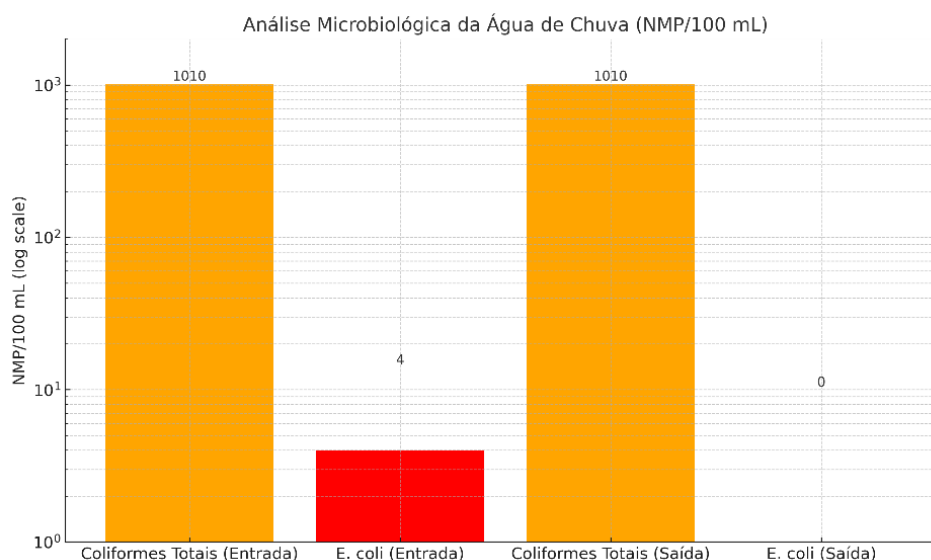


Figura 6. Concentração de Coliformes Totais e **E. coli** na água de chuva antes (Entrada) e depois (Saída) da filtração pelo xilema. A ausência da barra para **E. coli** na saída indica remoção completa.

Amostra de Água Salobra

Os resultados da análise da água salobra seguiram um padrão similar, conforme detalhado na Tabela 2. A amostra bruta continha 8,0 NMP/100 mL de *E. coli*. Após a filtração, a concentração de *E. coli* foi reduzida a 0,0 NMP/100 mL, indicando 100% de eficácia na remoção deste patógeno. Assim como na água de chuva, os níveis

de Coliformes Totais mantiveram-se acima do limite de detecção tanto na entrada quanto na saída do filtro.

Tabela 2. Resultados da análise microbiológica da amostra de água salobra, antes (bruta) e depois (filtrada) do tratamento com o filtro de xilema.

Parâmetro	Entrada (bruta)	Saída (filtrada)
Coliformes totais	$>1,01 \times 10^3$ NMP/100 mL	$>1,01 \times 10^3$ NMP/100 mL
<i>Escherichia coli</i>	8,0 NMP/100 mL	0,0 NMP/100 mL

Resultados e discussão

Os resultados obtidos neste estudo fornecem evidências promissoras sobre o potencial do xilema de *Spondias tuberosa* como material biomimético aplicado à purificação da água — uma abordagem particularmente relevante para os desafios hídricos enfrentados no Semiárido brasileiro. A discussão a seguir interpreta esses resultados, estabelecendo conexões entre as características morfoanatômicas observadas e a eficácia do processo de filtração, ao mesmo tempo em que analisa as implicações práticas e científicas desse potencial para o desenvolvimento de tecnologias sociais hídricas sustentáveis.

A Estrutura do Xilema como um Filtro Natural Eficaz

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi fundamental para validar a premissa inicial deste trabalho. As micrografias (Figura 4) revelaram uma rede complexa de canais vasculares com diâmetros variados, uma característica anatômica que é intrinsecamente análoga às membranas de microfiltração. Esta estrutura porosa e interconectada, desenvolvida evolutivamente para o transporte eficiente de água sob estresse hídrico (Oliveira et al., 2021; Pereira et al., 2023), serve como uma barreira física capaz de reter partículas e microrganismos. Esse resultado está alinhado com investigações prévias que demonstraram a eficácia do xilema de outras espécies vegetais no processo de filtração, como no caso do pinheiro (*Pinus* spp.), cujo tecido foi capaz de remover mais de 99% das bactérias presentes na água (Boutilier et al., 2014). A estrutura anatômica observada em *Spondias tuberosa* indica que mecanismos como a exclusão por tamanho e a adsorção superficial nas paredes dos vasos lenhosos desempenham um papel central na retenção de contaminantes microbiológicos, configurando-se como fundamentos promissores para o desenvolvimento de tecnologias de purificação hídrica de baixo custo e aplicabilidade em contextos socioambientais vulneráveis (Lee et al., 2021).

Eficácia na Remoção de Contaminação Fecal: Um Indicador Chave de Sucesso

O resultado mais significativo desta pesquisa foi a completa remoção de *Escherichia coli* tanto das amostras de água de chuva (4,0 NMP/100 mL para 0,0) quanto das de água

salobra (8,0 NMP/100 mL para 0,0). A **E. coli** é o indicador padrão-ouro de contaminação fecal recente e sua presença na água para consumo humano é proibida pela Portaria GM/MS nº 888/2021 e por diretrizes internacionais (WHO, 2017). A capacidade do filtro de xilema de eliminar totalmente este patógeno (Figuras 6 e Tabela 2) representa um avanço crucial, pois ataca diretamente um dos maiores riscos à saúde pública em comunidades rurais: as doenças de veiculação hídrica.

É importante notar que os níveis de Coliformes Totais permaneceram elevados mesmo após a filtração. Este grupo de bactérias é ambientalmente diverso e sua presença não indica necessariamente um risco fecal direto, sendo comum em águas pluviais e superficiais (Boutin et al., 2015). No entanto, a sua permanência sinaliza que, embora o filtro seja altamente seletivo contra patógenos específicos como a **E. coli**, ele pode não eliminar toda a carga microbiológica. Isso sugere que, para garantir uma segurança ainda maior, o filtro de xilema poderia ser integrado a outras etapas de tratamento, como a desinfecção solar (SODIS) ou fervura, práticas já conhecidas em muitas comunidades.

Implicações para a Qualidade da Água e a Saúde Pública no Semiárido

Do ponto de vista físico-químico, o filtro demonstrou um desempenho estável, mantendo os níveis de metais como sódio, alumínio e ferro dentro dos limites de potabilidade (Tabela 1). A elevada alcalinidade observada na água de chuva filtrada é provavelmente uma característica da fonte de captação (telhados e cisternas de cimento), e não um efeito do filtro em si. Este resultado reforça a importância de se considerar todo o sistema de captação e armazenamento (SCAAC) ao avaliar a qualidade final da água.

A principal implicação deste estudo reside no seu potencial como uma tecnologia social, acessível e culturalmente apropriada. Ao utilizar uma planta nativa, o umbuzeiro, que possui um forte valor simbólico e de resiliência para as populações do Semiárido (Silva et al., 2020), a solução proposta tem uma maior chance de aceitação comunitária em comparação com tecnologias importadas. A simplicidade do sistema de filtração por gravidade, sua independência de

energia elétrica e o fato de ser biodegradável alinham-se perfeitamente aos princípios das Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e da economia circular.

Manta Filtrante

Desenvolvimento da manta filtrante biomimética a partir do xilema do umbuzeiro: transição da análise hídrica para a criação do produto.

A etapa de caracterização da qualidade da água de chuva e de fontes salobras no Semiárido brasileiro evidenciou desafios persistentes quanto à potabilidade, mesmo em fontes tradicionalmente utilizadas pelas comunidades rurais. A presença de coliformes, sólidos suspensos, turbidez elevada e variações no pH e condutividade elétrica reforçam a necessidade de soluções acessíveis, sustentáveis e adaptadas ao contexto ecológico, social e tecnológico do Semiárido. Diante desse cenário, o presente trabalho avança para a fase final de sua trajetória investigativa: o desenvolvimento de um dispositivo de filtração inspirado na biomimética, fundamentado no estudo da anatomia funcional do xilema do *Spondias tuberosa* (umbu), espécie

nativa do bioma Caatinga, amplamente adaptada às condições edafoclimáticas da região.

A proposta consiste na criação de uma manta filtrante biomimética, que simula a estrutura porosa dos vasos do xilema do umbuzeiro, especialmente suas características de condução capilar e seletividade hidráulica. As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiram a modelagem tridimensional dos canais micro e nanotubulares presentes no xilema, os quais foram transpostos para um modelo funcional replicável com tecnologias de fabricação digital, como impressão 3D em resinas biodegradáveis (PLA e PCL). Esta matriz filtrante foi projetada em formato plano e modular, com o objetivo de permitir acoplamentos diversos, desde filtros individuais até aplicações em sistemas de captação e armazenamento de água, como cisternas, tanques comunitários e estruturas móveis de emergência.



Figura 7. Modelagem tridimensional simulada da manta filtrante inspirada no xilema do umbuzeiro. Fonte: Autoria própria.

Descrição da Dinâmica Filtrante da Manta Biomimética inspirada no Xilema do Umbuzeiro

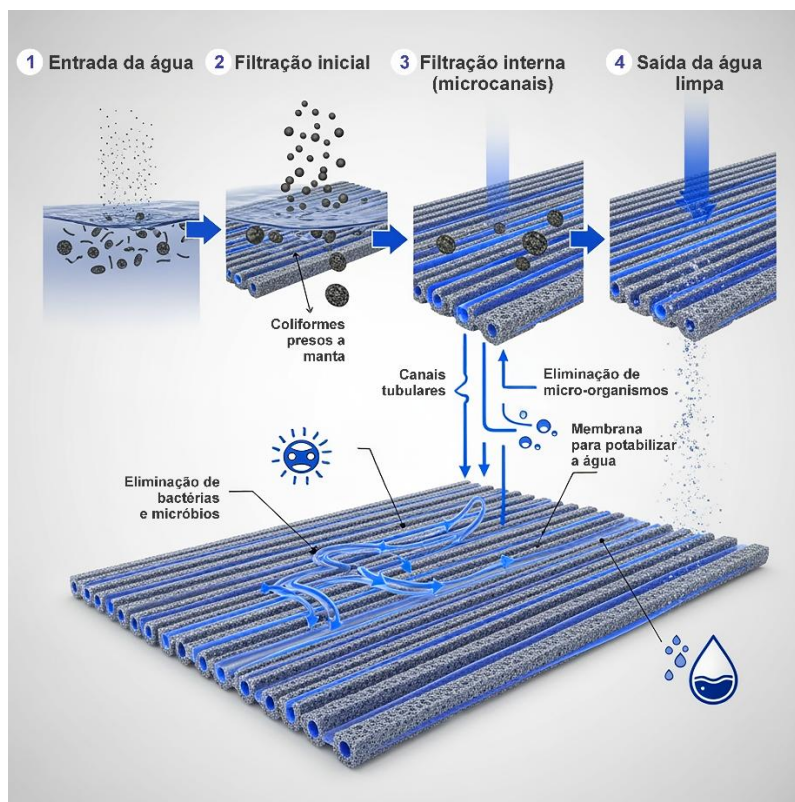


Figura 8. Modelagem tridimensional simulada das etapas de processos de filtragem da manta. Fonte: Autoria própria.

Incidência da água contaminada sobre a manta (fase de entrada):

A ilustração apresenta o início do processo com a água bruta — representada por um fluido turvo contendo partículas em suspensão, protozoários e coliformes fecais — incidindo sobre a superfície superior da manta filtrante. Esse cenário simula uma condição de captação emergencial em áreas rurais do Semiárido brasileiro, onde frequentemente se utiliza água de superfície ou acumulada em cisternas sem tratamento adequado. A simbologia gráfica inclui elementos patogênicos estilizados, reforçando o caráter microbiológico da contaminação.

Início do processo de infiltração por gravidade:

A água começa a penetrar na manta através dos microcanais inspirados nos vasos do xilema. Essa primeira interface funciona como uma barreira física seletiva, onde partículas maiores ficam retidas na superfície do material. Essa etapa é ilustrada com destaque para a atuação da microestrutura tubular, que já inicia um processo

de pré-filtragem passiva antes da entrada efetiva nos poros internos.

Filtragem estrutural nos canais internos (processo de purificação):

À medida que a água adentra os canais paralelos que compõem o interior da manta, o fluxo é direcionado através de gradientes de porosidade — dos micro aos nanoporos — desenhados com base nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do xilema. A representação visual inclui vetores indicando a direção do fluxo e ícones gráficos alusivos à retenção de microrganismos, como bactérias e vírus. Essa etapa simboliza a atuação conjunta da filtração física, adsorção superficial e possível retenção eletrostática, conforme previsto nos princípios biomiméticos aplicados.

Emissão da água purificada (fase de saída):

Ao final do trajeto interno, a água emerge da manta com aparência límpida, transparente e visualmente associada à potabilidade. Este estágio representa a entrega de um recurso hídrico seguro e de baixo custo para uso humano, reforçando o potencial da solução no contexto de tecnologias

sociais aplicadas à segurança hídrica no Semiárido. A manta filtrante biomimética inspirada na estrutura do xilema do umbuzeiro possui grande potencial para enfrentar o desafio da segurança hídrica no Semiárido brasileiro, especialmente em comunidades rurais vulneráveis. A seguir, listo formas estratégicas e realistas de uso da manta filtrante, com foco em mitigação da sede, reúso da água e acesso descentralizado à potabilidade:

Filtro interno acoplado à cisterna rural de captação de chuva

Aplicação: Instalada como camada filtrante na entrada ou saída da cisterna, filtrando a água da chuva antes do consumo humano.

Benefícios: Evita o uso de cloro ou fervura constante; Remove bactérias, protozoários e partículas orgânicas; Sustentável e biodegradável, sem geração de resíduos plásticos.

Formato recomendado: disco plano ou manta tipo cartucho, colocada no bocal de saída da cisterna, podendo ser removível para substituição periódica.

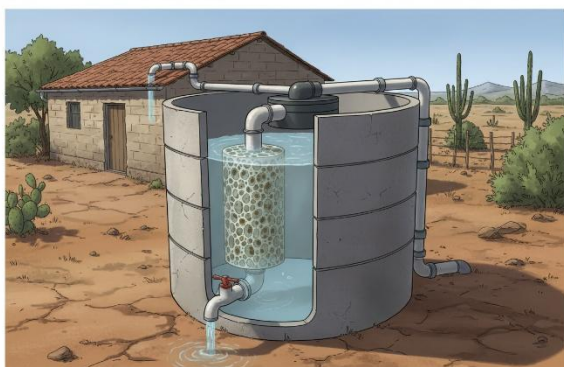


Figura 9. Simulação de uso e aplicabilidade, criada em IA (Inteligência Artificial). Fonte: Autoria própria.

Mini-filtro portátil para uso individual ou familiar

Aplicação: Versão reduzida da manta como filtro de uso pessoal em garrafas, galões, baldes ou mochilas hídricas.

Indicado para: Famílias sem cisternas; Agricultores em deslocamento; Situações emergenciais de estiagem prolongada.

Inspiração: Similar ao modelo "LifeStraw", mas com biomimética vegetal local, o que reduz custos de importação e aumenta a aceitação social.



Figura 10. Simulação de uso e aplicabilidade, criada em IA (Inteligência Artificial). Fonte: Autoria própria.

Inserção em sistemas comunitários de abastecimento (chafarizes ou carros-pipa)

Aplicação: A manta pode ser usada como pré-filtro acoplado ao ponto de saída de água em estruturas públicas de abastecimento (como chafarizes rurais ou caixas d'água abastecidas por carros-pipa do Exército).

Vantagens: Aumenta a confiança na água pública; Reduz doenças hídricas; Minimiza a dependência de sistemas de tratamento caros.



Figura 11. Simulação de uso e aplicabilidade, criada em IA (Inteligência Artificial). Fonte: Autoria própria.

Filtragem de água de reúso na agricultura familiar

Aplicação: Manta aplicada para filtrar águas cinzas tratadas (de pias, chuveiros ou tanques) para uso na irrigação de hortas comunitárias ou quintais produtivos.

Impacto: Reduz a demanda sobre a água potável; Promove segurança alimentar; Alinha-se às diretrizes de agroecologia e convivência com o Semiárido.



Figura 12. Simulação de uso e aplicabilidade, criada em IA (Inteligência Artificial). Fonte: Autoria própria.

Solução emergencial em kits de seca ou emergência humanitária

Aplicação: Fornecida junto a kits da Defesa Civil, ASA, Cáritas ou programas sociais, a manta pode funcionar como ferramenta de resiliência comunitária em períodos de colapso hídrico.

Características: Leve, compacta e biodegradável; Aplicável sem necessidade de energia ou reagentes químicos.



Figura 13. Simulação de uso e aplicabilidade, criada em IA (Inteligência Artificial). Fonte: Autoria própria.

Integração com tecnologias sociais já consolidadas

Exemplos de integração: P1MC (Programa 1 Milhão de Cisternas) P1+2 (Uma Terra e Duas Águas) Cisternas de enxurrada Barreiros trincheira Bombas d'água manuais.

Vantagem: A manta pode ser acoplada a essas tecnologias, ampliando sua eficácia no fornecimento de água limpa e segura, sem invalidar os sistemas já existentes.

Observações Técnicas

Material sugerido: PLA ou PCL com microtextura inspirada no xilema, produzido por impressão 3D ou moldagem sob pressão.

Periodicidade de troca: entre 3 e 6 meses, dependendo da carga orgânica da água.

Descarte: Biodegradável em composteiras ou lixo orgânico.

Considerações finais

Esta pesquisa teve como objetivo central investigar o potencial do xilema do umbuzeiro (*Spondias tuberosa*) como elemento inspirador para o desenvolvimento de uma manta filtrante biomimética, acoplável a tecnologias sociais hídricas no contexto do Semiárido brasileiro. Com base em análises morfológicas e testes laboratoriais, foi possível compreender aspectos estruturais e funcionais do xilema que demonstram a viabilidade conceitual da filtração natural como estratégia sustentável e de baixo custo para melhoria da qualidade da água em regiões com escassez hídrica e saneamento limitado.

A partir dos dados obtidos, foi elaborada uma simulação tridimensional de um dispositivo filtrante baseado nos princípios da biomimética vegetal, que propõe a replicação funcional de estruturas condutoras e seletivas do xilema na forma de um produto de design adaptado às condições do Semiárido. Tal proposta foi ancorada em fundamentos teóricos da biomimética (Vincent et al., 2006; Reap et al., 2005), do design centrado no contexto social (Manzini, 2015), e em diretrizes sobre Soluções Baseadas na Natureza (IUCN, 2022; UNEP, 2023), alinhando-se também aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente ao ODS 6, que visa garantir água potável e saneamento para todos até 2030 (ONU, 2015).

No entanto, é necessário reconhecer que os resultados apresentados constituem uma etapa de modelagem conceitual e não representam ainda um protótipo funcional testado em campo. Para que o produto seja efetivamente desenvolvido, testado e validado sob parâmetros técnicos e regulatórios, é imprescindível dispor de uma infraestrutura laboratorial mais avançada, capaz de realizar ensaios padronizados de desempenho hidrodinâmico, durabilidade, resistência microbiológica, e controle de contaminantes químicos e biológicos (Peter-Varbanets et al., 2009; Shannon et al., 2008).

A ausência de testes em comunidades reais também limita a avaliação da aplicabilidade social e cultural do dispositivo, especialmente quanto à

aceitação pela população e à viabilidade de manutenção e replicação em escala comunitária. Esses aspectos, embora não esgotados nesta pesquisa, são fundamentais para consolidar a proposta como uma inovação social com impacto ambiental e sanitário significativo (Brownell et al., 2008; Pahl-Wostl et al., 2010).

Diante disso, a presente tese deve ser compreendida como uma contribuição pioneira para o campo do design biomimético aplicado à purificação da água, propondo uma solução que une conhecimento científico, responsabilidade ambiental e sensibilidade ao contexto social do Semiárido. Recomenda-se que pesquisas futuras avancem no desenvolvimento de protótipos físicos, conduzam testes de campo com diferentes perfis de água e envolvam parcerias interdisciplinares que articulem engenharia de materiais, microbiologia, políticas públicas e participação comunitária.

Acredita-se que, ao combinar morfologia vegetal, dinâmica de filtração e aplicabilidade social, este estudo inaugura caminhos relevantes para uma nova geração de dispositivos filtrantes sustentáveis, baseados na sabedoria da natureza, com potencial de contribuir significativamente para a segurança hídrica e a justiça ambiental em contextos de vulnerabilidade.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer o financiamento da Capes para esta pesquisa, por meio do edital nº 28/2022 – Capes Emergências Climáticas — PDPG Vulnerabilidade Social e Direitos Humanos [Número da Bolsa 88881.705050/2022-01].

Referências

- Albuquerque, U. P., et al. (2022). The role of nature-based solutions in the context of the UN Sustainable Development Goals.
- Andrade, A. F. C., et al. (2022). Estratégias adaptativas de espécies nativas da Caatinga frente à escassez hídrica. *Revista Ciência e Sustentabilidade*, 14(2), 102–119.
- Andrade, G. P., et al. (2015). Qualidade da água em cisternas na zona rural do semiárido.
- Bain, R. E. S., Cronk, R., Wright, J. A., Yang, H., Slaymaker, T., & Bartram, J. (2014). Fecal contamination of drinking-water in low- and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis. *PLOS Medicine*, 11(5), e1001644.
- Bárta, J. (2021). Sustainable Development Goal 6: Clean Water and Sanitation.

- Boutillier, M. S. H., et al. (2014). Water filtration using plant xylem. *PLOS ONE*, 9(2), e89934.
- Boutin, B. K., et al. (2015). The significance of total coliforms in water.
- Brownell, P., Chertow, M., & Hughes, D. (2008). *Designing for Water: Strategies, Science and Solutions for Sustainable Water Management*. New York: Wiley.
- Buriti, C. O., & Barbosa, L. G. (2018). Socioeconomic impacts of drought in the Brazilian Semiárido.
- Gomes, M. L., et al. (2012). Contamination risks in stored water.
- Gomes, M. L., Sousa, J. R., & Costa, F. G. (2023). Root architecture and drought resilience of *Spondias tuberosa* in the Brazilian semi-arid region. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 47(1), 76–92.
- Gomes, U. A. F.; Heller, L. Acesso à água proporcionado pelo Programa de Formação e Mobilização Social para Convivência com o Semiárido: Um Milhão de Cisternas Rurais: combate à seca ou ruptura da vulnerabilidade? *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 3, p. 623-633, 2016.
- Gould, J. (1999). Rainwater catchment systems: design, construction and maintenance.
- Iucn. (2022). Nature-based Solutions Global Standard. International Union for Conservation of Nature.
- Manzini, E. (2015). *Design, When Everybody Designs: An Introduction to Design for Social Innovation*. MIT Press.
- Lee, J., et al. (2021). Low-cost water treatment technologies for developing countries.
- Lima, M. A. (2021). Climate and water resources in the Brazilian Semiárido.
- Lye, D. J. (2002). Health risks associated with consumption of untreated water from household roof catchment systems. *Journal of the American Water Resources Association*, 38(5), 1301-1306.
- Machado, C. J. S. (2017). Water management in the Brazilian Semiárido.
- Machado, P. J. O., Dias, N. S., & Silva, E. F. F. (2017). Water quality in rural cisterns.
- Melo, W., et al. (2019). Biomimicry as a tool for sustainable design.
- Melo, W., et al. (2024). Bioinspired design from the umbuzeiro xylem for water filtration in

- semi-arid regions. *Journal of Sustainable Design*, in press.
- Oliveira, L. S., et al. (2021). Condução de água em plantas lenhosas do Semiárido. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 33(4), 445–457.
- Pereira, C. A., et al. (2023). Anatomia funcional do xilema em espécies adaptadas à aridez. *Plant Biology Journal*, 12(1), 67–80.
- Peter-Varbanets, M., Zurbrugg, C., Swartz, C., & Pronk, W. (2009). Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. *Water Research*, 43(2), 245–265.
- Prüss-Ustün, A., et al. (2019). Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: An updated analysis with a focus on low- and middle-income countries. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222(5), 765–777.
- Silva, T. N., Barbosa, M. G., & Santos, R. P. (2020). O umbuzeiro como espécie estratégica para segurança alimentar e adaptação climática no Semiárido brasileiro. *Revista Verde*, 15(3), 45–54.
- Vincent, J. F. V. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471–482.
- WHO & UNICEF. (2023). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender. Geneva: World Health Organization and the United Nations Children's Fund.
- WHO (World Health Organization). (2017). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva: WHO Press.
- Pahl-Wostl, C., et al. (2010). Managing change toward adaptive water management through social learning. *Ecology and Society*, 12(2):30.
- Shannon, M. A., et al. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301–310.
- UNEP. (2023). Nature-based Solutions for Climate, Biodiversity and Water. United Nations Environment Programme.
- Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471–482.