

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA COM CARVÃO ATIVADO DE CAROÇO DE AÇAÍ COMO TECNOLOGIA SOCIAL PARA COMUNIDADES RIBEIRINHAS DA AMAZÔNIA

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF A WATER TREATMENT SYSTEM USING ACTIVATED CARBON FROM AÇAÍ SEEDS AS A SOCIAL TECHNOLOGY FOR RIVERSIDE COMMUNITIES IN THE AMAZON

DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA CON CARBÓN ACTIVADO DE SEMILLA DE AÇAÍ COMO TECNOLOGÍA SOCIAL PARA COMUNIDADES RIBEREÑAS DE LA AMAZONÍA

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-399>

Data de submissão: 30/10/2025

Data de publicação: 30/11/2025

Maria Clara Pinheiro Santos

Graduanda em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Amazonas

E-mail: mariacpinheirosantos@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5436793625283090>

Ademir Victor Gomes da Costa

Graduado em Química Bacharelado

Instituição: Universidade Federal do Amazonas

E-mail: ademirvictorg1@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8633435641096750>

Lucas Maciel Barbosa

Graduado em Química Bacharelado

Instituição: Universidade Federal do Amazonas

E-mail: lucasmacie120lm@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6148847784290057>

Gisele Ferreira Meireles

Graduanda em Química Bacharelado

Instituição: Universidade Federal do Amazonas

E-mail: gisameireles17@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4901507914485308>

Paulo Rogério da Costa Couceiro

Doutor em Química Analítica

Instituição: Universidade Federal do Amazonas

E-mail: couceiro35@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0117665735282078>

Tereza Cristina Souza de Oliveira
Doutora em Química Analítica
Instituição: Universidade Federal do Amazonas
E-mail: terezacristina@ufam.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6273580270881135>

RESUMO

O estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar um sistema de tratamento de água de baixo custo, denominado STAC (Sistema de Tratamento de Água com Carvão Ativado), elaborado a partir do reaproveitamento de caroços de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.), visando sua aplicação como tecnologia social em comunidades ribeirinhas da Amazônia. O sistema foi construído utilizando camadas de cascalho, areia grossa, areia fina e carvão ativado artesanalmente produzido a partir do caroço de açaí ativado com cloreto de zinco ($ZnCl_2$). Foram realizados ensaios de caracterização físico-química do carvão por MEV, FTIR e DRX, evidenciando estrutura altamente porosa, grupos funcionais oxigenados e caráter amorfo, características que favorecem a adsorção de contaminantes. Testes com amostras de água do rio Negro e soluções contendo ferro total mostraram redução de 88 % na turbidez, 84 % na concentração de ferro total e eliminação completa de coliformes totais e *Escherichia coli*, atendendo aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. A validação social ocorreu por meio de oficinas participativas, onde os participantes confeccionaram seus próprios filtros e aprenderam o processo de produção do carvão ativado. A ação promoveu autonomia comunitária, educação ambiental e fortalecimento da bioeconomia local ao valorizar um resíduo agroextrativista abundante. Conclui-se que o STAC é uma alternativa eficiente, sustentável e replicável, capaz de garantir acesso à água potável e contribuir para o cumprimento das ODS 3, 5, 6, 12 e 13, integrando ciência, tecnologia e inclusão social na Amazônia.

Palavras-chave: Carvão Ativado de Caroço de Açaí. Tecnologia Social. Tratamento de Água. Adsorção. Comunidades Ribeirinhas da Amazônia.

ABSTRACT

The present study aimed to develop and characterize a low-cost water treatment system, termed STAC (Activated-Carbon Water Treatment System), produced from the reutilization of açaí seeds (*Euterpe oleracea* Mart.) and designed for application as a social technology in Amazonian riverine communities. The system was constructed using layers of gravel, coarse sand, fine sand, and activated carbon produced artisanally from açaí seeds chemically activated with zinc chloride ($ZnCl_2$). Physicochemical characterization of the carbon—performed by SEM, FTIR, and XRD—revealed a highly porous structure, the presence of oxygenated functional groups, and an overall amorphous profile, features that favor contaminant adsorption. Tests using raw water from the Negro River and solutions containing total iron demonstrated reductions of 88% in turbidity, 84% in total iron concentration, and complete removal of total coliforms and *Escherichia coli*, meeting the potability standards established by Brazilian Ordinance GM/MS No. 888/2021. Social validation occurred through participatory workshops in which community members built their own filters and learned the steps for producing the activated carbon. The initiative fostered community autonomy, environmental education, and strengthened the local bioeconomy by valuing an abundant agro-extractive residue. Overall, the STAC system proved to be an efficient, sustainable, and easily replicable alternative capable of ensuring access to safe drinking water and contributing to the achievement of SDGs 3, 5, 6, 12 e 13 by integrating science, technology, and social inclusion in the Amazon.

Keywords: Activated Carbon from Açaí Seed. Social Technology. Water Treatment. Adsorption. Riverside Communities of the Amazon.

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo desarrollar y caracterizar un sistema de tratamiento de agua de bajo costo, denominado STAC (Sistema de Tratamiento de Agua con Carbón Activado), elaborado a partir del reaprovechamiento de semillas de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*), con miras a su aplicación como tecnología social en comunidades ribereñas de la Amazonía. El sistema fue construido utilizando capas de grava, arena gruesa, arena fina y carbón activado producido artesanalmente a partir de la semilla de açaí activada con cloruro de zinc ($ZnCl_2$). Se realizaron ensayos de caracterización físico-química del carbón mediante SEM, FTIR y DRX, evidenciándose una estructura altamente porosa, grupos funcionales oxigenados y carácter amorfó, características que favorecen la adsorción de contaminantes. Pruebas con muestras de agua del río Negro y soluciones con hierro total mostraron una reducción del 88 % en la turbidez, 84 % en la concentración de hierro total y la eliminación completa de coliformes totales y *Escherichia coli*, cumpliendo con los estándares de potabilidad establecidos por la Portaria GM/MS n.º 888/2021. La validación social se realizó mediante talleres participativos, en los cuales los participantes confeccionaron sus propios filtros y aprendieron el proceso de producción del carbón activado. La acción promovió autonomía comunitaria, educación ambiental y fortalecimiento de la bioeconomía local al valorizar un residuo agroextractivista abundante. Se concluye que el STAC es una alternativa eficiente, sostenible y replicable, capaz de garantizar el acceso al agua potable y contribuir al cumplimiento de los ODS 3, 5, 6, 12 y 13, integrando ciencia, tecnología e inclusión social en la Amazonía.

Palabras clave: Carbón Activado de Semilla de Açaí. Tecnología Social. Tratamiento de Agua. Adsorción. Comunidades Ribereñas de la Amazonía.

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água potável constitui um dos principais desafios socioambientais contemporâneos, especialmente nas regiões periféricas e rurais do Brasil. Na Amazônia, essa problemática é intensificada pelo crescimento urbano desordenado, pela dispersão territorial das comunidades e pela ausência de infraestrutura adequada de saneamento básico. De acordo com o *Ranking do Saneamento 2025* (Instituto Trata Brasil, 2025), a Região Norte ocupa a última posição entre as regiões brasileiras, com municípios que apresentam índices críticos de abastecimento — entre eles Manaus, estado do Amazonas (AM), que, desde 2019, mantém-se próxima da 90ª posição, registrando apenas 0,49% de evolução no atendimento do serviço de fornecimento de água potável.

Essa desigualdade territorial é ainda mais acentuada nos municípios afastados da capital amazonense, onde fatores como isolamento geográfico, dificuldades logísticas e escassez de investimentos inviabilizam a implantação de redes de distribuição. Em Santa Isabel do Rio Negro, por exemplo, 61,84% da população não possui acesso à água potável, índice que figura entre os mais críticos do estado. Situação semelhante ocorre em São Paulo de Olivença (62,4%) e São Gabriel da Cachoeira (49,6%) (IBGE, 2022). Esses dados evidenciam a disparidade no acesso à água e a vulnerabilidade socioambiental que atinge diversas comunidades amazônicas.

Segundo Jesus et al. (2023), as regiões Norte e Nordeste — compostas majoritariamente por municípios dispersos e de baixa densidade populacional — registram as maiores desigualdades no acesso à água potável. No caso da Região Norte, essa carência é parcialmente amenizada pela abundância de áreas ribeirinhas e comunidades indígenas, que utilizam rios e igarapés como principais fontes de água. Contudo, o consumo direto dessas águas, sem tratamento prévio, acarreta graves riscos à saúde e compromete significativamente a qualidade de vida das populações locais.

A água potável é essencial à saúde humana e reconhecida pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2010) como um direito fundamental. No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece padrões de potabilidade e define parâmetros físicos, químicos e microbiológicos para garantir a segurança da água destinada ao consumo humano. Entretanto, em áreas isoladas da Amazônia, o cumprimento desses padrões é limitado por fatores geográficos e socioeconômicos. Além disso, tecnologias convencionais de tratamento, dependentes de infraestrutura, energia elétrica e manutenção especializada, mostram-se inadequadas para a realidade ribeirinha.

A falta de acesso à água potável e o consumo de água contaminada provocam impactos diretos na saúde pública, contribuindo para o aumento da incidência e da mortalidade por doenças de veiculação hídrica, sobretudo entre crianças. Entre as principais enfermidades registradas no estado do Amazonas estão a diarreia infecciosa (bacteriana e viral) — uma das principais causas de internação

infantil — e a leptospirose, frequentemente associada às cheias e aos alagamentos (FUNASA, 2020). Além das consequências sanitárias, há impactos sociais relevantes, como o aumento do absenteísmo escolar, a desnutrição infantil e o crescimento dos custos hospitalares.

A desigualdade hídrica na Amazônia também se manifesta como uma questão de gênero. Mulheres e meninas, especialmente em áreas rurais e comunidades indígenas, são as principais responsáveis pelas atividades domésticas relacionadas à coleta, transporte e manejo da água. Essa responsabilidade reduz seu tempo disponível para estudo, trabalho e atividades comunitárias. Dados da PNAD (IBGE, 2022) indicam que mulheres do meio rural dedicam várias horas diárias a essas tarefas, e, conforme a ONU Mulheres (2023), esse tempo pode ultrapassar seis horas em períodos de estiagem. Essa sobrecarga evidencia a interseção entre desigualdade de gênero e injustiça ambiental, ampliando a vulnerabilidade feminina em contextos de escassez hídrica.

Diante desse cenário, torna-se urgente o desenvolvimento de soluções tecnológicas adaptadas às especificidades amazônicas, considerando a qualidade da água dos rios e a necessidade de unir simplicidade operacional, baixo custo e sustentabilidade. As chamadas tecnologias sociais emergem como alternativas eficazes para ampliar o acesso à água em comunidades de difícil alcance. Segundo o Instituto de Tecnologia Social (ITS, 2004), a tecnologia social baseia-se em processos participativos, reaplicáveis e voltados à transformação social. Para Dagnino (2009) e Thomas (2020), essas tecnologias devem ser apropriadas pelas próprias comunidades, promovendo autonomia, inclusão e justiça socioambiental.

No contexto amazônico, a adoção de tecnologias sociais voltadas ao tratamento de água tem se mostrado promissora, especialmente por valorizar o uso de materiais locais e recursos naturais abundantes. Entre as técnicas empregadas, a adsorção destaca-se por sua simplicidade, eficácia e baixo custo (OBA et al., 2021). Esse processo consiste na transferência de massa de um adsorvato, presente em uma fase fluida, para a superfície de um adsorvente sólido (SILVA, 2015). Entre os materiais mais utilizados, o carvão ativado merece destaque por sua ampla área superficial, estrutura altamente porosa e capacidade de remover contaminantes orgânicos, metais e compostos coloridos (BANSAL & GOYAL, 2005; WORCH, 2012).

Os carvões ativados podem ser produzidos a partir de diversos materiais carbonáceos, sendo os resíduos vegetais lignocelulósicos particularmente promissores, graças à presença de celulose, hemicelulose, lignina e compostos inorgânicos. Diversos resíduos agrícolas — como madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de coco e caroço de açaí — apresentam excelentes propriedades para sua produção (BOUCHELTA et al., 2008).

Vieira et al. (2024) destacam que o carvão ativado obtido por pirólise de caroços de açaí apresenta estrutura mesoporosa e elevada área superficial, características que o tornam eficiente no tratamento de água para consumo humano. A ativação química com ácido fosfórico resultou em alta porosidade e desempenho relevante na remoção de interferentes físicos, químicos e microbiológicos. Esses e outros estudos (SANTOS *et al.*, 2025, SILVA *et al.*, 2021) reforçam o potencial de aproveitamento de resíduos agroindustriais amazônicos para a produção de adsorventes sustentáveis e de baixo custo.

Assim, o uso de materiais de origem amazônica em sistemas de tratamento de água fortalece a integração entre ciência, sustentabilidade e inclusão social, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 e 12 da Agenda 2030 da ONU, que tratam do acesso universal à água potável e do consumo e produção responsáveis.

Dante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e caracterizar um sistema de filtração com carvão ativado obtido a partir do caroço de açaí, propondo uma tecnologia social sustentável voltada à obtenção de água potável em comunidades ribeirinhas do Amazonas. O sistema busca associar baixo custo, eficiência de tratamento e reaproveitamento de resíduos agroindustriais regionais, contribuindo diretamente para o avanço dos ODS 3, 5, 6, 12 e 13 da Agenda 2030.

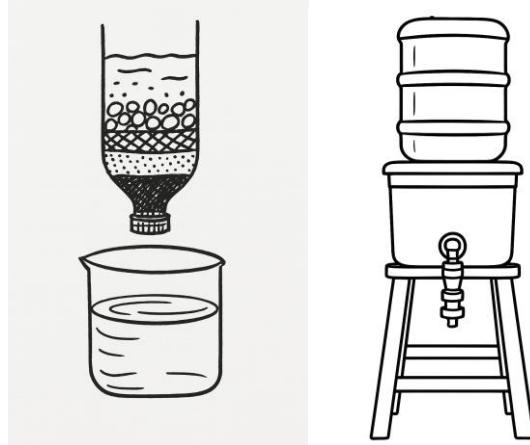
2 METODOLOGIA

2.1 CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DE SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA COM CARVÃO ATIVADO (STAC)

A construção do protótipo simples e funcional do STAC foi concebida como uma tecnologia social de baixo custo, de fácil replicação e baseada em materiais amplamente disponíveis nas comunidades amazônicas. O sistema emprega carvão ativado, um material altamente eficiente na purificação da água devido à sua grande área superficial e elevada capacidade de adsorção.

Por se tratar de uma proposta adaptável e modular, capaz de ser ajustada conforme a realidade e os recursos de cada comunidade — incluindo diferentes fontes de captação, como poços artesianos, cacimbas, igarapés ou rios — foram desenvolvidos dois layouts: um utilizando garrafa PET de 2 L e outro utilizando garrafão mineral de 20 L como corpo principal. Ambos são acoplados a um reservatório inferior destinado ao armazenamento da água filtrada, conforme ilustrado na Figura 1. A modularidade do sistema permite variações no design, configuração e tamanho, garantindo que a tecnologia seja ajustada às condições locais de acesso à água e à disponibilidade de materiais.

Figura 1. Ilustração dos designs do STAC.



Fonte: Autores

O STAC foi constituído por camadas sucessivas - cascalho, areia grossa, areia fina e carvão ativado obtido a partir de caroço de açaí - dispostas nessa ordem. As camadas minerais funcionaram como barreiras, retendo materiais em suspensão, enquanto o carvão ativado atuou como principal adsorvente, promovendo a remoção de impurezas de naturezas física, química e microbiológica. Na base do sistema (tampa da garrafa) foi colocado um tecido de algodão para evitar o arraste de partículas sólidas durante de filtração (Figura 2).

Figura 2 – Imagem do STAC real construído.



Fonte: Autores

2.2 OBTENÇÃO DE AMOSTRAS DOS AGENTES FILTRANTES

As amostras de cascalho, areia grossa e areia fina foram adquiridas em lojas de materiais de construção. Inicialmente, cada material passou por duas lavagens sucessivas com água para remoção de partículas soltas. Em seguida, para garantir a higienização completa, foi realizada uma lavagem adicional utilizando água com a adição de uma colher de sopa de água sanitária, deixando-se os materiais imersos por 20 minutos. Após esse processo, as amostras foram enxaguadas com água limpa e deixadas para secagem ao ar livre.

O carvão ativado foi produzido artesanalmente a partir de amostra de caroços de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) pós-beneficiamento pela comunidade indígena.

A preparação do material seguiu um procedimento simples e de baixo custo. Inicialmente, os caroços foram lavados e deixados para secar ao ar livre, garantindo a remoção de impurezas superficiais. Em seguida, realizou-se a carbonização em tacho de ferro, conduzida até a completa torrefação do material. O carvão resultante foi então triturado com auxílio de um pilão e peneirado em peneira de inox de malha metálica, com abertura média de 0,4 a 0,6 mm, para obtenção de uma granulometria mais uniforme. Posteriormente, o material passou por ativação química, realizada por impregnação com solução de cloreto de zinco, seguida de aquecimento em fogo brando por aproximadamente 15 minutos, etapa responsável por aumentar a porosidade e a área superficial do adsorvente. Após a ativação, o carvão foi abundantemente lavado em água corrente até atingir pH neutro, removendo resíduos do agente ativante. Por fim, procedeu-se à secagem em temperatura ambiente, obtendo-se o carvão ativado apto para aplicação no sistema de filtração (Figura 3).

Figura 3 – Processo para obtenção do carvão artesanal.



Fonte: Autores

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE CARVÃO ATIVADO

No laboratório, as amostras de carvão in natura, ativado e após utilização foram previamente secas a 105 °C por 1 h para remoção de umidade. Para analisar os grupos funcionais na amostra de carvão ativado foi utilizado um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) SHIMADZU Shimadzu IRTracer-100, empregando o método de transmitância na faixa espectral número de onda de 4000–400 cm⁻¹. A estrutura cristalográfica foi registrada em um difratômetro Shimadzu XRD-7000 com radiação CuK α ($\lambda = 0,15184$ nm), operado a 40 mA e 40 kV. A morfologia da amostra de carvão ativado foi investigada a partir de microimagens obtidas em um microscópio eletrônico de varredura Jeol JSM-6010 LA, uma camada de ouro foi aplicada para garantir a condutividade da amostra.

2.5 ENSAIOS DE QUALIDADE DA ÁGUA

As amostras de água foram coletadas do Rio Negro, Manaus–AM, próximo a orla 3°08'14.7"S 60°01'35.6"W. E solução-estoque de 5 mg L⁻¹ de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO₄•7H₂O) foi utilizada para simular a presença de ferro dissolvido em altas concentrações.

Aproximadamente 5 L de água foram filtrados no STAC, com tempo médio de 25 min, sob fluxo gravitacional contínuo.

Os parâmetros da qualidade de água antes e pós filtração avaliados incluíram turbidez, ferro total, coliformes totais, Escherichia coli, conforme metodologias do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

A Tabela 1 apresenta os métodos de medição, os equipamentos utilizados e os respectivos valores máximos permitidos (VMP) segundo a legislação vigente no Brasil.

Tabela 1. Parâmetros de análise da qualidade da água e limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Parâmetro	Equipamento ou Método	Unidade	Valor Máximo Permitido ⁽¹⁾
Turbidez	Turbidímetro portátil Hanna HI98703	NTU	$\leq 5,0$ NTU
Ferro total (Fe)	Fotômetro multiparâmetro MICRO20V2	mg L^{-1}	$\leq 0,30 \text{ mg L}^{-1}$
Coliformes totais	Método COLItest	Presença/Ausência	Ausência em 100 mL
Escherichia coli	Método COLItest	Presença/Ausência	Ausência em 100 mL

Legenda: VMP em conformidade com Portaria GM/MS nº 888/2021.

Fonte: Autores

A eficiência de remoção (*ER*) de ferro total foi calculada pela Equação 1:

$$ER = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

em que, C_i representa a concentração inicial e C_f a concentração final de ferro total, antes e após o processo de filtração, respectivamente. Os valores obtidos foram comparados aos limites de potabilidade estabelecidos pela legislação brasileira.

2.6 OFICINAS PARTICIPATIVAS PARA TRANSFERÊNCIAS TECNOLÓGICA DO STAC

As oficinas participativas integraram o processo metodológico de validação social e de disseminação do conhecimento técnico sobre o STAC, fortalecendo a dimensão comunitária da tecnologia desenvolvida. A proposta metodológica baseou-se nos princípios das Tecnologias Sociais (ITS, 2004; Dagnino, 2009; Thomas, 2020) e na abordagem dialógica freiriana (Freire, 1987), orientada para a construção coletiva do conhecimento e para o fortalecimento da autonomia local.

As atividades foram organizadas em dois módulos complementares e sequenciais:

Dia 1 - Produção do carvão ativado: realizou-se uma demonstração prática das etapas de carbonização e ativação do caroço de açaí, seguida de uma roda de conversa sobre qualidade da água, saúde e reaproveitamento de resíduos orgânicos.

Dia 2 - Montagem do STAC: os participantes construíram seus próprios STAC utilizando kits contendo garrafa PET, areia, cascalho e o carvão ativado produzido na oficina anterior.

As oficinas foram acompanhadas de debates e trocas de experiências, com destaque para o papel central das mulheres na gestão doméstica da água e nas práticas de cuidado ambiental. Ao final, foram distribuídas cartilhas ilustradas e banners explicativos contendo instruções de uso e manutenção do sistema, além de serem realizados registros fotográficos e coleta de depoimentos das lideranças comunitárias.

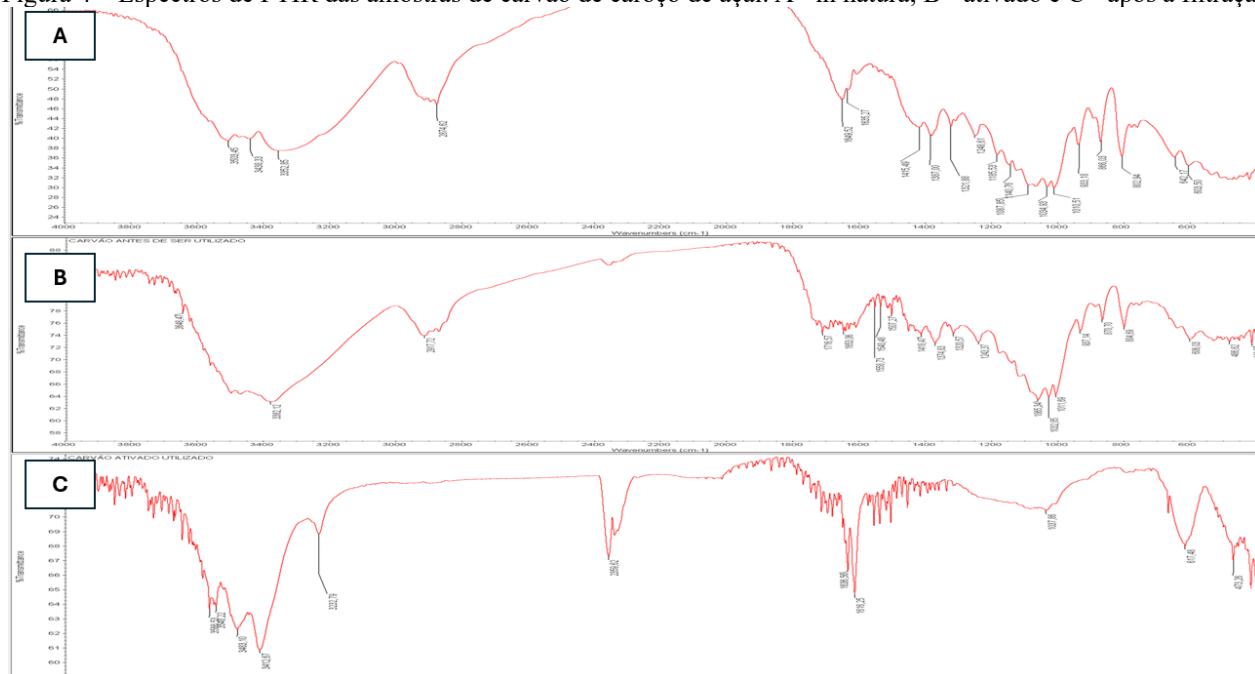
Essa metodologia participativa e dialógica buscou não apenas validar o desempenho técnico do STAC, mas também promover autonomia, conscientização ambiental e empoderamento comunitário, especialmente entre as mulheres, fortalecendo a apropriação social da tecnologia e sua continuidade no cotidiano da comunidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE CARVÃO

A Figura 4 apresenta os espectros FTIR das amostras de carvão, sendo A – Carvão *in natura*, B - Carvão ativado com ZnCl₂ e C – Carvão utilizado na filtração.

Figura 4 – Espectros de FTIR das amostras de carvão de caroço de açaí: A - in natura; B - ativado e C - após a filtração



Fonte: Autores

O espectro do carvão não ativado (Figura 2-A) apresentou bandas largas na região de 3500–3300 cm⁻¹, atribuídas ao estiramento O–H de hidroxilas provenientes de álcoois, fenóis e água adsorvida. Também foram identificadas bandas em 1600 cm⁻¹, associadas a ligações C=C aromáticas da lignina, e na faixa de 1000–800 cm⁻¹, relacionadas às vibrações C–O e C–H aromáticas. Essas absorções indicam que, após a carbonização, o material ainda conserva grupos oxigenados e frações orgânicas típicas de biomassa lignocelulósica. Resultados semelhantes foram descritos por BENTES (2017), que observou a presença de grupos O–H e C–O em carvões carbonizados de caroço de açaí, evidenciando carbonização incompleta e superfície parcialmente funcionalizada.

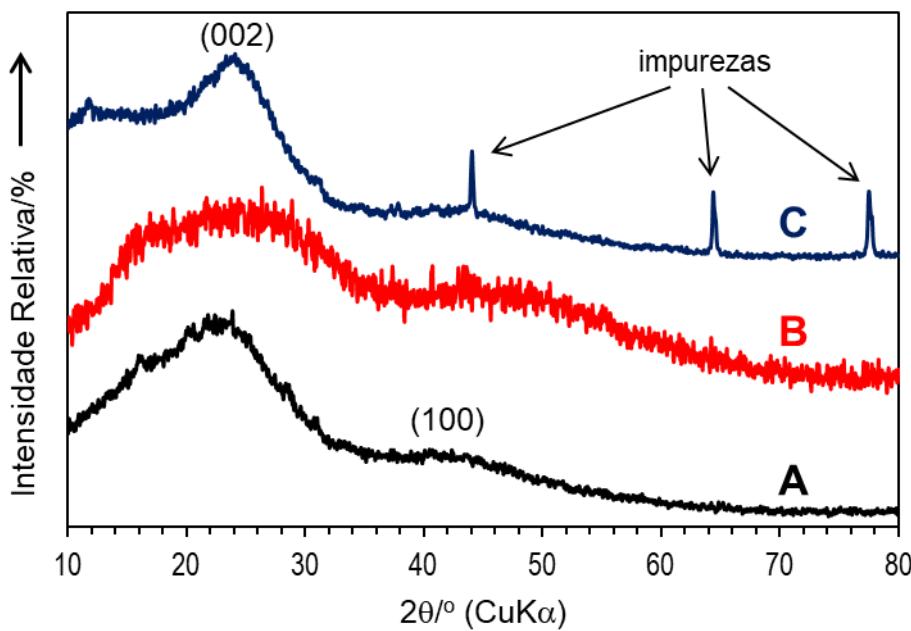
Após a ativação química com ZnCl₂ (Figura 2-B) observou-se redução da intensidade da banda O–H e surgimento de uma banda mais definida em 1700 cm⁻¹, correspondente às ligações C=O de grupos carboxílicos e carbonílicos. Houve ainda reforço da banda entre 1600–1500 cm⁻¹, associada às estruturas aromáticas conjugadas do carbono, e intensificação das bandas entre 1200–1000 cm⁻¹, relacionadas às vibrações C–O de fenóis e éteres. Essas modificações indicam aumento da densidade de grupos oxigenados e, consequentemente, maior acidez superficial após a ativação. Esse comportamento é compatível com os resultados de QUEIROZ et al. (2020), que identificaram picos semelhantes em carvões ativados e modificados de açaí, confirmando a presença de grupos carboxílicos e fenólicos. De forma semelhante, LOPES (2023) observou que a ativação química eleva a quantidade de grupos polares e sítios ativos, favorecendo o processo de adsorção.

O espectro da amostra após o uso no sistema STAC (Figura 2-C) apresentou atenuação das bandas de O–H e C=O, indicando redução dos grupos superficiais livres devido à interação com compostos presentes na água. Também surgiram bandas discretas abaixo de 700 cm⁻¹, associadas a ligações metal–oxigênio (Fe–O), sugerindo a adsorção de íons de ferro durante o processo de filtração.

A diminuição das bandas oxigenadas após a filtração sugere ocupação dos sítios ativos e formação de complexos entre grupos funcionais e contaminantes metálicos, comportamento semelhante ao observado por QUEIROZ et al. (2020) em carvões ativados aplicados à remoção de íons metálicos.

A Figura 5 apresenta os perfis gráficos de DRX das amostras, onde A - Carvão ativado com ZnCl₂, B - Carvão utilizado na filtração e C - Carvão *in natura* (não ativado).

Figura 5 – Difratogramas de Raios X (DRX) do carvão de caroço de açaí antes e após a ativação química com $ZnCl_2$

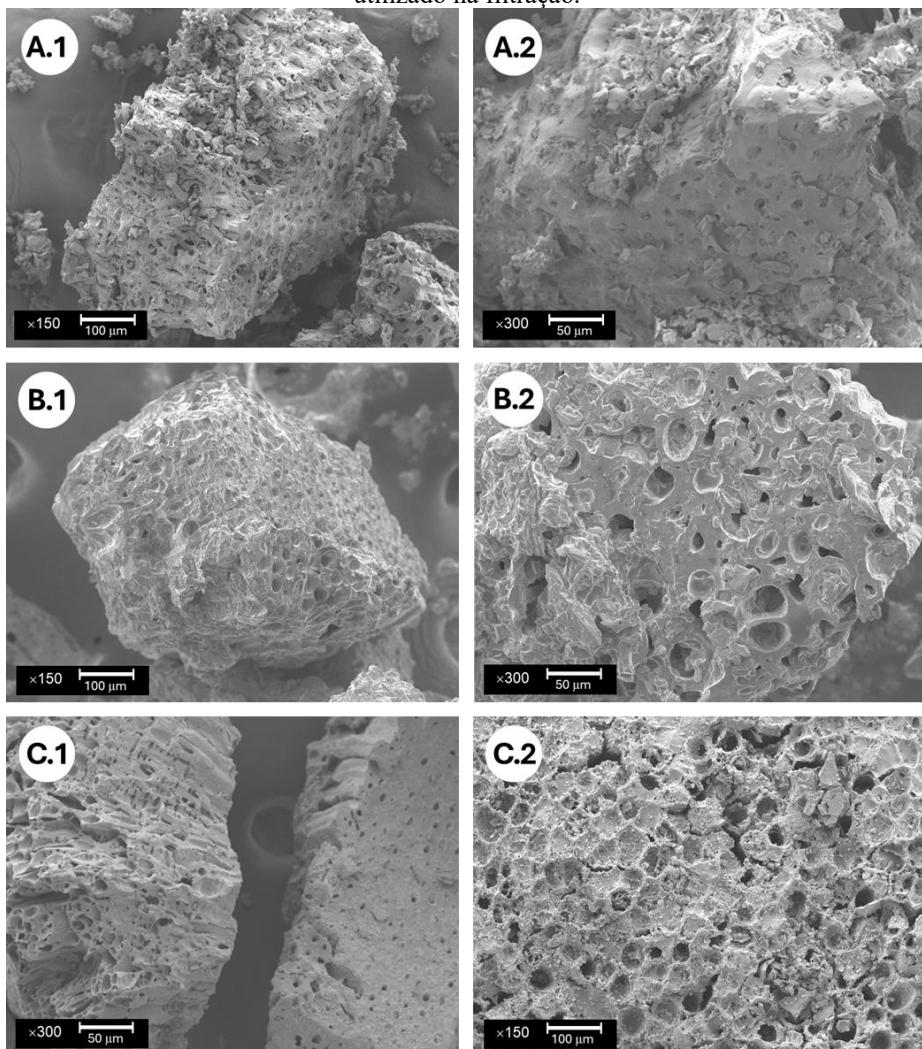


Fonte: Autores

O difratograma do carvão in natura (Figura 5-C) apresentou halo difuso e ausência de picos de alta intensidade, comportamento típico de materiais carbonosos amorfos contendo frações minerais cristalinas provenientes das cinzas da biomassa. Observaram-se picos estreitos e bem definidos entre 45° e 75° , atribuídos à presença de fases minerais cristalinas remanescentes da biomassa. Após o processo de ativação química com $ZnCl_2$ (Figura 5-A), esses picos desaparecem ou se reduzem significativamente, indicando remoção parcial desses minerais e maior desordem estrutural, característica do carbono turbostrático. Após a ativação química com $ZnCl_2$ (Figura 5-A), observou-se intensificação do pico amplo entre $2\theta = 23-26^\circ$, associado ao plano (002), indicando leve reorganização estrutural e formação de carbono turbostrático. Esse comportamento concorda com o relatado por Bentes (2017) e Lopes (2023) para carvões ativados de caroço de açaí, nos quais a ativação promove aumento da desordem, mas também rearranjos locais responsáveis pela criação de sítios ativos de adsorção. A amostra saturada (Figura 5-B) manteve o padrão amorfó característico do ativado, mostrando que o processo de adsorção não induz formação de novas fases cristalinas, apenas altera a intensidade relativa do halo.

A Figura 6 apresenta as microimagens de MEV, sendo A.1 e A.2 – Carvão in natura (não ativado), B.1 e B.2 – Carvão ativado com $ZnCl_2$, e C.1 e C.2 – Carvão utilizado na filtração.

Figura 6. Micrografias de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão de caroço de açaí nas diferentes etapas do processo A.1 e A.2 – Carvão in natura (não ativado), B.1 e B.2 – Carvão ativado com ZnCl₂, e C.1 e C.2 – Carvão utilizado na filtração.



Fonte: Autores

Nas micrografias do carvão apenas carbonizado (Figura 6 – A.1 e A.2), observou-se uma superfície irregular e compacta, com poucos poros abertos e presença de fragmentos lamelares. Essa morfologia densa e heterogênea resulta da desvolatilização parcial da biomassa lignocelulósica, em que parte dos componentes voláteis, como hemicelulose e celulose, é degradada, permanecendo ainda resíduos vegetais que bloqueiam a abertura total dos poros. Esse comportamento é compatível com o descrito por SILVA et al. (2023), que relataram superfície de baixa porosidade para carvões de caroço de açaí antes da ativação. De acordo com BENTES (2017), a carbonização constitui etapa fundamental para a formação da matriz carbonosa inicial, base para o desenvolvimento de microporos na ativação subsequente.

Após o processo de ativação química com ZnCl₂, as micrografias revelaram mudança morfológica significativa (Figura 6 – B.1 e B.2), com aumento da porosidade da superfície e presença

de cavidades interconectadas e poros de múltiplas dimensões (micro e mesoporos). O ZnCl₂ atuou como agente desidratante, intensificando a degradação da lignina e celulose remanescentes e favorecendo a formação de paredes finas e rede interna aberta. Resultados compatíveis foram reportados por RAMOS e colaboradores (2009), que verificaram modificação na estrutura do precursor, com formação de poros em forma de crateras uniformes após o processo de ativação.

Após o uso no sistema de filtração (Figura 6 – C.1 e C.2), as micrografias indicaram modificações superficiais associadas à obstrução parcial dos poros e depósitos irregulares na superfície, essas alterações sugerem a saturação progressiva dos sítios ativos e consequente redução da área efetiva de adsorção, fenômeno esperado após sucessivos ciclos de filtração.

3.1.1 Difração de Raios X (DRX)

As análises de MEV, FTIR e DRX, quando avaliadas em conjunto, demonstram que a ativação química com ZnCl₂ promoveu a formação de uma matriz carbonosa amorfa, altamente porosa e rica em grupos funcionais oxigenados.

3.2 EFICIÊNCIA NO TRATAMENTO DE ÁGUA

Os resultados obtidos nos ensaios físico-químicos e microbiológicos demonstraram desempenho satisfatório do sistema STAC, atendendo aos valores estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021). Observou-se redução de 88,0% na turbidez, 84,0% no ferro total e eliminação completa de coliformes totais e Escherichia coli (Tabela 3), comprovando a eficiência da combinação das camadas filtrantes e, principalmente, do carvão ativado artesanal produzido a partir do caroço de açaí em parceria com as comunidades locais.

Tabela 2. Parâmetros de qualidade da água antes e após a filtração no STAC

Parâmetro	Antes da filtração	Após a filtração	Eficiência de Remoção, RE%
Ferro total/mg L ⁻¹	5,00	0,18 ± 0,006	84
Turbidez/NTU	33,91 ± 0,04	4,12 ± 0,03	88
Coliformes totais	Presente	Ausente	Eliminação total
<i>E. coli</i>	Presente	Ausente	Eliminação total

Fonte: Autores

A elevada eficiência do carvão ativado produzido a partir de caroço de açaí na remoção de impurezas físicas, químicas e microbiológicas corrobora os resultados observados por SILVA e colaboradores (2023), que empregaram filtros de baixo custo confeccionados com carvão ativado de

Euterpe oleracea em comunidades rurais no Acre, registrando reduções expressivas de turbidez e significativa eliminação de coliformes fecais. No entanto, no estudo citado, foi utilizada uma ativação química distinta, o que resultou na presença residual desses microrganismos. A superioridade observada no presente sistema pode estar ao uso cloreto de zinco ($ZnCl_2$) como agente ativante, que promoveu maior abertura e microporos e aumento da área superficial, intensificando o potencial adsortivo do material.

A redução acentuada da turbidez resulta da ação sinérgica entre as camadas filtrantes: partículas maiores são retidas fisicamente nas camadas de cascalho e areia, enquanto partículas menores – incluindo coloides, substâncias orgânicas dissolvidas e parte do ferro presente na água – são removidos predominantemente por adsorção nas superfícies altamente porosas do carvão ativado.

A eficiência global do STAC pode ser atribuída à integração de processos físicos (filtração granulométrica), químicos (adsorção e possíveis interações iônicas) e microbiológicos (retenção e inativação de microrganismos). O desempenho obtido demonstra que o sistema artesanal, apesar de construído com materiais simples e de baixo custo, é capaz de promover melhorias significativas na qualidade da água, reduzindo quase totalmente ou totalmente parâmetros como ferro, turbidez e coliformes totais e fecais, ficando menores aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação vigente.

Por fim, destaca-se que o carvão ativado artesanal obtido a partir do caroço de açaí apresentou desempenho comparável ao de carvões ativados comerciais e obtidos em condições laboratoriais controladas, fortalecendo seu potencial como tecnologia social de baixo e alta eficiência para uso de comunidades amazônicas.

3.3 APLICAÇÃO EM COMUNIDADE E SUSTENTABILIDADE

Para a validação do sistema de tratamento, realizaram-se oficinas de confecção conforme descrito na metodologia. Entre 2023 e 2025, foram conduzidas cinco oficinas em diferentes localidades do estado do Amazonas. Os resultados aqui apresentados referem-se à oficina mais recente, realizada na Aldeia Recanto Yupirungá, pertencente ao povo Karapanã, situada às margens do Rio Tarumã-Açu, em Manaus (AM), $2^{\circ}59'38.4"S$ $60^{\circ}05'57.3"W$.

A comunidade utiliza água proveniente de poços artesianos e do próprio rio, ambos com qualidade comprometida devido à contaminação e ao lançamento de resíduos domésticos e industriais, o que contribui para a incidência de doenças de veiculação hídrica, especialmente entre crianças.

Utilizando uma metodologia participativa e educativa que integrou conhecimento técnico-científico e saberes tradicionais. A oficina ocorreu em dois dias: o primeiro voltado à produção do

carvão ativado de caroço de açaí, e o segundo à montagem do sistema STAC, composto por camadas de cascalho, areia e carvão ativado.

Cada participante confeccionou o seu próprio filtro, visando à autonomia comunitária na produção e manutenção da tecnologia. Participaram dez comunitários (nove mulheres e um homem), resultando na confecção de seis filtros e na distribuição de materiais educativos sobre higiene e preservação da água desenvolvidos no laboratório. A atividade promoveu educação ambiental e empoderamento feminino, fortalecendo o protagonismo das mulheres na gestão doméstica da água e na preservação ambiental (Figura 7).

Figura 7 – Oficina de confecção do STAC junto à Comunidade Yupirungá



Fonte: Elaboração própria (2025).

Durante as discussões, os participantes relataram a degradação do rio Tarumã-Açu, causada pela presença de flutuantes, atividades empresariais e resíduos urbanos, que impactam diretamente o lazer, a economia e a educação da comunidade. Os relatos reforçaram a importância da tecnologia social STAC para a melhoria da qualidade da água e para a saúde das famílias, destacando sua relevância social e ambiental.

O desenvolvimento e a aplicação do STAC demonstram que soluções tecnológicas simples podem gerar resultados de alto impacto social e ambiental na Amazônia. Quando descartado inadequadamente, o caroço de açaí contribui para o acúmulo de matéria orgânica e a degradação do

solo e dos corpos d'água. Assim, o reaproveitamento dessa biomassa agrega valor a um subproduto regional, reduz passivos ambientais e promove a economia circular, alinhando-se aos princípios da bioeconomia amazônica.

4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento e a aplicação do Sistema de Tratamento de Água com Carvão Ativado (STAC) demonstraram que é possível aliar ciência, sustentabilidade e inclusão social na busca por soluções eficazes para o acesso à água potável na Amazônia. O carvão ativado produzido artesanalmente a partir do caroço de açaí apresentou estrutura altamente porosa e funcionalizada. Os resultados laboratoriais comprovaram a eficiência do sistema, com remoção média de 84% do ferro total, redução de 88% da turbidez e eliminação completa de coliformes totais e *Escherichia coli*, atendendo aos padrões de potabilidade definidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

A validação social por meio das oficinas participativas em comunidades, como a Aldeia Recanto Yupirungá, reforçou a viabilidade técnica e a relevância social da tecnologia, ao promover autonomia comunitária, educação ambiental e empoderamento feminino. O reaproveitamento de resíduos agroindustriais, como o caroço de açaí, contribui para a mitigação de impactos ambientais e fortalecimento da bioeconomia regional, transformando passivos em insumos de valor agregado, além de contribuir para o alcance, principalmente, da ODS 6 (Água Potável e Saneamento).

AGRADECIMENTOS

A ação foi conduzida pelo Laboratório de Análise de Água e Qualidade Ambiental (LAQUA/UFAM) com apoio da Central Analítica da UFAM. Agradecemos à Universidade Federal do Amazonas pelo suporte institucional e incentivo às ações de extensão, ao Serviço Amazônico de Ação e Educação Socioambiental (SARES) por nos colocar em contato com as comunidades tradicionais.

Manifestamos também nossa profunda gratidão a todos os pesquisadores envolvidos, cujo trabalho e dedicação foram essenciais para o desenvolvimento e a validação do projeto. Agradecemos, especialmente, às comunidades ribeirinhas e indígenas que acolheram a iniciativa, compartilharam seus saberes e contribuíram de forma ativa para a construção coletiva dessa tecnologia social.

REFERÊNCIAS

1. ACSELRAD, H. Justiça ambiental e construção social do risco. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2010.
2. BANSAL, R. C.; GOYAL, M. Activated Carbon Adsorption. Boca Raton: CRC Press, 2005.
3. BENTES, J. L. S. Caracterização e aplicação de carvões ativados de caroço de açaí e tucumã para adsorção de contaminantes em água. 2017. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.
4. BOUCHELTA, C.; MEDJRAM, M. S.; BERTRAND, O.; BELLAT, J. P. Preparation and characterization of active carbon from date stones by physical activation with steam. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Amsterdam, v. 82, n. 1, p. 70–77, 2008. DOI: 10.1016/j.jaat.2007.12.009.
5. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 maio 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 8 nov. 2025.
6. CORRÊA, L. P.; SOUZA, F. A.; BASTOS, A. M. Avaliação de filtros de baixo custo com carvão ativado de caroço de açaí para tratamento de águas pluviais. *Revista Engenharia e Sustentabilidade*, v. 8, n. 2, p. 59–74, 2023.
7. DAGNINO, R. Tecnologia social: ferramenta para construir outra sociedade. Campinas: Komedi, 2009.
8. FERREIRA, Lucélio Mendes; MELO, Rafael Rodolfo de. Use of activated charcoal as bio-adsorbent for treatment of residual waters: a review. *Nativa – Pesquisas Agrárias e Ambientais*, Sinop, v. 9, n. 2, p. 215–221, mar./abr. 2021. DOI: 10.31413/nativa.v9i2.11387.
9. FREIRE, P. Pedagogia do oprimido. 17. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1987.
10. FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. Manual de saneamento. 5ª ed., Brasília: FUNASA, 2020.
11. HERCULANO, S. Justiça ambiental e cidadania. 2a ed., Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2011.
12. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico 2022: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 8 nov. 2025.
13. INSTITUTO DE TECNOLOGIA SOCIAL (ITS). Tecnologia social: uma estratégia para o desenvolvimento. São Paulo: ITS, 2004.
14. INSTITUTO TRATA BRASIL. Ranking do Saneamento 2025. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2025. Disponível em: <https://www.tratabrasil.org.br/>. Acesso em: 8 nov. 2025.
15. JESUS, A. C. M. et al. Desigualdades territoriais no acesso à água potável no Brasil: uma análise das regiões Norte e Nordeste. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 25, n. 2, p. 45–62, 2023. DOI: 10.22296/2317-1529.rbeur.2023.2.45.

16. LOPES, H. G. Estudo do carvão ativo do caroço do açaí (*Euterpe oleracea*) como agente de tratamento em águas superficiais na captura de compostos nitrogenados. 2025. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) – Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, 2025.
17. LOUREIRO, C. F. B. Educação ambiental e movimentos sociais na construção da cidadania ecológica. São Paulo: Cortez, 2004.
18. OBA, S. N. et al. Removal of ibuprofen from aqueous media by adsorption: a comprehensive review. *Science of the Total Environment*, v. 780, p. 146608, 2021.
19. ONU – Organização das Nações Unidas. Resolução A/RES/64/292: o direito humano à água e ao saneamento. Nova York: ONU, 2010. Disponível em: <https://www.un.org/waterforlifedecade/>. Acesso em: 8 nov. 2025.
20. ONU MULHERES. Relatório sobre gênero e água: desigualdades e impactos sociais na América Latina. Nova York: ONU Mulheres, 2023. Disponível em: <https://www.unwomen.org/>. Acesso em: 8 nov. 2025.
21. PINHEIRO, L. R.; DINIZ, B. R. S.; LEMOS, R. S. S.; RICCI, B. C.; ANDRADE, L. H.; PINHEIRO, L. R. Avaliação de carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí como adsorvente aplicado à remoção de ibuprofeno. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)*, v. 11, n. 2, p. 61–76, 2023. ISSN 2317-563X.
22. QUEIROZ, A. M. C. et al. Avaliação da superfície de carvões ativados de açaí modificados para adsorção de íons metálicos. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 4, p. 210–223, 2020.
23. SANTOS, J. F. et al. Utilização de biomassa de *Moringa oleifera* e bucha vegetal em sistemas de filtração múltipla para tratamento de água no semiárido. *Revista Brasileira de Tecnologias Sociais*, v. 9, n. 1, p. 33–49, 2023.
24. SANTOS, A. C. et al. Sistema piloto de tratamento de água com carvão ativado produzido a partir de caroço de açaí e zeólita. *Congresso Brasileiro de Resíduos Sólidos*, v. 8, p. 1–8, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XV-020>.
25. SILVA, P. R. et al. Filtros de baixo custo com carvão ativado de *Euterpe precatoria* aplicados à purificação de água em comunidades rurais. *Revista Amazônica de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 12, n. 1, p. 75–88, 2023.
26. SILVA, Sally Knevitz da; PEREIRA, L.; SOUZA, Kássya Melissa Oliveira de et al. Uso do carvão de caroço de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) ativado quimicamente como meio filtrante de água. In: Produtos Florestais Não Madeireiros: tecnologia, mercado, pesquisas e atualidades. 2021. DOI: 10.37885/210504779.
27. SOUZA, E. P. et al. Filtros sustentáveis de baixo custo: revisão de tecnologias sociais aplicadas ao tratamento de água. *Revista Engenharia e Sustentabilidade*, v. 8, n. 2, p. 59–74, 2021.
28. THOMAS, H. Tecnologias sociais e inovação solidária na América Latina. Buenos Aires: CLACSO, 2020.
29. VIEIRA, J. S. C. et al. Pirólise dos caroços do açaí para obtenção de carvão granulado ativado para tratamento de água destinada ao consumo humano. *Brazilian Journal of Development*, v. 10, n. 7, p. 1–20, 2024. DOI: 10.34117/bjdv10n8-012.

30. WHO – World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 4^a ed., Geneva: WHO, 2022.

31. WORCH, E. Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling. Berlin: De Gruyter, 2012.