



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM REDE
NACIONAL PARA ENSINO DAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS
MESTRADO EM ENSINO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS



EVERALDO LIRA DA CUNHA

**CARVÃO ATIVADO DE CAROÇO DE AÇAÍ NA FILTRAÇÃO DE ÁGUA
FLUVIAL:** aplicação de um sistema simplificado como recurso para o ensino de Ciências
Ambientais em escola ribeirinha Amazônica

BELÉM-PA
2026

EVERALDO LIRA DA CUNHA

**CARVÃO ATIVADO DE CAROÇO DE AÇAÍ NA FILTRAÇÃO DE ÁGUA
FLUVIAL: aplicação de um sistema simplificado como recurso para o ensino de Ciências
Ambientais em escola ribeirinha Amazônica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Rede Nacional para Ensino das Ciências Ambientais da Universidade Federal do Pará (PROFCIAMB-UFPA), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências Ambientais.

Área de concentração: Recurso Naturais e Tecnologias

Linha de Pesquisa: Grupo de Estudos em Educação, Cultura e Meio Ambiente - GEAM

Orientadora: Prof. Dra. Mary Ellen Costa Moraes

BELÉM-PA
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

-
- C972c Cunha, Everaldo Lira da.
Carvão ativado de caroço de açaí na filtração de água fluvial : aplicação de um sistema simplificado como recurso para o ensino de Ciências Ambientais em escola ribeirinha Amazônica / Everaldo Lira da Cunha. — 2026.
100 f. + 1 E-book (28f: il. color.).
- Orientador(a): Prof^a. Dra. Mary Ellen Moraes Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional para o Ensino das Ciências Ambientais, Belém, 2026.
Acompanhado do Caderno Pedagógico: “Água limpa na Amazônia”
1. Caroço de açaí. 2. Carvão ativado. 3. Filtração de água.
4. Comunidades ribeirinhas. 5. Ensino de Ciências Ambientais. I.
Título. II. Título. Água limpa na Amazônia.

CDD 372.35709811

EVERALDO LIRA DA CUNHA

**CARVÃO ATIVADO DE CAROÇO DE AÇAÍ NA FILTRAÇÃO DE ÁGUA
FLUVIAL: aplicação de um sistema simplificado como recurso para o ensino de Ciências
Ambientais em escola ribeirinha Amazônica**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Rede Nacional para Ensino das Ciências Ambientais da Universidade Federal do Pará (PROFCIAMB-UFPA), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências Ambientais.

Área de concentração: Recurso Naturais e Tecnologias

Linha de Pesquisa: Grupo de Estudos em Educação, Cultura e Meio Ambiente - GEAM

Data de Aprovação: 24/08/2026

Conceito: _____

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MARY ELLEN COSTA MORAES**
Data: 08/09/2026 14:34:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Mary Ellen Costa Moraes – Orientadora

Doutora em Educação
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **KARLA TEREZA SILVA RIBEIRO**
Data: 08/09/2026 11:44:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Karla Tereza Silva Ribeiro – Membro Interno

Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **JANISE MARIA MONTEIRO RODRIGUES VIANA**
Data: 07/09/2026 11:08:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Janise Maria Monteiro Rodrigues Viana – Membro Externo

Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará/Campus Ananindeua

À minha esposa, Bruna Portugal, minha companheira de vida, pelo amor, pela presença e por caminhar ao meu lado em cada etapa desta jornada.

Aos meus filhos, João Pedro e João Paulo, meus maiores tesouros e a razão de muitos dos meus esforços. Em vocês encontro força, esperança e o verdadeiro significado de tudo aquilo que busco construir.

Vocês são o que tenho de mais precioso nesta vida. Cada conquista só encontra sentido quando posso compartilhá-la com minha família.

E, acima de tudo, a Deus, por Sua presença constante em minha vida, por sustentar meus passos e por me conceder o privilégio de viver cada momento ao lado daqueles que amo.

A vocês, dedico esta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela presença constante e pela força para seguir diante dos desafios. Nele encontrei direção, serenidade e gratidão por cada etapa vivida.

À minha esposa, Bruna Portugal, meu amor e minha companheira de vida. Obrigado por dividir comigo os desafios, as responsabilidades e também as alegrias dos nossos dias. Nos momentos mais difíceis, encontramos um no outro a força para continuar. Sua compreensão, seu amor e sua presença foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Esta conquista também é sua, porque, como tantas outras em nossa vida, nós a construímos juntos.

Aos meus filhos, João Pedro e João Paulo, minhas maiores riquezas e razões para buscar ser melhor a cada dia. Que esta conquista lhes mostre o valor do conhecimento, da dedicação e da perseverança.

À minha orientadora, Dra. Mary Ellen Costa Moraes, pela confiança, orientação, disponibilidade e pelas contribuições essenciais para a realização desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional para Ensino das Ciências Ambientais (PROFCIAMB/UFPA), pela oportunidade de formação e pelos conhecimentos construídos na integração entre ciência, educação e realidade amazônica. Aos professores e profissionais do Programa, pelos ensinamentos e experiências compartilhados ao longo desta trajetória. À Profa. Dra. Karla Tereza Silva Ribeiro e à Dra. Janise Maria Monteiro Rodrigues Viana, integrantes da banca examinadora, pela disponibilidade, leitura atenta e valiosas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

À Profa. Dra. Sury de Moura Monteiro, pelas vivências proporcionadas na disciplina de campo de Educação Ambiental, que contribuíram significativamente para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

À colega Gisele Tavares, pelo apoio e pela valiosa contribuição na realização das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa, e a João Welliton Perdigão, pela amizade sincera, pelo companheirismo, pelo apoio e pelos momentos compartilhados ao longo desta caminhada.

Ao meu amigo Everton Pinto, por uma amizade construída ao longo de muitos anos e para além do ambiente profissional, marcada pela confiança, pela presença e pelos muitos momentos compartilhados ao longo da vida.

À Universidade Federal do Pará, pelas oportunidades de formação, trabalho e crescimento que fazem parte da minha trajetória.

Por fim, a todos que contribuíram para esta conquista, minha sincera gratidão.

**“Sabemos que todas as coisas cooperam
para o bem daqueles que amam a Deus.”
(Romanos 8:28)**

RESUMO

O acesso à água potável permanece como um desafio para comunidades ribeirinhas da Amazônia, onde limitações na infraestrutura de saneamento favorecem o uso de água fluvial sem tratamento adequado. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo analisar a construção de um sistema filtrante de baixo custo para o tratamento simplificado de água fluvial, utilizando carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea* Mart.), e avaliar seu potencial como recurso para o ensino de Ciências Ambientais. Trata-se de uma pesquisa aplicada, de abordagem quali-quantitativa, desenvolvida por meio da produção e caracterização do carvão ativado, montagem e avaliação experimental do sistema filtrante e realização de análises físico-químicas, microbiológicas e morfológicas. Como parte do caráter profissional e aplicado da pesquisa, foi elaborado um produto educacional na forma de **caderno ilustrado**, fundamentado nos resultados experimentais e destinado a orientar a construção e a utilização do sistema filtrante em contextos escolares e comunitários. O filtro foi constituído por garrafa PET reutilizada, cascalho, areia, manta filtrante, fragmentos de calcário e carvão ativado. Os resultados demonstraram, para o sistema contendo carvão ativado produzido em laboratório, redução da turbidez de 48,5 para 6,2 NTU (87,2%), da cor aparente de 132 para 30 uH (77,3%) e dos sólidos totais de 210 para 95 mg L⁻¹ (54,8%). Os sistemas contendo carvões ativados produzidos em laboratório e artesanalmente também promoveram ajuste do pH para a faixa estabelecida pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Nas análises microbiológicas, os resultados de coliformes totais evidenciaram a necessidade de etapa complementar de desinfecção, enquanto *Escherichia coli*, presente na água bruta, não foi detectada após a filtração nos três sistemas avaliados. As análises por microscopia eletrônica de varredura evidenciaram o desenvolvimento de poros e cavidades após a ativação química, favorecendo os processos de adsorção. Os carvões produzidos em laboratório e artesanalmente apresentaram desempenho relevante em comparação ao carvão ativado industrial, indicando potencial para aplicação em sistemas simplificados de tratamento de água. Conclui-se que a proposta articula o aproveitamento sustentável de um resíduo agroindustrial amazônico, a melhoria da qualidade da água e a produção de um recurso educacional contextualizado, contribuindo para o ensino de Ciências Ambientais e para a disseminação de tecnologias sociais adequadas à realidade amazônica.

Palavras-chave: carvão ativado; caroço de açaí; filtração de água; comunidades ribeirinhas; ensino de ciências ambientais; tecnologia social.

ABSTRACT

Access to safe drinking water remains a challenge for riverine communities in the Amazon, where limitations in sanitation infrastructure favor the use of untreated river water. In this context, this study aimed to analyze the construction of a low-cost filtration system for the simplified treatment of river water using activated carbon produced from açai seeds (*Euterpe Oleracea* Mart.) and to assess its potential as a resource for Environmental Sciences teaching. This applied research adopted a qualitative and quantitative approach involving the production and characterization of activated carbon, the assembly and experimental evaluation of the filtration system, and physicochemical, microbiological, and morphological analyses. As part of the professional and applied nature of the research, an illustrated educational workbook was developed as an educational product, based on the experimental results and designed to guide the construction and use of the filtration system in school and community contexts. The filter consisted of a reused PET bottle, gravel, sand, filter media, limestone fragments, and activated carbon. For the system containing laboratory-produced activated carbon, the results showed a reduction in turbidity from 48.5 to 6.2 NTU (87.2%), apparent color from 132 to 30 CU (77.3%), and total solids from 210 to 95 mg L⁻¹ (54.8%). The systems containing laboratory-produced and artisanal activated carbons also adjusted the pH to the range established by Brazilian Ministry of Health Ordinance GM/MS No. 888/2021. Regarding the microbiological analyses, the results for total coliforms indicated the need for a complementary disinfection step, whereas *Escherichia coli*, detected in the raw water, was not detected after filtration in any of the three systems evaluated. Scanning electron microscopy revealed the development of pores and cavities after chemical activation, favoring adsorption processes. Laboratory-produced and artisanal activated carbons showed relevant performance compared with industrial activated carbon, indicating their potential application in simplified water treatment systems. It is concluded that the proposed approach integrates the sustainable use of an Amazonian agro-industrial residue, improvement of water quality, and development of a contextualized educational resource, contributing to Environmental Sciences teaching and to the dissemination of social technologies suited to the Amazonian context.

Keywords: activated carbon; açai seeds; water filtration; riverine communities; environmental sciences teaching; social technology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Residencial unifamiliar edificada à margem do rio Guamá, localizado na região insular de Belém (PA), tipicamente ribeirinha.....	17
Figura 2 - Distribuição das formas de acesso à água e indicadores de cobertura dos serviços públicos de abastecimento no município de Belém (PA), evidenciando a predominância da rede geral de distribuição e a participação de fontes alternativas, bem como a comparação entre os índices municipal, estadual e nacional, com base em dados do IBGE	21
Figura 3 - Mapa de localização do município de Belém (PA), evidenciando a configuração territorial e a região insular, com destaque para as ilhas de Mosqueiro, Caratateua (Outeiro) e Combu, bem como os principais eixos de acesso e limites geográficos.	23
Figura 4 - Acúmulo e descarte inadequado de caroços de açaí em área urbana de Belém (PA), evidenciando falhas na gestão de resíduos sólidos e o potencial impacto ambiental associado à ausência de coleta regular.	29
Figura 5 - Coleta de caroços de açaí (Euterpe Oleracea) em batedores artesanais de Belém-PA, utilizando pá de aço inoxidável e acondicionamento da biomassa em sacas de rafia para transporte.....	46
Figura 6 - Etapas de preparação da biomassa: (A) secagem em estufa; (B) peneiramento para padronização granulométrica; e (C) secagem natural ao ar livre para redução da umidade residual.	47
Figura 7 - Etapas de secagem das amostras após a ativação química: (A) secagem em estufa da amostra CAL-01; e (B) secagem natural da amostra CAA-01 em ambiente aberto.....	49
Figura 8 - Sistemas de carbonização utilizados na produção dos carvões ativados: (A) carbonização artesanal em panela metálica aquecida em fogão a lenha; (B) carbonização em mufla modelo MUF-4525.....	50
Figura 9 - Equipamentos utilizados na caracterização morfológica das amostras: (A) metalizador Quorum, modelo Q150T-ES; (B) microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo EVO MA-10 (Carl Zeiss AG, Alemanha).....	52
Figura 10 - Sistema experimental de filtração em escala laboratorial, evidenciando a montagem das colunas filtrantes confeccionadas com garrafas de politereftalato de etileno (PET) de 1 L, a disposição das camadas do meio filtrante e os recipientes utilizados para coleta da água filtrada.....	54

Figura 11 - Aspecto macroscópico dos caroços de açaí antes e após a impregnação com solução de hidróxido de sódio (NaOH), evidenciando alteração da coloração superficial.	59
Figura 12 - Comparação macroscópica dos materiais adsorventes utilizados na pesquisa após os processos de carbonização e ativação.	60
Figura 13 - Comparação visual da água obtida nos ensaios preliminares de filtração: (A) sistema filtrante sem a camada de carvão ativado; (B) sistema filtrante completo contendo carvão ativado.	62
Figura 14 - Painel comparativo das micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras de caroço in natura (CIN), carvão não ativado (CNA), carvão ativado artesanalmente (CAA) e carvão ativado em laboratório (CAL), em diferentes ampliações, evidenciando a evolução morfológica promovida pelos processos de carbonização e ativação química.	65
Figura 15 - Vista aérea da área de coleta das amostras de água no rio Guamá, em frente à Ilha do Combu, município de Belém (PA), obtida por meio de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais utilizados na confecção do filtro e suas respectivas funções.....	36
Tabela 2 - Especificações das camadas do meio filtrante utilizadas na montagem das colunas experimentais.....	53
Tabela 3- Comparação das Condições de Produção dos carvões ativados utilizados na pesquisa.	60
Tabela 4 - Resultados dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água bruta e da água filtrada pelos sistemas contendo carvão ativado industrial (CAI), carvão ativado laboratorial (CAL) e carvão ativado artesanal (CAA).....	68
Tabela 5 - Desempenho comparativo dos sistemas filtrantes com base na eficiência de remoção dos parâmetros quantitativos e na avaliação dos parâmetros microbiológicos.	69

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ASTM	ASTM International
BET	Brunauer–Emmett–Teller
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
CAA	Carvão Ativado Artesanal
CAI	Carvão Ativado Industrial
CAL	Carvão Ativado produzido em Laboratório
CCNT	Centro de Ciências Naturais e Tecnologia
CIN	Caroço de açaí in natura
CNA	Carvão Não Ativado
COSANPA	Companhia de Saneamento do Pará
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PAIS	Produção Agroecológica Integrada e Sustentável
PET	Polietileno tereftalato
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
RMB	Região Metropolitana de Belém
SALTA-z	Solução Alternativa Coletiva Simplificada de Tratamento de Água
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TS	Tecnologia Social
UEPA	Universidade do Estado do Pará
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNICEF	United Nations Children's Fund
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WGS 84	World Geodetic System 1984

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.1.1 Objetivos específicos	20
3 REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1 Abastecimento de água nas comunidades ou territórios ribeirinhos.....	21
3.2 Doenças de veiculação hídrica em populações ribeirinhas	26
3.3 Geração de resíduo do caroço de açaí e seu uso na filtração de água fluvial	28
3.4 Carvão, carvão ativado e carvão ativado a partir do caroço de açaí (Euterpe Oleracea)	32
3.5 Mecanismos de purificação: o papel da adsorção e absorção na filtragem de água fluvial	33
3.6 Filtro de purificação da água fluvial	34
3.7 Tecnologia sociais e justiça ambiental	37
3.8 A Base Nacional Comum Curricular e o ensino de Ciências Ambientais na Educação Básica	38
3.9 Ensino de Ciências Ambientais em escolas ribeirinhas: educação contextualizada, saberes tradicionais e protagonismo estudantil	34
4 METODOLOGIA.....	44
4.1 Natureza da pesquisa.....	44
4.2 Contexto da pesquisa	44
4.3 Metodologia experimental para produção e avaliação da eficiência do carvão ativado de caroço de açaí	45

4.4.1 Coleta e preparação da biomassa	46
4.4.2 Processo de ativação química	48
4.4.3 Processo de carbonização	49
4.4.4 Caracterização morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	51
4.4.5 Montagem do sistema experimental de filtração	52
4.5 Elaboração do produto educacional	55
4.5.1 Concepção da cartilha educativa	55
4.5.2 Organização do conteúdo	56
4.5.3 Contribuição do produto educacional para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.1 Produção do carvão ativado e desenvolvimento do sistema filtrante	58
5.2 Caracterização morfológica do carvão ativado por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	62
5.3 Avaliação do desempenho dos sistemas filtrantes na melhoria da qualidade da água	67
5.3.1 Turbidez.....	70
5.3.2 Sólidos Totais	72
5.3.3 Cor Aparente.....	73
5.3.4 Potencial hidrogeniônico (pH)	74
5.3.5 Dureza Total	69
5.3.6 Coliformes totais e <i>Escherichia coli</i>	75
5.3.7 Síntese do desempenho dos sistemas filtrantes	76
5.4 Relação entre a estrutura porosa e o desempenho dos sistemas filtrantes.....	77
5.5 Comparação dos resultados com estudos da literatura	79

5.6 Adequação da Proposta à realidade socioambiental amazônica	81
5.7 Limitações da pesquisa e perspectivas de aperfeiçoamento	82
5.8 Contribuições do produto educacional para a educação ambiental e os objetivos do desenvolvimento sustentável	84
6 CONCLUSÃO	86
REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE A- PRODUTO EDUCATIVO ÁGUA LIMPA NA AMAZÔNIA	100

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água potável é uma das principais problemáticas enfrentadas por comunidades em situação de vulnerabilidade na Amazônia brasileira. Apesar do estado do Pará possuir uma das maiores disponibilidades hídricas do planeta, populações ribeirinhas convivem com a escassez de água tratada, recorrendo frequentemente aos rios para suprir suas necessidades básicas, muitas vezes sem qualquer tipo de purificação, o que contribui para a incidência de doenças de veiculação hídrica, como diarreia, hepatite A, leptospirose e infecções intestinais (Ibge, 2023; Santos; Ferreira, 2022; Funasa, 2018; Brasil, 2021).

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Ibge (2023), apenas 32,3% dos domicílios em áreas rurais brasileiras são abastecidos por rede geral de água. Nas comunidades ribeirinhas¹ da Região Norte, esse percentual é ainda menor, refletindo a ausência de políticas públicas eficazes e de infraestrutura básica, como sistemas de captação, tratamento e distribuição de água potável. Segundo o próprio IBGE, em 2023, um em cada três domicílios rurais ainda dependia de fontes alternativas de abastecimento, como poços, rios ou nascentes, muitas vezes sem qualquer tipo de tratamento.

A ausência de sistemas de saneamento agrava ainda mais esse cenário. De acordo com dados de saneamento do Ibge (2023), menos de 10% dos domicílios rurais possuem acesso à rede geral de esgoto ou a fossas sépticas conectadas a uma rede pública. Essa deficiência estrutural resulta na contaminação das fontes de água fluviais (água de rio), comprometendo não apenas o abastecimento humano, mas também a saúde pública das populações tradicionais da Amazônia.

Por este fato, é possível considerar a importância do acesso à água potável como uma questão social fundamental, que impacta diretamente a qualidade de vida, a saúde pública e o desenvolvimento sustentável das comunidades vulneráveis. O acesso inadequado a fontes seguras de água compromete o direito básico à saúde, perpetua ciclos de pobreza e dificulta a inclusão social, especialmente em áreas rurais e remotas (ONU, 2015; WHO/Unicef, 2017). A seguir tem-se a figura 1 que mostra uma residência tipicamente ribeirinha.

¹ Entendem-se comunidades ribeirinhas como grupos socialmente constituídos a partir de uma relação histórica, material e simbólica com rios, várzeas e florestas, cuja identidade não se define apenas pela localização geográfica às margens das águas, mas pelos processos socioespaciais e histórico-culturais que produzem sentimento de pertencimento e territorialidade específica. Sua reprodução social depende de atividades como pesca, agricultura familiar, extrativismo e manejo tradicional dos recursos naturais, organizadas conforme as dinâmicas ecológicas do rio e da floresta, articulando saberes tradicionais transmitidos intergeracionalmente. Tais comunidades configuram-se, portanto, como coletividades de base socioambiental dinâmica, nas quais o rio constitui eixo estruturante da vida social, econômica e cultural, ainda que inseridas em contextos contemporâneos de disputa territorial, expansão urbana e pressões do capital sobre seus territórios (Fraxe, 2007; Silva, 2024).

Figura 1- Residencial unifamiliar edificada à margem do rio Guamá, localizado na região insular de Belém (PA), tipicamente ribeirinha



Fonte: Acervo do Autor.

Investimentos em infraestrutura adequada para captação, tratamento e distribuição de água, aliados às políticas públicas efetivas e à educação sanitária, são essenciais para reverter esse quadro e garantir a universalização do acesso à água potável. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a implementação de sistemas simplificados de tratamento e a promoção de tecnologias apropriadas, como filtros domésticos e soluções baseadas na comunidade, têm se mostrado estratégias eficazes para minimizar os impactos da precariedade hídrica em regiões remotas (WHO, 2019). Dessa forma, assegurar o direito à água potável não deve ser encarado apenas como uma meta de saúde pública, mas como um compromisso social que contribui para a redução das desigualdades, a promoção da dignidade humana e a conservação dos recursos naturais, especialmente em contextos ambientalmente sensíveis como a Amazônia brasileira (Souza, 2021).

No que se refere ao acesso à água potável nas comunidades ribeirinhas, essa questão assume maior relevância devido às particularidades sociais, culturais e ambientais que caracterizam esses territórios. A estreita relação dessas populações com os rios, associada às limitações de infraestrutura e de acesso aos serviços públicos, reforça a necessidade de ações

educativas contextualizadas que valorizem os saberes locais e promovam o uso sustentável dos recursos hídricos (Fraxe, 2004; Nogueira; Souza, 2019).

Diante dessa realidade, o ensino de Ciências Ambientais configura-se como uma importante ferramenta formativa para a construção de saberes críticos e contextualizados, permitindo que os estudantes compreendam os processos naturais e tecnológicos relacionados à qualidade da água e desenvolvam soluções para desafios presentes em seu território. Nesse contexto, a realização de atividades investigativas no ambiente escolar favorece a aproximação entre os conhecimentos científicos e a realidade vivenciada pelos estudantes, estimulando o protagonismo discente, a resolução de problemas e a aprendizagem significativa. A construção de sistemas simplificados de filtração com materiais de baixo custo constitui um exemplo dessa abordagem, ao possibilitar a articulação entre experimentação, educação ambiental e tecnologia social (Correa; Nascimento, 2024; Santana, 2023).

Dessa forma, a Educação Ambiental desenvolvida no contexto das comunidades ribeirinhas pode contribuir para o fortalecimento da relação entre os sujeitos e o território, estimulando a reflexão sobre os problemas socioambientais locais e sobre práticas relacionadas ao uso e à conservação dos recursos naturais. Nesse processo, a valorização dos conhecimentos construídos pelas comunidades a partir de sua interação cotidiana com rios, furos, igarapés e florestas constitui um elemento importante para aproximar os conteúdos científicos das experiências e dos saberes locais, favorecendo uma educação ambiental contextualizada às especificidades socioculturais amazônicas (Santos; Trein, 2010; Pojo; Elias; Vilhena, 2014).

Lopes e Carvalho (2023) ressaltam que o ensino de Ciências Ambientais não deve se limitar à transmissão de conteúdos teóricos, mas deve ser articulado com práticas pedagógicas que valorizem o conhecimento prévio dos estudantes e sua realidade sociocultural. Essas práticas favorecem o desenvolvimento do pensamento crítico e a capacidade de resolver problemas ambientais concretos, estimulando o engajamento ativo dos alunos. Além disso, ao integrar saberes científicos e experiências locais, o ensino contribui para a formação de cidadãos conscientes e responsáveis, aptos a atuar na preservação dos recursos naturais e na promoção do desenvolvimento sustentável em suas comunidades.

A presente pesquisa, investiga a utilização de um sistema filtrante de baixo custo construído com materiais acessíveis, incluindo carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí, avaliando sua eficiência na melhoria da qualidade da água e seu potencial como recurso didático para o ensino de Ciências Ambientais. Para isso, foram realizados ensaios físico-químicos, microbiológicos e análises morfológicas do material adsorvente, buscando

compreender a relação entre as características estruturais do carvão ativado e o desempenho do sistema filtrante.

Como produto educacional, foi elaborada uma cartilha contendo orientações para a construção e utilização do filtro, com o propósito de subsidiar futuras ações educativas voltadas ao ensino de Ciências Ambientais em contextos escolares e comunitários.

Mais do que uma intervenção pontual, esta pesquisa busca fortalecer o ensino de Ciências Ambientais como um campo formativo, crítico e comprometido com a realidade dos territórios onde se desenvolve. Nessa perspectiva, a valorização dos saberes locais, o estímulo à pesquisa escolar e o desenvolvimento de tecnologias socioambientais acessíveis constituem elementos essenciais para uma educação ambiental que promove o diálogo entre conhecimentos científicos e populares, favorece a participação ativa dos estudantes na compreensão dos problemas ambientais e contribui para a construção de soluções sustentáveis voltadas às demandas das comunidades (Carvalho, 2020; Leff, 2022; Silva; Silva; Melo, 2022).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Desenvolver um sistema filtrante de baixo custo, utilizando carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí, para o tratamento simplificado de água fluvial, explorando seu potencial como recurso didático-pedagógico para o ensino de Ciências Ambientais em contexto ribeirinho amazônico.

2.2.1 Objetivos específicos

- Identificar e selecionar materiais de baixo custo para a construção de um sistema simplificado de filtração de água;
- Produzir e caracterizar carvão ativado obtido a partir do caroço de açaí para aplicação em sistemas simplificados de tratamento de água;
- Construir e avaliar a eficiência de um sistema filtrante utilizando parâmetros físico-químicos e microbiológicos de qualidade da água;
- Elaborar um caderno educativo contendo orientações para construção e utilização do sistema filtrante como recurso de apoio ao ensino de Ciências Ambientais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Abastecimento de Água nas Comunidades ou Territórios Ribeirinhos

O abastecimento de água em comunidades ribeirinhas configura-se como um dos pontos mais sensíveis do saneamento básico no Brasil, sobretudo na Região Norte. Nessa porção do território, condicionantes geográficos e logísticos - associados a limitações econômicas e institucionais - impõem obstáculos persistentes à ampliação do acesso à água potável. No estado do Pará, essa problemática assume contornos ainda mais complexos, uma vez que parte expressiva da população reside em áreas de difícil acesso, como ilhas fluviais e margens de rios, onde a presença de infraestrutura básica historicamente se estabelece de forma desigual e descontínua (Ibge, 2022; ANA, 2021).

Nesse cenário, os dados nacionais ajudam a dimensionar a magnitude do problema. Segundo o Instituto Trata Brasil (2023), mais de 33 milhões de brasileiros ainda não possuem acesso à água tratada, sendo a Região Norte aquela que concentra os menores índices de cobertura. No Pará, apenas 61,3% da população dispõe de abastecimento regular de água potável - um percentual que, embora já indicativo de déficit estrutural, tende a se reduzir quando observadas as realidades locais de comunidades ribeirinhas e áreas rurais isoladas (Instituto Trata Brasil, 2023; Brasil, 2022). A seguir, na figura 2, tem-se um infográfico resumido, onde é possível perceber a situação do acesso a água no município de Belém-PA.

Figura 2 - Distribuição das formas de acesso à água e indicadores de cobertura dos serviços públicos de abastecimento no município de Belém (PA), evidenciando a predominância da rede geral de distribuição e a participação de fontes alternativas, bem como a comparação entre os índices municipal, estadual e nacional, com base em dados do IBGE



Fonte: (Ibge, 2022; Instituto Trata Brasil, 2023).

Quando a análise se desloca para a escala municipal, as desigualdades tornam-se mais nítidas e, em certa medida, mais reveladoras das estratégias cotidianas de acesso à água. Em Belém (PA), de acordo com o Censo Demográfico de 2022 do IBGE, 67,9% da população é atendida por rede geral de distribuição. Ainda assim, uma parcela significativa recorre a soluções alternativas, como poços profundos ou artesianos (29,3%), além de poços rasos ou cacimbas (1,7%) e outras formas de abastecimento (0,9%), que incluem tanto a captação direta de água de corpos hídricos quanto o armazenamento de água da chuva (Ibge, 2022).

Esse quadro é complementado pelo fato de que cerca de 19.330 habitantes não possuem água encanada em seus domicílios. Mais do que um dado quantitativo, esse contingente evidencia a permanência de práticas de abastecimento marcadas pela precariedade e pela exposição a riscos sanitários, sobretudo em contextos em que o tratamento da água depende de iniciativas individuais ou comunitárias.

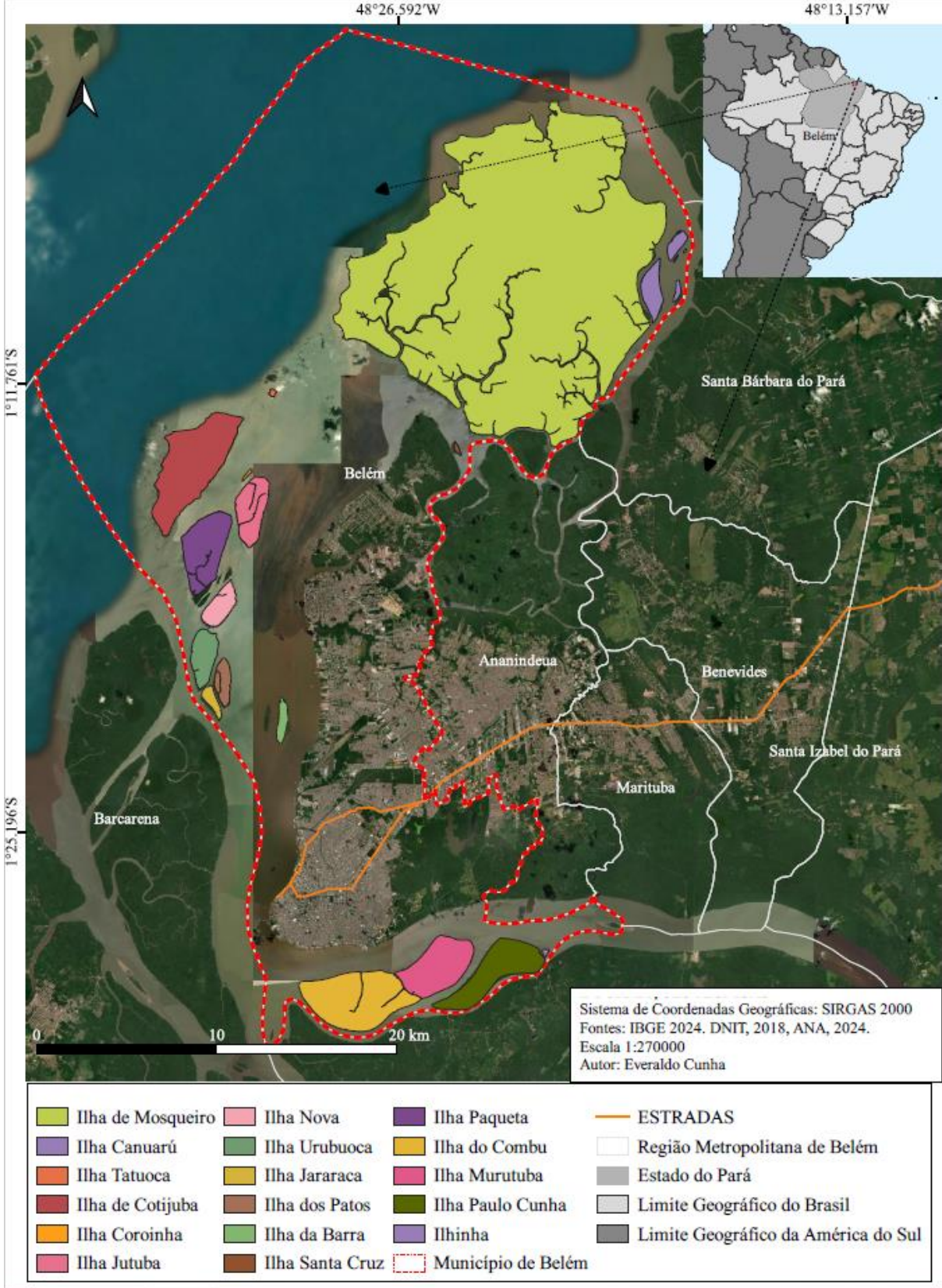
Por outro lado, indicadores agregados sugerem uma situação aparentemente mais favorável. Dados de cobertura apontam que 94,6% da população de Belém é formalmente atendida por serviços públicos de abastecimento de água, percentual superior às médias do Pará (51,6%) e do Brasil (83,1%) (Ibge, 2022). Esse indicador, contudo, não contempla aspectos como regularidade do fornecimento, qualidade da água distribuída e desigualdades existentes no território municipal.

A configuração espacial de Belém ajuda a compreender essas diferenças. O município possui 39 ilhas que correspondem a aproximadamente 65% de sua superfície territorial (Veloso *et al.*, 2013). Historicamente, menos de 10% da população residia nessa porção insular, caracterizada pela baixa densidade populacional e pela dispersão dos assentamentos (Moreira, 1989; Guerra, 2015). Essas condições impõem desafios à oferta de infraestrutura e serviços essenciais às comunidades ribeirinhas.

Nesse território insular encontram-se áreas de maior densidade populacional e relevância socioeconômica, como Mosqueiro, Caratateua (Outeiro) e Cotijuba, e ilhas de ocupação predominantemente ribeirinha e extrativista, como Combu, Jutuba, Paquetá, Ilha Nova, Longa, Arapiranga, Urubuoca, Papagaio, Pombal, Murutucu, Jararaquinha e Tatuoca (Prefeitura Municipal de Belém, 2019; Ibge, 2022).

A Figura 3, ilustra através do mapa, essa configuração ao apresentar a delimitação do território administrativo de Belém (PA), com destaque para sua extensa região insular, permitindo visualizar, em termos espaciais, parte das condições que sustentam as desigualdades discutidas ao longo desta seção.

Figura 3 - Mapa de localização do município de Belém (PA), evidenciando a configuração territorial e a região insular, com destaque para as ilhas de Mosqueiro, Caratateua (Outeiro) e Combu, bem como os principais eixos de acesso e limites geográficos



Fonte: Acervo do Autor.

Pesquisas sobre as dimensões socioambientais das ilhas ao sul da grande Belém revelam impactos na vida ribeirinha decorrentes de expansão urbana, degradação ambiental, poluição hídrica e precariedade de serviços básicos, incluindo saneamento e abastecimento de água encanada (Silva, 2023). A ilha de Combu integra uma Área de Proteção Ambiental (APA)² voltada à conservação, evidenciando a complexidade de integrar proteção ambiental com as necessidades de desenvolvimento local e gestão de recursos hídricos (Prefeitura Municipal de Belém, 2019).

Embora Mosqueiro e Caratateua (Outeiro) possuam status de distritos administrativos com maior grau de urbanização relativa, as demais ilhas - predominantemente ocupadas por comunidades ribeirinhas tradicionais - enfrentam infraestrutura sanitária limitada. Isso se manifesta na dependência de soluções alternativas para água, como poços rasos e captação direta de água superficial, agravando as desigualdades socioambientais no interior do próprio município (Prefeitura Municipal de Belém, 2019; BRASIL, 2007). Tais desigualdades refletem processos mais amplos de produção desigual do espaço urbano amazônico, nos quais o acesso a serviços básicos é distribuído de forma desigual conforme classificações territoriais e econômicas, o que tem sido analisado por autores como Santos (1996), que discute a natureza socioespacial da desigualdade no Brasil, e Fraxe (2007), que enfatiza as condições específicas de reprodução social de comunidades tradicionais na Amazônia (Santos, 1996; Fraxe, 2007).

A limitação do acesso à água potável nessas comunidades não está associada à escassez do recurso hídrico, mas à ausência de infraestrutura adequada para captação, tratamento e distribuição. Mesmo situadas às margens de grandes rios, muitas populações ribeirinhas utilizam diretamente a água fluvial para consumo, preparo de alimentos e higiene pessoal, frequentemente sem qualquer tipo de tratamento prévio. Essa condição evidencia a vulnerabilidade socioambiental dessas populações e favorece a ocorrência de doenças de veiculação hídrica, como hepatite A, giardíase, amebíase e infecções gastrointestinais, reforçando a necessidade de investimentos em saneamento básico, abastecimento seguro de água e políticas públicas voltadas à garantia do direito humano à água potável (Brasil, 2018; WHO, 2023; Mendonça, 2023).

Diante da ausência histórica de políticas públicas efetivas e de sistemas convencionais de saneamento, as populações tradicionais da Amazônia desenvolveram, ao longo do tempo,

² Área de Proteção Ambiental (APA): categoria de Unidade de Conservação de Uso Sustentável destinada a compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável dos recursos naturais. As APAs buscam proteger a diversidade biológica e disciplinar o processo de ocupação do território, podendo compreender áreas públicas e privadas e admitir ocupação e atividades humanas compatíveis com seus objetivos de conservação (ICMBio, 2026).

estratégias próprias de tratamento da água, fundamentadas em saberes empíricos e práticas culturais transmitidas entre gerações. Essas soluções refletem processos de adaptação ao território e à dinâmica dos rios amazônicos, evidenciando a capacidade dessas comunidades de construir respostas locais às suas necessidades básicas (Hissa, 2008; Leff, 2022).

Entre as práticas tradicionalmente utilizadas, destaca-se o uso de técnicas simples de filtragem, como o emprego de tecidos de algodão, peneiras artesanais e recipientes cerâmicos. O filtro de pano, amplamente difundido em comunidades ribeirinhas, atua principalmente na remoção de sólidos em suspensão e matéria orgânica grosseira, configurando uma etapa inicial de tratamento físico da água (Funasa, 2018). Já o filtro de barro, presente historicamente nos domicílios brasileiros, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, apresenta maior eficiência na retenção de partículas, melhora as características organolépticas da água e reduz parcialmente a presença de microrganismos, além de promover o resfriamento natural da água por evaporação (Heller; Rezende, 2009).

Essas práticas evidenciam que a filtragem da água, ainda que em sua forma mais elementar, sempre integrou o cotidiano das populações amazônicas como estratégia de cuidado com a saúde e sobrevivência. No entanto, fatores como o isolamento geográfico, a sazonalidade das cheias, a precariedade das políticas públicas e a falta de manutenção dos sistemas existentes comprometem a efetividade e a sustentabilidade dessas soluções ao longo do tempo.

Conforme destacam Heller e Rezende (2009), os modelos convencionais de saneamento mostram-se inadequados à realidade ribeirinha, tornando necessária a adoção de soluções técnicas apropriadas ao contexto local, baseadas em tecnologias simples, de baixo custo e com participação comunitária. Nesse contexto, a proposição de filtros alternativos e tecnologias sociais³ emerge a partir de uma demanda concreta: a ampliação do acesso à água potável em comunidades ribeirinhas, integrando conhecimentos técnico-científicos aos saberes tradicionais.

Essa abordagem dialoga com os princípios da Política Nacional de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007), atualizada pelo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), que reconhece a necessidade de inclusão de populações em situação de vulnerabilidade e áreas remotas nos planos de saneamento. Entretanto, a implementação dessas políticas na Amazônia

³ A Tecnologia Social (TS) é compreendida, na literatura recente, como um campo de práticas e conhecimentos voltado à solução de problemas sociais por meio de processos participativos e contextualizados. Para Bagattolli e Pizarico (2025), trata-se de um conceito em disputa no cenário latino-americano, associado à inovação orientada por demandas sociais e à promoção da inclusão. Vasconcellos (2025) destaca que a TS articula saberes científicos e comunitários na construção de soluções reprodutíveis e sustentáveis. Assim, a Tecnologia Social consolida-se como instrumento de transformação social e de democratização do conhecimento, superando a lógica estritamente mercadológica da tecnologia convencional.

ainda enfrenta importantes entraves estruturais, relacionados às grandes distâncias geográficas, às limitações de infraestrutura, às dificuldades logísticas e à fragilidade da articulação entre os diferentes níveis de gestão pública, fatores que comprometem a universalização do acesso aos serviços de abastecimento de água e saneamento básico (Santos; Santana, 2021; Bordalo, 2022; Castro; Cerezini, 2023). Em Belém, tais desafios são evidentes nas ilhas fluviais, onde parcela significativa da população permanece sem acesso à rede pública de abastecimento, recorrendo a poços rasos ou à coleta direta de água de igarapés e rios, práticas que não asseguram a qualidade da água consumida (Pmsb, 2019).

A Companhia de Saneamento do Pará - COSANPA reconhece que o abastecimento regular e com qualidade não alcança todas essas áreas, sendo necessária a adoção de modelos descentralizados, como sistemas de captação de água da chuva, filtros domiciliares e soluções alternativas de tratamento (Cosanpa, 2022). Nesse sentido, garantir o acesso à água potável ultrapassa a dimensão técnica, assumindo também um caráter social, político e ético.

De acordo com Leff (2022), a exclusão histórica das populações tradicionais do acesso a serviços básicos configura uma expressão de injustiça ambiental, ao revelar a negação de direitos fundamentais à saúde, à dignidade e à qualidade de vida. Assim, assegurar o abastecimento de água potável nos territórios ribeirinhos constitui condição essencial para o exercício da cidadania, para a promoção da justiça ambiental e para o fortalecimento do desenvolvimento sustentável na Amazônia (Arruda; Berté, 2023).

3.2 Doenças de Veiculação Hídrica em Populações Ribeirinhas

O acesso inadequado à água potável constitui uma das principais causas de doenças de veiculação hídrica, especialmente em regiões marcadas pela ausência de saneamento básico e de sistemas regulares de tratamento de água, como ocorre em muitas comunidades ribeirinhas da Amazônia. Essas enfermidades são provocadas por microrganismos patogênicos presentes em águas contaminadas e estão associadas a elevados índices de morbimortalidade, afetando de forma mais intensa crianças, idosos e populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica (Brasil, 2022; OMS, 2023).

Entre as principais doenças de veiculação hídrica destacam-se a diarreia infecciosa, hepatite A, febre tifoide, cólera, leptospirose e giardíase. Segundo dados da Organização Mundial da Saúde, mais de 1,7 milhão de mortes anuais no mundo estão relacionadas ao consumo de água contaminada e à ausência de saneamento adequado (OMS, 2023). No Brasil, o Ministério da Saúde aponta que aproximadamente 34% dos surtos de doenças diarreicas

registrados entre 2017 e 2022 tiveram como principal causa o consumo de água imprópria para o consumo humano (Brasil, 2023).

Na Amazônia Legal, esse cenário é agravado pelas condições precárias de infraestrutura e pela dependência direta dos corpos hídricos naturais. Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA) indicam que apenas cerca de 60% da população urbana da Região Norte é atendida por rede de abastecimento de água, enquanto nas áreas rurais e ribeirinhas esse percentual é inferior a 30% (Brasil, 2022). No estado do Pará, comunidades ribeirinhas utilizam majoritariamente água proveniente de rios, igarapés ou poços rasos, muitas vezes sem qualquer tipo de tratamento, o que expõe os moradores a riscos constantes de contaminação (Ibge, 2022; ANA, 2021).

Estudos realizados em comunidades ribeirinhas do Pará evidenciam os desafios relacionados à qualidade da água utilizada para consumo humano. Em Abaetetuba e Barcarena, Medeiros, Lima e Guimarães (2016) identificaram comprometimento da qualidade das águas consumidas em comunidades expostas a diferentes pressões antrópicas, com maior criticidade observada em Vila do Conde. Mais recentemente, na ilha do Combu, Carneiro e Ribeiro (2026) detectaram a presença de coliformes totais e *Escherichia coli* em todas as amostras de água superficial analisadas nas campanhas de 2023 e 2024, indicando que a utilização direta dessas águas para consumo humano, sem tratamento adequado, representa um risco à população ribeirinha.

No contexto escolar, os impactos dessas enfermidades tornam-se ainda mais significativos. A recorrência de doenças associadas ao consumo de água contaminada pode comprometer a frequência dos estudantes, ocasionando faltas recorrentes, prejuízos ao processo de aprendizagem e, em situações de maior vulnerabilidade, favorecendo a evasão escolar. Além disso, os efeitos desses agravos repercutem sobre a dinâmica escolar, dificultando a continuidade das atividades pedagógicas e comprometendo a qualidade do ensino ofertado. Nesse cenário, garantir o acesso à água potável e a condições adequadas de saneamento representa não apenas uma medida de promoção da saúde, mas também um fator essencial para assegurar o desenvolvimento educacional e a permanência dos estudantes na escola (WHO, 2023; Albuquerque; Cerqueira; Batista, 2021).

Além disso, a qualidade da água utilizada na escola influencia diretamente a preparação da merenda escolar, a higienização de utensílios, o consumo direto pelos estudantes e até mesmo as práticas de recreação, especialmente em escolas situadas às margens de rios, onde a água faz parte do cotidiano e das interações sociais. A ausência de água potável segura nesses espaços pode representar não apenas um risco sanitário, mas também um fator limitante para

o desenvolvimento pleno das atividades educativas e para a promoção de ambientes escolares saudáveis.

Mesmo quando não há aplicação direta de instrumentos como entrevistas ou questionários, a análise documental - a exemplo de registros escolares, livros de ocorrência e históricos de frequência - configura-se como uma estratégia relevante para identificar padrões de ausência relacionados a problemas de saúde, bem como para compreender de que forma a questão hídrica se manifesta no cotidiano escolar. Essa abordagem permite estabelecer conexões entre saúde, educação e condições ambientais, fortalecendo a compreensão do problema de forma contextualizada.

Nesse sentido, ações educativas voltadas à promoção do uso consciente da água, à redução do desperdício e à adoção de métodos simples e de baixo custo para sua purificação assumem papel estratégico. A construção de filtros artesanais, associada a práticas pedagógicas contextualizadas, contribui não apenas para a melhoria das condições de saúde, mas também para o fortalecimento da educação ambiental crítica, estimulando o protagonismo estudantil, a participação comunitária e a valorização dos saberes locais (Leff, 2022; Dagnino, 2004).

Assim, o enfrentamento das doenças de veiculação hídrica em populações ribeirinhas demanda uma abordagem integrada, que articule políticas públicas, educação sanitária, tecnologias sociais e práticas pedagógicas comprometidas com a realidade amazônica. Ao incorporar essas dimensões ao contexto escolar, amplia-se o potencial transformador da educação como instrumento de promoção da saúde, da cidadania e da justiça ambiental.

3.3 Geração de resíduo do caroço de açaí e seu uso na filtração de água fluvial

A produção e o consumo do açaí constituem uma das cadeias socioeconômicas mais relevantes da região Norte do Brasil, especialmente na Região Metropolitana de Belém - RMB, onde o fruto possui forte valor cultural, alimentar e econômico. Entretanto, o beneficiamento da polpa gera um volume expressivo de resíduo sólido, representado pelo caroço. Estudos indicam que entre 80% e 85% do peso total do fruto corresponde ao caroço, sendo apenas cerca de 15% destinado ao consumo como polpa (Dalton *et al.*, 2010; Nascimento, 2008).

Considerando que aproximadamente 2,5 kg de fruto são necessários para a produção de 1 litro de açaí, estima-se a geração de cerca de 2,1 kg de caroço por litro produzido (Cordeiro, 2021). Na Região Metropolitana de Belém, estima-se que o consumo de açaí ultrapasse 500 mil litros por dia. Como consequência dessa elevada demanda, a geração de resíduos provenientes do beneficiamento do fruto assume proporções expressivas. Em Belém,

estimativas da Secretaria Municipal de Saneamento indicavam a produção de aproximadamente 800 toneladas diárias de resíduos de caroço de açaí, evidenciando a necessidade de alternativas para seu aproveitamento e destinação ambientalmente adequada (Cruz, 2022). A grande parte desse material é descartada de forma inadequada, contribuindo para problemas ambientais e sanitários, sobretudo em áreas urbanas periféricas e comunidades ribeirinhas com deficiência no manejo de resíduos sólidos. A figura 4 apresenta um recorte jornalístico publicado em 2022, que evidencia essa problemática e demonstra que o descarte inadequado do caroço de açaí constitui uma questão recorrente, persistente ao longo dos anos.

Figura 4 - Acúmulo e descarte inadequado de caroços de açaí em área urbana de Belém (PA), evidenciando falhas na gestão de resíduos sólidos e o potencial impacto ambiental associado à ausência de coleta regular



Fonte: Batedores ... (2024).

Diante desse cenário, diversos autores apontam a necessidade de estratégias que promovam o reaproveitamento do caroço de açaí, associando redução de impactos ambientais, geração de renda e fortalecimento da educação ambiental (Nascimento, 2008; Dalton *et al.*, 2010). Nesse sentido, o caroço tem sido reconhecido como uma matéria-prima multifuncional, com potencial de aplicação em diferentes setores produtivos, o que evidencia sua relevância no contexto da economia circular amazônica.

Pesquisas têm demonstrado, por exemplo, o uso do caroço de açaí na produção de biocompósitos, atuando como reforço em matrizes poliméricas e apresentando-se como alternativa sustentável ao plástico convencional (Silva; Monteiro, 2019). Esse tipo de aplicação já vem sendo observado em iniciativas locais na região amazônica, especialmente em projetos voltados à inovação sustentável e ao aproveitamento de resíduos agroindustriais.

Outra possibilidade amplamente documentada refere-se à utilização do caroço na produção de adubo orgânico. Quando triturado e submetido a processos de compostagem, o material contribui para a melhoria da qualidade do solo, fornecendo nutrientes importantes como cálcio, magnésio e potássio, além de favorecer práticas agrícolas de baixo impacto ambiental (Ferreira; Santos; Monteiro, 2018). Esse uso é recorrente em comunidades rurais e ribeirinhas que adotam sistemas produtivos tradicionais aliados a técnicas agroecológicas.

O aproveitamento do caroço de açaí também se estende à alimentação animal. Arruda *et al.* (2018) demonstraram que o farelo produzido a partir do caroço de açaí pode ser incorporado em até 10% à dieta de frangos de corte de crescimento lento, durante a fase inicial, sem comprometer o desempenho das aves. Nesse nível de inclusão, o uso do farelo apresentou viabilidade econômica equivalente à dieta controle, configurando uma alternativa para o aproveitamento desse resíduo agroindustrial e para a redução de seus impactos ambientais.

Na indústria cosmética, o caroço de açaí também apresenta potencial de aproveitamento como matéria-prima. As fibras que envolvem o caroço podem ser incorporadas a formulações de sabonetes, atuando como agente esfoliante natural, enquanto extratos bioativos obtidos desse resíduo vêm sendo empregados no desenvolvimento de produtos para cuidados com a pele. Essas aplicações ampliam as possibilidades de valorização do caroço de açaí e contribuem para a diversificação de seu aproveitamento em produtos de maior valor agregado (Fioravanti, 2023).

Estudos têm demonstrado o potencial de aproveitamento da semente de açaí na formulação de bebidas à base de café, por meio da torrefação e moagem desse resíduo agroindustrial. Fernandes *et al.* (2011) verificaram que a adição de sementes de açaí em diferentes proporções é tecnicamente viável, sendo a formulação contendo 25% de semente de açaí e 75% de café a que apresentou maior aceitação sensorial entre os avaliadores. Esses resultados evidenciam o potencial desse resíduo como matéria-prima para o desenvolvimento de novos produtos e para a agregação de valor à cadeia produtiva do açaí (Fernandes *et al.*, 2011).

Embora essas múltiplas aplicações evidenciem o potencial do caroço de açaí como recurso sustentável, destaca-se, no contexto desta pesquisa, sua utilização na produção de carvão ativado voltado ao tratamento de água. Este produto é obtido por meio de processos de carbonização e ativação física ou química, que ampliam significativamente sua porosidade e área superficial, conferindo elevada capacidade de adsorção (Pereira *et al.*, 2022; Moraes *et al.*, 2023).

Estudos desenvolvidos na Amazônia demonstram que o carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí apresenta desempenho semelhante — e, em alguns casos, superior — ao carvão ativado comercial, especialmente na remoção de cor, turbidez, compostos orgânicos e metais presentes na água (Pereira *et al.*, 2022; Moraes *et al.*, 2023). Esse aspecto torna o material particularmente adequado para aplicações em filtros artesanais de baixo custo.

Nesse contexto, o carvão ativado de caroço de açaí tem sido incorporado em sistemas de filtração doméstica compostos por camadas de algodão, areia, cascalho e carvão, mostrando-se eficiente no tratamento de água fluvial em regiões onde o acesso ao abastecimento público é limitado ou inexistente, como ocorre em diversas comunidades ribeirinhas do estado do Pará (Silva *et al.*, 2023; Sousa, 2019).

Estudos sobre o uso do caroço de açaí como precursor de carvão ativado indicam seu potencial para aplicação em sistemas simplificados de tratamento de água. Sousa (2019), ao produzir e caracterizar carvões ativados de caroço de açaí com NaOH e ZnCl₂, verificou sua aplicabilidade como leito filtrante no tratamento de água de manancial superficial, com melhoria dos parâmetros de cor aparente e turbidez. De modo semelhante, Silva *et al.* (2023) demonstraram que filtros de baixo custo com carvão ativado produzido a partir do resíduo de caroço de açaí apresentaram melhoria da turbidez, redução da dureza, elevação do pH e remoção parcial de coliformes, indicando o potencial dessa tecnologia quando associada a etapas complementares de desinfecção.

Com base nesses estudos, observa-se que a construção do filtro em escolas ribeirinhas é tecnicamente possível, especialmente porque os materiais necessários — como garrafas PET reutilizadas, areia, cascalho, algodão ou perlon e caroço de açaí — são acessíveis ou amplamente disponíveis nas próprias comunidades amazônicas. Essa característica reforça o potencial da proposta como tecnologia social de baixo custo, adaptada à realidade local e passível de utilização em atividades educativas.

Do ponto de vista pedagógico, a construção e a utilização desses filtros em escolas ribeirinhas configuram-se como uma estratégia educativa contextualizada, favorecendo atividades experimentais de caráter investigativo e interdisciplinar. Essa abordagem contribui para o protagonismo estudantil, a valorização dos saberes tradicionais e o fortalecimento da educação ambiental crítica, alinhada à realidade amazônica (Jacobi, 2003; Loureiro, 2004; Dagnino, 2004). Essa dimensão pedagógica é destacada no produto educacional desenvolvido nesta pesquisa, na forma de um caderno que apresenta a construção e a utilização do sistema filtrante articuladas a atividades e reflexões sobre qualidade da água, reaproveitamento do

caroço de açaí, sustentabilidade e tecnologia social, possibilitando sua utilização como recurso de apoio ao ensino de Ciências Ambientais em contextos escolares ribeirinhos.

Dessa forma, o aproveitamento do caroço de açaí como matéria-prima para filtros de tratamento de água fluvial ultrapassa a dimensão técnica, consolidando-se como uma estratégia que integra educação, tecnologia social e justiça ambiental. Mais do que um resíduo, o caroço passa a ser compreendido como recurso pedagógico e solução local para o enfrentamento de desafios sanitários e ambientais em territórios ribeirinhos, tema que será aprofundado na subseção seguinte (Pereira *et al.*, 2022; Arruda; Berté, 2023).

3.4 Carvão, carvão ativado e carvão ativado a partir do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*)

O carvão é um material obtido pela carbonização de materiais orgânicos em condições de suprimento limitado de oxigênio, sendo amplamente utilizado como fonte de energia e matéria-prima em diferentes setores produtivos. Entretanto, suas propriedades adsorptivas são relativamente limitadas quando comparadas às do carvão ativado, material caracterizado por elevada área superficial, estrutura altamente porosa e grande capacidade de adsorção, obtido a partir da ativação física ou química de materiais carbonizados (Marsh; Rodríguez-Reinoso, 2006; Ahmedna; Marshall; Rao, 2000). Essa ativação promove a abertura de micro e mesoporos, potencializando sua capacidade de retenção de partículas, metais pesados, compostos orgânicos e agentes patogênicos, o que o torna extremamente eficaz em processos de purificação de líquidos e gases (Moraes *et al.*, 2023).

O carvão ativado é considerado uma das tecnologias mais eficientes e de baixo custo no tratamento de água, sendo utilizado em larga escala em sistemas industriais e também em filtros domésticos. Sua eficácia se deve à alta capacidade de adsorção de contaminantes, como pesticidas, substâncias orgânicas, cor, odor e gosto da água (Santos; Pereira, 2021). A qualidade e eficiência do carvão ativado estão diretamente relacionadas à matéria-prima utilizada e às condições do processo de ativação, como temperatura, atmosfera e tipo de agente ativante (Pereira *et al.*, 2022).

Nos últimos anos, o caroço de açaí, abundante na região Amazônica e um dos principais resíduos sólidos da indústria agroextrativista local, tem ganhado destaque como matéria-prima alternativa e sustentável para a produção de carvão ativado. Estima-se que, para cada litro de polpa de açaí produzido, cerca de 500g a 600g de caroço é descartado, o que representa um passivo ambiental significativo (Oliveira, 2022).

A transformação desse resíduo em carvão ativado representa uma oportunidade concreta de agregar valor a um rejeito agroindustrial, ao mesmo tempo em que contribui para o desenvolvimento de tecnologias limpas e adaptadas ao contexto amazônico. Estudos indicam que o carvão ativado obtido a partir do caroço de açaí apresenta alta porosidade, boa estabilidade térmica e excelente desempenho na remoção de turbidez, cor, matéria orgânica e até mesmo coliformes da água (Silva *et al.*, 2023; Moraes *et al.*, 2023). Tais características o tornam uma alternativa promissora para uso em filtros artesanais em comunidades ribeirinhas.

Além da eficiência técnica, o uso do carvão ativado do caroço de açaí em filtros caseiros contribui para a educação ambiental, a valorização dos saberes tradicionais, e para o fortalecimento da economia circular, uma vez que transforma um resíduo abundante em solução tecnológica. Essa abordagem reforça o protagonismo local na busca por soluções sustentáveis e acessíveis para problemas ambientais e sanitários historicamente negligenciados (Arruda; Berté, 2023).

3.5 Mecanismos de purificação: o papel da adsorção e absorção na filtragem de água fluvial

A purificação da água é um processo essencial para garantir a potabilidade e a segurança sanitária, especialmente em contextos de vulnerabilidade socioambiental, como nas comunidades ribeirinhas da Amazônia. Dentre os diversos mecanismos utilizados na filtragem da água, destacam-se a adsorção e a absorção, que desempenham papéis fundamentais na remoção de contaminantes físicos, químicos e biológicos.

A adsorção é um fenômeno de superfície no qual moléculas, íons ou outras espécies presentes em um meio líquido ou gasoso se acumulam na interface de um material sólido, denominado adsorvente. Diferentemente da absorção, em que uma substância penetra no interior do material, na adsorção ocorre uma concentração preferencial das espécies na região interfacial. De acordo com a natureza das interações estabelecidas entre a substância retida, denominada adsorvato, e a superfície do adsorvente, o processo pode ocorrer predominantemente por mecanismos físicos ou químicos. Na adsorção física (fisissorção), predominam interações intermoleculares de menor intensidade, como as forças de Van der Waals, enquanto na adsorção química (quimissorção) ocorre a formação de ligações químicas entre o adsorvato e a superfície do material (Iupac, 2025). Em materiais porosos, como o carvão ativado, a elevada superfície interna disponível favorece o contato entre o adsorvente e as

substâncias presentes na água, tornando a adsorção um processo relevante para a remoção de diferentes contaminantes em sistemas de tratamento.

A absorção, embora frequentemente confundida com a adsorção, corresponde a um fenômeno distinto. Enquanto na adsorção ocorre o acúmulo de uma espécie na região interfacial entre duas fases, na absorção a substância é incorporada ao volume da fase absorvente. Dessa forma, a principal diferença entre os processos está no local em que a substância é retida: predominantemente na interface, no caso da adsorção, ou distribuída no volume do material, no caso da absorção (Iupac, 2025). Em sistemas que utilizam carvão ativado, a adsorção assume especial relevância devido às características superficiais e à estrutura porosa desse material, que favorecem a interação com diferentes substâncias presentes no meio aquoso.

O carvão ativado, especialmente aquele produzido a partir do caroço de açaí, destaca-se por possuir uma estrutura altamente porosa e uma área superficial elevada, que favorecem a adsorção de substâncias indesejáveis presentes na água. Estudos demonstram que o carvão ativado oriundo do caroço de açaí apresenta excelente desempenho na adsorção de coliformes, turbidez e compostos orgânicos, o que o torna uma alternativa local, sustentável e de baixo custo para comunidades ribeirinhas (Moraes *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2022).

A abordagem dos fenômenos de adsorção e absorção por meio de atividades experimentais pode favorecer a compreensão de conceitos científicos ao aproximar conteúdos teóricos de situações observáveis pelos estudantes. Quando articulada às experiências e às questões ambientais presentes em seu cotidiano, essa abordagem também pode contribuir para uma aprendizagem mais significativa e para o desenvolvimento de uma compreensão crítica acerca das relações entre ciência, ambiente e sociedade (Lopes, 2022).

Dessa forma, os mecanismos de adsorção e absorção não apenas viabilizam a melhoria da qualidade da água em regiões isoladas, mas também se tornam ferramentas educativas poderosas no ensino de Ciências, ao evidenciar como princípios científicos podem ser aplicados na resolução de problemas reais e urgentes no contexto amazônico.

3.6 Filtro de purificação da água fluvial

A filtração é uma das etapas mais fundamentais no tratamento da água, responsável pela remoção de partículas em suspensão, matéria orgânica, contaminantes e microrganismos. Em contextos em que o acesso à água tratada é limitado, o desenvolvimento de soluções acessíveis para a purificação da água fluvial torna-se essencial para garantir a saúde pública e

a qualidade de vida. Embora a água dos rios seja abundantemente disponível na Região Norte do Brasil, geralmente apresenta turbidez elevada, presença de sedimentos, matéria orgânica e agentes patogênicos, tornando-a imprópria para o consumo humano direto (Souza; Lima, 2021). O uso doméstico dessa água, sem qualquer processo de purificação, está associado à ocorrência de doenças de veiculação hídrica, como hepatite A, cólera e infecções intestinais (Organização Mundial da Saúde, 2023).

Nesse contexto, a construção de filtros de baixo custo a partir de materiais acessíveis e locais - como o caroço de açaí transformado em carvão ativado - representa uma tecnologia social adaptada ao território amazônico. O carvão ativado é amplamente reconhecido por sua capacidade de adsorção, sendo eficaz na remoção de cor, turbidez, sabores, odores e compostos orgânicos da água (Moraes *et al.*, 2023; Pereira *et al.*, 2022). Estudos desenvolvidos por Silva *et al.* (2023) demonstraram que o carvão ativado produzido com caroço de açaí apresenta resultados promissores em sistemas de filtração artesanal, com excelente desempenho em testes laboratoriais. Além disso, o reaproveitamento desse resíduo abundante contribui para a economia circular e para a redução de impactos ambientais.

A montagem de filtros com camadas de cascalho, areia, carvão ativado e tecidos filtrantes, como algodão ou perlon, permite a criação de uma barreira física e química eficaz, adaptável ao uso escolar e comunitário. Essa técnica tem sido explorada tanto como alternativa de tratamento doméstico quanto como recurso didático no ensino de ciências, proporcionando uma oportunidade prática e interdisciplinar para que os estudantes compreendam os fundamentos do tratamento simplificado da água por meio da observação e experimentação (Santos; Pereira, 2021).

No sistema filtrante desenvolvido nesta pesquisa, cada material desempenha uma função específica durante o processo de tratamento da água. A combinação dessas camadas permite a atuação simultânea de mecanismos físicos e físico-químicos responsáveis pela retenção de partículas, adsorção de contaminantes e estabilização de alguns parâmetros de qualidade da água. As funções de cada componente são apresentadas no tabela1.

Tabela 1 – Materiais utilizados na confecção do filtro e suas respectivas funções

Material	Função no sistema filtrante	Referência
Garrafa de PET reutilizada	Estrutura física do filtro, permitindo a disposição das camadas filtrantes em fluxo descendente.	Elaborado pelo autor.
Cascalho	Retenção inicial de partículas de maior dimensão, distribuição uniforme do fluxo e suporte às camadas filtrantes superiores.	Di Bernardo e Dantas (2005).
Areia	Remoção de sólidos suspensos e partículas finas por mecanismos de retenção física e peneiramento, contribuindo para a redução da turbidez.	Di Bernardo e Dantas (2005).
Algodão ou manta de poliéster (perlon)	Barreira mecânica complementar responsável pela retenção de partículas finas e pela contenção do material filtrante.	Di Bernardo e Dantas (2005).
Carvão ativado de caroço de açaí	Meio adsorvente responsável pela remoção de compostos orgânicos, redução de cor, odor e sabor, além da adsorção de parte das substâncias químicas dissolvidas presentes na água.	Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006); Crittenden et al. (2012).
Fragmentos de calcário	Contribuem para a correção da acidez da água por meio da dissolução gradual de carbonatos, favorecendo a elevação do pH e da alcalinidade.	Di Bernardo e Dantas (2005).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Di Bernardo e Dantas (2005), Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006) e Crittenden et al. (2012).

Embora cada material apresente uma função predominante, a eficiência do sistema filtrante resulta da atuação integrada das diferentes camadas. Nesse processo, os mecanismos de retenção física promovidos pelo cascalho, areia e manta filtrante atuam de forma complementar aos processos de adsorção proporcionados pelo carvão ativado e à correção da acidez promovida pelos fragmentos de calcário. A combinação desses materiais constitui a base do sistema simplificado de tratamento de água proposto nesta pesquisa, cuja eficiência foi avaliada por meio de ensaios físico-químicos e microbiológicos descritos nos capítulos subsequentes (Di Bernardo; Dantas, 2005; Marsh; Rodríguez-Reinoso, 2006; Crittenden *et al*, 2012).

Dentre esses materiais, destaca-se o carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí, um resíduo abundante na região Norte do Brasil. Pesquisas recentes demonstram que o carvão ativado obtido desse resíduo apresenta alta eficiência na remoção de cor, turbidez e compostos orgânicos, sendo uma alternativa sustentável e regionalmente adaptada para processos de filtração (Pereira *et al.*, 2022; Moraes *et al.*, 2023). Além de ser uma solução técnica viável, a utilização de materiais recicláveis reforça o conceito de economia circular e valoriza o reaproveitamento de resíduos sólidos, promovendo a educação ambiental e científica de forma integrada.

Dessa forma, o processo de construção dos filtros no ambiente escolar permite que os alunos desenvolvam noções de planejamento, teste de hipóteses, análise de resultados e

comparação entre diferentes combinações de materiais, fortalecendo a aprendizagem baseada em problemas (Lima; Costa, 2022). Assim, a atividade prática de filtragem torna-se uma ferramenta eficaz para o ensino de conteúdos científicos, aliando teoria e prática, e contribuindo para a formação de cidadãos críticos, criativos e comprometidos com a sustentabilidade.

3.7 Tecnologias sociais e justiça ambiental

As tecnologias sociais são compreendidas como produtos, técnicas ou metodologias reaplicáveis, desenvolvidas em interação com a comunidade e apropriadas por seus usuários, capazes de promover soluções efetivas para problemas sociais e contribuir para a melhoria das condições de vida. Diferentemente das tecnologias convencionais, orientadas predominantemente por interesses de mercado, as tecnologias sociais buscam responder às necessidades locais por meio da participação comunitária, da valorização dos conhecimentos populares e da construção coletiva de soluções sustentáveis (Dagnino, 2004; Fundação Banco do Brasil, 2013).

Enfrentar os desafios socioambientais na Amazônia demanda não apenas soluções técnicas, mas também o fortalecimento de princípios éticos, políticos e culturais que reconheçam a diversidade dos territórios e dos modos de vida existentes na região. Mais do que responder às necessidades materiais das populações amazônicas, esse processo pressupõe o reconhecimento de seus direitos, de seus conhecimentos tradicionais e de sua capacidade de participação na construção de soluções sustentáveis. Nesse contexto, práticas educativas que articulam saberes indígenas, conhecimentos científicos e tecnologias sociais constituem importantes estratégias para a promoção da justiça socioambiental, da valorização da diversidade cultural e do fortalecimento da autonomia das comunidades. Nessa perspectiva, esta pesquisa demonstra que a integração entre educação ambiental, tecnologias sociais e valorização dos saberes locais pode contribuir para a construção de alternativas sustentáveis voltadas à melhoria da qualidade de vida e ao uso responsável dos recursos naturais (Leff, 2022; Carvalho, 2020; Dagnino, 2004).

A justiça ambiental, por sua vez, refere-se ao conjunto de princípios e práticas voltados à distribuição equitativa dos benefícios e dos impactos ambientais entre os diferentes grupos sociais, de modo que populações socialmente vulneráveis não sejam desproporcionalmente submetidas aos efeitos negativos decorrentes da poluição, da degradação ambiental ou de atividades econômicas. Essa perspectiva compreende, ainda, o acesso justo aos recursos

ambientais, às informações relevantes e aos processos de tomada de decisão, reconhecendo a participação social como elemento fundamental para o enfrentamento das desigualdades socioambientais (Acselrad; Mello; Bezerra, 2009; Acselrad, 2010).

Nesse contexto, as tecnologias sociais assumem papel fundamental na promoção da justiça ambiental, pois permitem que comunidades vulneráveis tenham acesso a soluções sustentáveis que atendam suas necessidades específicas, reduzindo desigualdades socioambientais. Além disso, essas tecnologias favorecem a democratização do conhecimento científico e tecnológico, aproximando-o das realidades locais e promovendo a participação social (Dagnino, 2004).

As Tecnologias Sociais podem assumir diferentes formas, de acordo com as necessidades e as características de cada território. No meio rural, a Produção Agroecológica Integrada e Sustentável (PAIS) constitui um exemplo dessa aplicação ao articular produção de alimentos, conhecimentos dos agricultores e práticas agroecológicas adaptadas às condições locais (Silva *et al.*, 2015). Na gestão de resíduos sólidos, experiências com coleta seletiva mostram que a participação da população interfere diretamente no funcionamento desses programas e na separação dos materiais destinados à reciclagem (Corrêa *et al.*, 2015).

Essas experiências também podem ser analisadas sob a perspectiva da justiça ambiental, sobretudo quando envolvem grupos sociais com acesso desigual a recursos, serviços e condições adequadas de proteção ambiental. Nesse debate, a questão ambiental não se limita à conservação dos recursos naturais, mas inclui a forma desigual como riscos, danos e benefícios ambientais são distribuídos entre diferentes grupos sociais (Acselrad; Mello; Bezerra, 2009). A aproximação entre Tecnologia Social e Justiça Ambiental ocorre, portanto, quando as soluções propostas consideram as condições do território, os conhecimentos das comunidades e sua participação nas decisões que interferem diretamente em seus modos de vida.

3.8 A Base Nacional Comum Curricular e o ensino de Ciências Ambientais na Educação Básica

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) é um documento normativo que define o conjunto de aprendizagens essenciais a serem desenvolvidas na Educação Básica, orientando a elaboração dos currículos escolares em todo o território nacional. No componente curricular de Ciências da Natureza, a BNCC destaca o ensino de ciências como instrumento para a leitura

crítica da realidade, a formação cidadã e o desenvolvimento do pensamento investigativo, enfatizando a relação entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente (Brasil, 2018).

De acordo com Vargas (2003), a compreensão da natureza não pode ser reduzida à ideia de um domínio separado da sociedade, uma vez que os sentidos atribuídos a ela são construídos historicamente e estão relacionados às diferentes formas de interação entre sociedade e ambiente. Nessa perspectiva, a água também pode ser compreendida para além de sua dimensão estritamente natural, pois as relações estabelecidas com esse elemento são influenciadas pelos contextos sociais e pelas formas de apropriação e uso dos recursos naturais. Essa compreensão amplia a discussão ambiental ao reconhecer que os problemas relacionados à natureza também envolvem práticas, valores e relações construídas socialmente.

Freitas e Freitas (2014), ao discutirem a crise socioambiental como uma crise civilizatória, defendem uma Educação Ambiental Transformadora que não se limite às mudanças de comportamento individual, mas considere as questões sociais e as estruturas que produzem os problemas ambientais. Nessa perspectiva, a Educação Ambiental assume uma dimensão crítica, vinculada à compreensão das relações entre sociedade e ambiente e à necessidade de transformação das condições que sustentam a atual crise socioambiental.

No plano ideal, conforme orienta a BNCC, o ensino de Ciências da Natureza deve ocorrer de forma interdisciplinar, contextualizada e investigativa, possibilitando aos estudantes compreender fenômenos naturais, analisar problemas ambientais locais e propor soluções sustentáveis. A alfabetização hídrica, nesse contexto, pressupõe não apenas o conhecimento sobre o ciclo da água, mas também a compreensão de sua qualidade, usos, riscos à saúde e formas de preservação, articulando ciência, território e cidadania (Brasil, 2018). Entretanto, ao se analisar a realidade das escolas ribeirinhas da Amazônia, observa-se uma distância significativa entre o que a BNCC propõe e o que efetivamente se concretiza no cotidiano escolar. Entre os principais desafios para a implementação de uma Educação Ambiental efetiva em escolas ribeirinhas destacam-se as limitações de infraestrutura, a insuficiência de recursos humanos e materiais, a sobrecarga docente e a necessidade de formação específica, condições que podem restringir o desenvolvimento de práticas educativas contextualizadas e contínuas nesses territórios (Damascena; Costa; Pereira, 2025).

Além disso, embora a BNCC enfatize o protagonismo estudantil e o ensino por investigação, o desenvolvimento de práticas de Educação Ambiental em escolas ribeirinhas ainda enfrenta limitações relacionadas à infraestrutura, à disponibilidade de recursos humanos e materiais e à formação específica dos professores para atuação nesses contextos (Damascena; Costa; Pereira, 2026). No que se refere aos recursos hídricos, a formação docente também

constitui um desafio para a inserção da temática da água nas práticas escolares, podendo limitar o desenvolvimento de abordagens que ultrapassem sua presença cotidiana e favoreçam a discussão de aspectos relacionados à qualidade da água, à contaminação e às implicações socioambientais associadas ao seu uso (Marto; Palmieri, 2024).

Nesse cenário, a proposta desta pesquisa busca reduzir a distância entre o ideal normativo da BNCC e a realidade vivenciada na escola ribeirinha, ao utilizar a construção de filtros artesanais para purificação da água fluvial como recurso pedagógico. Essa prática permite trabalhar conteúdos científicos previstos no currículo, ao mesmo tempo em que dialoga com problemas concretos do território, promovendo a alfabetização hídrica de forma contextualizada e significativa.

Ao propor atividades práticas, investigativas e interdisciplinares, a pesquisa contribui para o desenvolvimento de competências previstas na BNCC, como a compreensão da água enquanto recurso vital, a análise de problemas ambientais locais, o uso consciente de materiais recicláveis e a valorização dos saberes tradicionais. Dessa forma, a educação ambiental deixa de ser apenas um conteúdo transversal abstrato e passa a integrar o cotidiano escolar como prática transformadora.

Assim, a construção de filtros com carvão ativado de caroço de açaí configura-se como uma estratégia pedagógica alinhada aos princípios da educação ambiental crítica e da BNCC, ao possibilitar que os estudantes reconheçam a ciência como ferramenta para a resolução de problemas reais de seu território. Apesar dos desafios estruturais e pedagógicos existentes, iniciativas dessa natureza demonstram que é possível avançar na efetivação da alfabetização hídrica em escolas ribeirinhas, aproximando o currículo prescrito da realidade vivida pela comunidade escolar.

3.9 Ensino de Ciências Ambientais em escolas ribeirinhas: educação contextualizada, saberes tradicionais e protagonismo estudantil

O ensino de Ciências Ambientais, quando contextualizado e conectado à realidade sociocultural dos estudantes, especialmente em regiões como a Amazônia, assume papel fundamental na formação de sujeitos críticos, investigativos e comprometidos com a sustentabilidade. Em territórios ribeirinhos do Pará, onde a vida cotidiana está profundamente ligada aos ciclos naturais e à dependência dos recursos hídricos, a escola precisa assumir uma postura que vá além da simples transmissão de conteúdos, atuando como espaço de construção

de conhecimentos capazes de contribuir para a compreensão e enfrentamento dos desafios socioambientais presentes no território (Jacobi, 2022; Leff, 2022).

A educação científica, por sua natureza formativa, deve favorecer a articulação entre teoria e prática, possibilitando que os estudantes compreendam os fenômenos ambientais a partir de situações concretas vivenciadas em seu cotidiano. A integração entre ciência escolar, saberes tradicionais e tecnologias sociais representa uma estratégia importante para valorizar diferentes formas de conhecimento e ampliar a compreensão sobre as relações entre sociedade e natureza (Leff, 2022; Jacobi, 2022; Oliveira; Melo, 2022).

Gramsci (2019) destaca que os processos educativos desempenham papel fundamental na formação de sujeitos capazes de interpretar criticamente a realidade e atuar na sua transformação. Sob essa perspectiva, a valorização dos saberes tradicionais e a articulação entre teoria e prática constituem elementos importantes para a construção de uma educação contextualizada e socialmente comprometida. Em comunidades ribeirinhas amazônicas, essa abordagem favorece o diálogo entre conhecimentos científicos e experiências locais, ampliando as possibilidades de compreensão dos problemas socioambientais presentes no território.

Mais do que uma abordagem conteudista, o ensino de Ciências Ambientais deve promover a aprendizagem significativa, na qual o aluno é protagonista do processo, sendo incentivado a relacionar ciência, meio ambiente e vivência local. Essa proposta se alinha à perspectiva da educação ambiental crítica, que, segundo Leff (2022), busca integrar saberes científicos e práticas sociais transformadoras, promovendo a cidadania, a sustentabilidade e a responsabilidade socioambiental.

Tal concepção dialoga diretamente com o conceito de tecnologia social, entendido como um conjunto de saberes e práticas construídas de forma participativa e voltadas à transformação de realidades marcadas por desigualdades socioambientais. Ao articular conhecimentos científicos com materiais e contextos cotidianos, as tecnologias sociais favorecem soluções acessíveis, sustentáveis e adaptadas às necessidades locais, fortalecendo processos educativos emancipatórios e colaborativos (Dagnino, 2004; Arruda; Berté, 2023).

Entre as estratégias capazes de materializar esses princípios destaca-se a adoção de práticas investigativas em sala de aula, como a construção de filtros de água utilizando materiais acessíveis. Além de favorecer a compreensão de conceitos relacionados à qualidade da água, filtração, adsorção e sustentabilidade, essas atividades estimulam a observação, a formulação de hipóteses, a experimentação e a análise crítica dos resultados obtidos.

A abordagem investigativa é especialmente eficaz para promover aprendizagens duradouras, pois valoriza a curiosidade e a experimentação. Segundo Carvalho e Gonçalves (2022), ao propor problemas, testar soluções e refletir sobre os resultados, os estudantes desenvolvem habilidades cognitivas fundamentais à formação científica e cidadã. Essa abordagem está de acordo com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que orienta o ensino de ciências para o desenvolvimento de competências relacionadas à investigação científica, à análise de fenômenos naturais e à proposição de soluções sustentáveis para problemas ambientais e sociais (Brasil, 2018).

A educação ambiental se apresenta, portanto, não apenas como um componente do processo educativo, mas como uma consequência natural do ensino de Ciências Ambientais. À medida que os estudantes se envolvem com os conteúdos e vivências propostas, desenvolvem uma reflexão crítica sobre sua relação com a natureza, os impactos das atividades humanas e a importância da conservação dos recursos naturais, especialmente dos recursos hídricos (Santos; Pereira, 2021).

Além disso, a valorização dos saberes tradicionais constitui elemento indispensável para uma educação verdadeiramente contextualizada. Em comunidades ribeirinhas, o conhecimento sobre o uso da água, os ciclos hidrológicos, os períodos de cheia e vazante e as formas sustentáveis de utilização dos recursos naturais é transmitido entre gerações e representa importante patrimônio cultural. A valorização desses conhecimentos permite estabelecer pontes entre o saber científico e o saber popular, enriquecendo os processos de ensino e aprendizagem (Oliveira; Melo, 2022; Santos, 2019).

Freitas, L. e Freitas, A. (2015) analisam essa realidade como expressão de uma crise socioambiental sistêmica, que não se limita aos impactos ecológicos, mas envolve fatores culturais, econômicos, políticos e epistêmicos. Essa compreensão é compartilhada por Leff (2022), ao defender que os problemas ambientais contemporâneos exigem abordagens integradas capazes de articular conhecimento científico, diversidade cultural e sustentabilidade.

Considerando a realidade das comunidades ribeirinhas, o professor atua como mediador entre diferentes universos de saberes, incentivando o respeito à diversidade cultural e promovendo o protagonismo estudantil. Quando os conteúdos escolares dialogam diretamente com desafios enfrentados pelas comunidades, como o acesso à água de qualidade e a preservação dos recursos hídricos, o processo educativo adquire maior significado, fortalece a identidade local e amplia o engajamento dos estudantes (Lopes; Carvalho, 2023).

A proposta desenvolvida nesta pesquisa insere-se diretamente nessa discussão, uma vez que a construção de filtros de baixo custo utilizando carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí constitui uma estratégia pedagógica compatível com os princípios do ensino contextualizado e investigativo (Carvalho; Gonçalves, 2022; Lopes; Carvalho, 2023). Ao abordar um problema presente no cotidiano das comunidades ribeirinhas, a atividade possibilita a integração entre conceitos científicos, saberes tradicionais e práticas sustentáveis, favorecendo a compreensão dos processos relacionados à qualidade da água e ao uso responsável dos recursos naturais (Leff, 2022; Santos; Pereira, 2021; Oliveira; Melo, 2022). Além disso, a elaboração de uma cartilha educativa amplia o potencial de replicação da proposta, fortalecendo seu caráter de tecnologia social aplicada ao ensino de Ciências Ambientais (Dagnino, 2004; Arruda; Berté, 2023).

Em síntese, o ensino de Ciências Ambientais em territórios amazônicos transcende uma abordagem exclusivamente conceitual, assumindo papel relevante na formação de sujeitos capazes de compreender criticamente as relações entre sociedade, ambiente e qualidade de vida. Conforme Santos e Ferreira (2022), Jacobi (2022) e Leff (2022), esse processo contribui para o fortalecimento da cidadania, da conservação ambiental e da participação social na busca por soluções para os desafios socioambientais presentes nos territórios amazônicos.

4 METODOLOGIA

4.1 Natureza da Pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, exploratória e de abordagem predominantemente qualitativa, com suporte quantitativo obtido por meio das análises físico-químicas e microbiológicas da água. Sua natureza aplicada está relacionada ao desenvolvimento e avaliação de um sistema filtrante de baixo custo utilizando carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*), bem como à elaboração de um produto educacional voltado ao ensino de Ciências Ambientais. Segundo Prodanov e Freitas (2013), pesquisas aplicadas buscam gerar conhecimentos direcionados à solução de problemas específicos.

A abordagem qualitativa fundamenta-se na análise do potencial pedagógico e socioambiental da tecnologia desenvolvida, considerando sua aplicação em contextos amazônicos. Conforme Minayo (2001), a pesquisa qualitativa permite compreender fenômenos em seus aspectos sociais, culturais e ambientais, valorizando o contexto em que estão inseridos.

O caráter exploratório decorre da investigação de uma alternativa tecnológica ainda pouco estudada no contexto educacional amazônico. De acordo com Gil (2008), pesquisas exploratórias visam proporcionar maior familiaridade com determinado problema, contribuindo para seu aprimoramento conceitual e metodológico.

Além disso, foram empregados procedimentos experimentais para a produção e caracterização do carvão ativado e para a avaliação do desempenho do sistema filtrante. A abordagem experimental possibilita estabelecer condições previamente definidas para a observação dos fenômenos investigados e para a análise dos efeitos associados às variáveis consideradas no estudo, contribuindo para a obtenção sistemática de dados e sua posterior interpretação (Marconi; Lakatos, 2021).

4.2 Contexto da Pesquisa

A presente pesquisa foi desenvolvida a partir de uma abordagem experimental voltada à produção, caracterização e avaliação da eficiência do carvão ativado obtido a partir do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*), bem como à construção de um sistema simplificado de filtração para tratamento de água. As atividades envolveram a preparação da biomassa, os processos de ativação química e carbonização, a caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a avaliação da qualidade da água antes e após a filtração.

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Sedimentologia e no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), bem como no Laboratório de Química do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia (CCNT) da Universidade do Estado do Pará (UEPA). As análises físico-químicas e microbiológicas da água foram executadas em laboratório terceirizado devidamente credenciado. Parte da produção do carvão ativado também ocorreu em ambiente aberto, simulando condições simplificadas de obtenção do material.

Paralelamente à etapa experimental, foi elaborada uma cartilha educativa fundamentada nos resultados obtidos, na literatura especializada e na vivência do pesquisador em atividades de ensino, pesquisa e extensão desenvolvidas em comunidades ribeirinhas amazônicas. O material foi concebido como produto educacional de apoio ao ensino de Ciências Ambientais, abordando temas relacionados à qualidade da água, sustentabilidade e tecnologias sociais.

4.3 Metodologia experimental para produção e avaliação da eficiência do carvão ativado de caroço de açaí

A etapa experimental desta pesquisa teve como objetivo produzir carvão ativado a partir do resíduo lignocelulósico do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*) e avaliar sua eficiência como material adsorvente em sistemas simplificados de tratamento de água. A escolha dessa biomassa fundamentou-se em sua ampla disponibilidade na região amazônica, especialmente na Região Metropolitana de Belém, onde o processamento do fruto gera grandes volumes de resíduos orgânicos.

Para a realização dos experimentos foram utilizados cinco materiais distintos: Caroço de Carvão Não Ativado (CNA), Carvão Ativado Artesanal (CAA), Carvão Ativado produzido em Laboratório (CAL) e Carvão Ativado Industrial (CAI), conforme apresentado na figura 5.

O material CIN corresponde ao precursor utilizado nas etapas de produção dos carvões e foi empregado como referência para as análises morfológicas. A amostra CNA foi submetida apenas ao processo de carbonização, sem ativação química. As amostras CAA e CAL foram produzidas a partir do mesmo precursor, diferenciando-se pelas condições de ativação e carbonização. A amostra CAI corresponde a um carvão ativado comercial utilizado como material de referência. Após essa definição, as siglas foram adotadas em todas as etapas experimentais, análises e discussões dos resultados.

Espera-se que a comparação entre os diferentes materiais possibilite avaliar a influência dos processos de produção sobre as características morfológicas e o desempenho adsorptivo dos carvões obtidos.

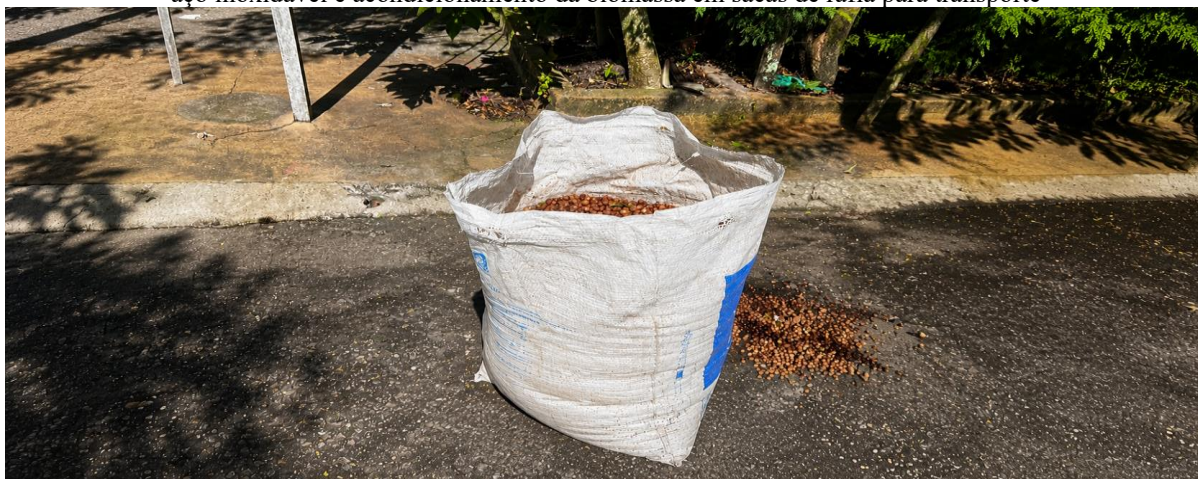
Os procedimentos experimentais foram desenvolvidos em etapas sequenciais, compreendendo a coleta e preparação da biomassa, ativação química, carbonização, caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV), montagem dos sistemas filtrantes e avaliação da qualidade da água antes e após a filtração.

As análises laboratoriais foram realizadas nos Laboratórios de Sedimentologia e de Microanálises do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), no Laboratório de Química do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia (CCNT) da Universidade do Estado do Pará (UEPA) e em laboratório terceirizado responsável pelas análises físico-químicas e microbiológicas da água. Parte da produção do carvão ativado ocorreu em ambiente aberto, com o objetivo de simular condições simplificadas de obtenção do material e avaliar seu potencial de aplicação em contextos comunitários.

4.4.1 Coleta e preparação da biomassa

Os caroços de açaí (*Euterpe Oleracea*) foram coletados em bateadores artesanais localizados no município de Belém, estado do Pará, após o processo de despulpamento do fruto, conforme apresentado na figura 5. Durante a coleta, utilizou-se pá de aço inoxidável para o manuseio da biomassa, que foi acondicionada em sacas de ráfia para transporte. Ao todo, foram coletados aproximadamente 30 kg de material, quantidade suficiente para a execução das etapas experimentais.

Figura 5 - Coleta de caroços de açaí (*Euterpe Oleracea*) em bateadores artesanais de Belém-PA, utilizando pá de aço inoxidável e acondicionamento da biomassa em sacas de ráfia para transporte



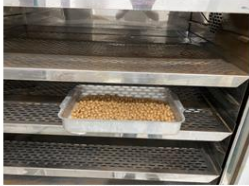
Fonte: Acervo do Autor.

Após a coleta, a biomassa foi lavada em água corrente para remoção de resíduos de polpa e impurezas aderidas à superfície dos caroços, principalmente aquelas provenientes da borra do fruto. Na sequência, o material foi fracionado em três alíquotas de aproximadamente 10 kg cada, destinadas às diferentes condições de preparo adotadas neste estudo.

As frações CAL-01 e CNA-01 foram encaminhadas ao Laboratório de Sedimentologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde permaneceram em estufa modelo EST-4879, a 105 °C, por aproximadamente 24 horas, promovendo a remoção da umidade residual. A secagem em condições controladas permitiu padronizar a biomassa destinada às etapas subsequentes de carbonização e ativação química. Posteriormente, as amostras foram peneiradas em malha de 4,0 mm, procedimento adotado para uniformizar a granulometria e remover resíduos orgânicos remanescentes.

A terceira fração, denominada CAA-01, foi distribuída em bandejas de alumínio e submetida à secagem natural em ambiente arejado e exposto à radiação solar durante três dias consecutivos. Esse procedimento buscou reproduzir uma condição simplificada de preparo da biomassa, compatível com a realidade de comunidades amazônicas que dispõem de infraestrutura limitada, reforçando o potencial de replicação da tecnologia proposta. As principais etapas do preparo das amostras são apresentadas na figura 6, sintetizando os procedimentos de secagem e padronização granulométrica adotados antes dos processos de ativação química e carbonização.

Figura 6 - Etapas de preparação da biomassa: (A) secagem em estufa; (B) peneiramento para padronização granulométrica; e (C) secagem natural ao ar livre para redução da umidade residual

Etapa	Imagem	Descrição
A	 Secagem em estufa	Amostras de caroço de açaí distribuídas em bandeja metálica e colocadas em estufa para remoção da umidade inicial.
B	 Peneiramento	Processo de peneiramento das amostras para padronização granulométrica e remoção de impurezas do material.
C	 Secagem ao ar livre	Material disposto sobre lona em ambiente aberto para secagem natural antes das etapas de carbonização.

4.4.2 Processo de ativação química

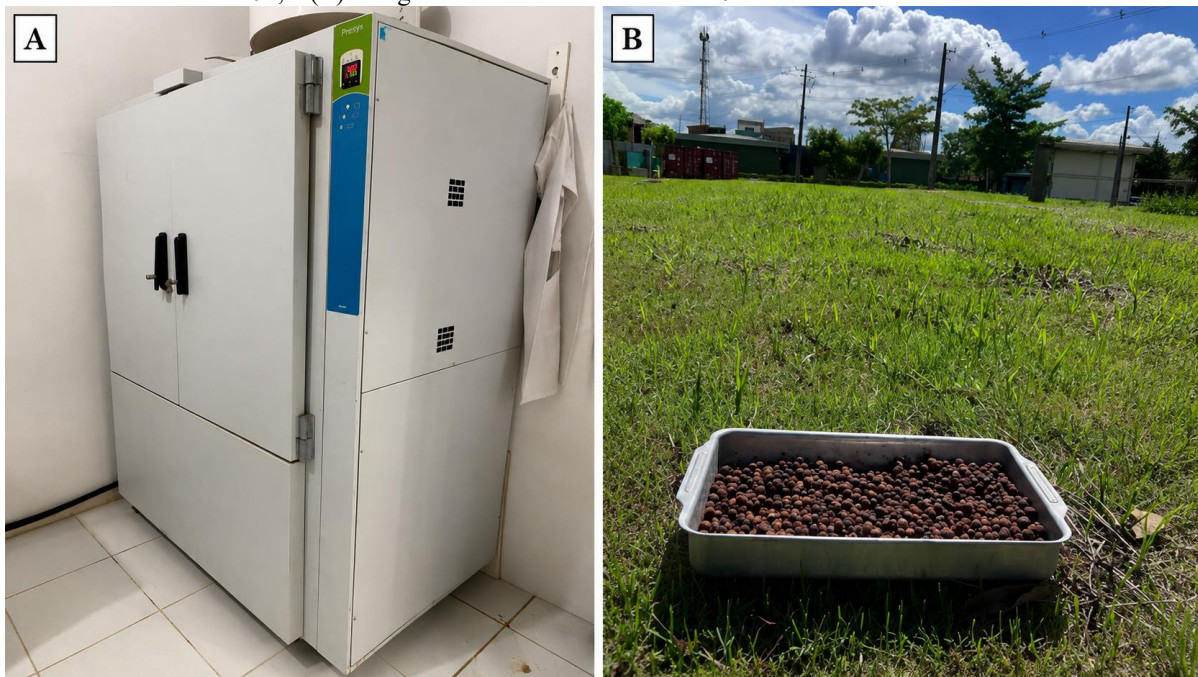
A ativação química constituiu uma das etapas centrais da produção dos carvões ativados utilizados nesta pesquisa, tendo como finalidade promover modificações na estrutura lignocelulósica do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*), favorecendo o desenvolvimento de estruturas porosas e o aumento da área superficial específica do material. Para essa etapa, as amostras CAL-01 e CAA-01 foram submetidas à impregnação em solução de hidróxido de sódio (NaOH) na concentração de 80 g/L, conforme protocolo adaptado de Sousa (2019). A utilização desse agente ativador é amplamente descrita na literatura por favorecer o desenvolvimento de materiais com elevada capacidade adsortiva (Marsh; Rodríguez-Reinoso, 2006; Yang *et al.*, 2019).

Embora fundamentado no protocolo de Sousa (2019), o procedimento experimental recebeu adaptações compatíveis com os objetivos desta pesquisa. Durante o preparo da solução ativadora, empregou-se banho de ultrassom para favorecer a completa dissolução do hidróxido de sódio, promovendo maior homogeneização da solução e reduzindo a formação de precipitados no fundo do recipiente. Essa adaptação buscou assegurar maior uniformidade na impregnação da biomassa, sem alterar os princípios químicos do método originalmente proposto.

As amostras CAL-01 e CAA-01 permaneceram imersas na solução ativadora durante 24 horas, permitindo a difusão do reagente na matriz lignocelulósica do material. Segundo Ahmad *et al.* (2014), essa etapa favorece a formação de estruturas porosas durante o tratamento térmico subsequente, contribuindo para o aumento da área superficial e da capacidade adsorvente do carvão ativado. O carvão ativado industrial (CAI) não foi submetido a esse procedimento, uma vez que seu processo de ativação já havia sido realizado industrialmente, sendo empregado como material de referência para comparação dos resultados.

Concluído o período de impregnação, as amostras foram retiradas da solução e submetidas à secagem. A amostra CAL-01 foi seca em estufa modelo EST-4879, enquanto a amostra CAA-01 permaneceu distribuída em bandejas de alumínio para secagem natural ao ar livre durante 48 horas. Essa etapa teve como finalidade remover o excesso de umidade e favorecer a fixação do agente ativador na biomassa antes do processo de carbonização. As etapas de secagem realizadas após o tratamento químico encontram-se apresentadas na figura 7.

Figura 7 - Etapas de secagem das amostras após a ativação química: (A) secagem em estufa da amostra CAL-01; e (B) secagem natural da amostra CAA-01 em ambiente aberto



Fonte: Acervo do Autor.

As adaptações introduzidas nesta etapa tiveram como propósito adequar o protocolo às condições experimentais da pesquisa, preservando os fundamentos da ativação química descritos na literatura e contribuindo para o desenvolvimento de um processo passível de reprodução em estudos futuros e em tecnologias sociais voltadas ao tratamento simplificado de água.

4.4.3 Processo de carbonização

A carbonização constituiu a etapa responsável pela conversão térmica da biomassa em material carbonáceo, processo indispensável para a produção dos carvões utilizados nesta pesquisa. Nessa etapa, a decomposição térmica dos componentes lignocelulósicos ocorre sob condições de baixa disponibilidade de oxigênio, promovendo a eliminação de compostos voláteis e a formação de uma matriz rica em carbono (Marsh; Rodríguez-Reinoso, 2006).

O procedimento adotado foi baseado no protocolo descrito por Silva *et al.* (2023), com adaptações relacionadas ao sistema de carbonização. Enquanto os autores empregaram tambor metálico reutilizado como reator térmico na produção artesanal, nesta pesquisa optou-se pela utilização de uma panela metálica de grande capacidade aquecida em fogão a lenha. Essa adaptação foi realizada com o propósito de aproximar o método das condições normalmente

encontradas em comunidades ribeirinhas da Amazônia, utilizando utensílios de fácil obtenção e favorecendo a reprodutibilidade da tecnologia proposta.

Para a produção do carvão ativado em laboratório (CAL), as amostras previamente impregnadas foram acondicionadas em recipientes cerâmicos e submetidas à carbonização em mufla modelo MUF-4525, à temperatura de 300 °C durante 3 horas. O tratamento térmico foi realizado em atmosfera com baixa disponibilidade de oxigênio, condição necessária para promover a carbonização da biomassa e preservar a estrutura carbonácea do material.

A produção do carvão ativado artesanal (CAA) foi realizada em panela metálica com tampa, aquecida em fogão a lenha, mantendo-se o aquecimento até a completa carbonização da biomassa. A utilização da tampa teve como finalidade reduzir a entrada de oxigênio durante o processo, favorecendo a conversão térmica do material em condições semelhantes às observadas na carbonização realizada em ambiente laboratorial.

Após o resfriamento à temperatura ambiente, as amostras CAL e CAA foram submetidas à lavagem com água para remoção de resíduos provenientes da ativação química. Em seguida, o material foi novamente seco, triturado e peneirado na fração granulométrica entre 14 e 20 Mesh (0,80–1,40 mm), buscando uniformizar o tamanho das partículas destinadas às etapas subsequentes da pesquisa. As diferentes condições de carbonização empregadas neste estudo são apresentadas na figura 8.

Figura 8 - Sistemas de carbonização utilizados na produção dos carvões ativados: (A) carbonização artesanal em panela metálica aquecida em fogão a lenha; (B) carbonização em mufla modelo MUF-4525



Fonte: Acervo do Autor.

O material obtido ao final dessa etapa foi destinado à caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura e aos ensaios experimentais de filtração descritos nos tópicos subsequentes.

4.4.4 Caracterização morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A caracterização morfológica das amostras foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), técnica que permite a obtenção de imagens com elevada resolução e profundidade de campo, possibilitando a observação de características da superfície dos materiais, como morfologia, textura, irregularidades e estruturas presentes em escala micrométrica e submicrométrica (Goldstein *et al.*, 2018). As análises foram conduzidas no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA).

As imagens foram obtidas em microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo EVO MA-10 (Carl Zeiss AG, Alemanha). Antes das análises, as amostras foram submetidas à metalização com ouro em metalizador Quorum, modelo Q150T-ES, durante aproximadamente 1,5 minuto, formando uma camada metálica com espessura estimada em 15 nm. Esse procedimento foi realizado para aumentar a condutividade elétrica da superfície das amostras e melhorar a qualidade das imagens obtidas.

As análises foram realizadas no modo de elétrons secundários, utilizando voltagem de aceleração de 15 kV, corrente do feixe de aproximadamente 100 μ A e distância de trabalho entre 24 e 26 mm. Todas as amostras foram preparadas e analisadas sob as mesmas condições operacionais, assegurando a padronização dos procedimentos experimentais. Para a caracterização da morfologia superficial, foram registradas micrografias nas ampliações de 35 $\times$, 50 $\times$, 100 $\times$, 150 $\times$, 200 $\times$, 250 $\times$, 500 $\times$, 1000 $\times$, 2000 $\times$ e 4500 $\times$. Entre as imagens obtidas, foram selecionadas aquelas consideradas mais representativas para apresentação e discussão dos resultados. Os equipamentos empregados na preparação e análise das amostras são apresentados na figura 9.

Figura 9 - Equipamentos utilizados na caracterização morfológica das amostras: (A) metalizador Quorum, modelo Q150T-ES; (B) microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo EVO MA-10 (Carl Zeiss AG, Alemanha)



Fonte: Acervo do Autor.

Foram analisadas amostras de caroço de açaí *in natura* (CIN), carvão não ativado (CNA), carvão ativado produzido por método artesanal (CAA) e Carvão Ativado produzido em Laboratório (CAL). A amostra CIN foi utilizada como referência morfológica para comparação com os materiais submetidos aos processos de carbonização e ativação química.

A caracterização por microscopia eletrônica de varredura teve como finalidade identificar alterações na morfologia superficial das amostras decorrentes dos tratamentos aplicados, especialmente quanto à formação de fissuras, cavidades e estruturas porosas.

4.4.5 Montagem do sistema experimental de filtração

Os ensaios de filtração foram realizados em um sistema experimental construído em escala laboratorial, utilizando carvões ativados produzidos a partir do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*). A configuração adotada baseou-se em modelos de filtros de baixo custo descritos na literatura, com adaptações às condições experimentais desta pesquisa e à proposta de desenvolvimento de uma tecnologia social passível de reprodução em diferentes contextos (Sousa, 2019; Silva, 2023).

As colunas filtrantes foram confeccionadas com garrafas de polietileno tereftalato (PET) reutilizadas, com capacidade de 1 L. Após a remoção da base, os recipientes foram invertidos para permitir o escoamento da água por gravidade ao longo do leito filtrante.

Na extremidade inferior de cada coluna foi posicionada uma membrana permeável constituída por filtro de papel qualitativo- camada de algodão, empregada como suporte para

retenção do meio filtrante e prevenção da perda de material durante a operação do sistema. Sobre essa membrana foram distribuídas camadas sucessivas de cascalho, areia grossa e carvão ativado, organizadas em ordem decrescente de granulometria. Essa disposição foi adotada para promover a retenção gradual de partículas e favorecer uma distribuição uniforme do fluxo da água através do leito filtrante.

As especificações dos materiais utilizados na montagem das colunas filtrantes, incluindo granulometria, espessura das camadas e respectivas funções, encontram-se apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Especificações das camadas do meio filtrante utilizadas na montagem das colunas experimentais

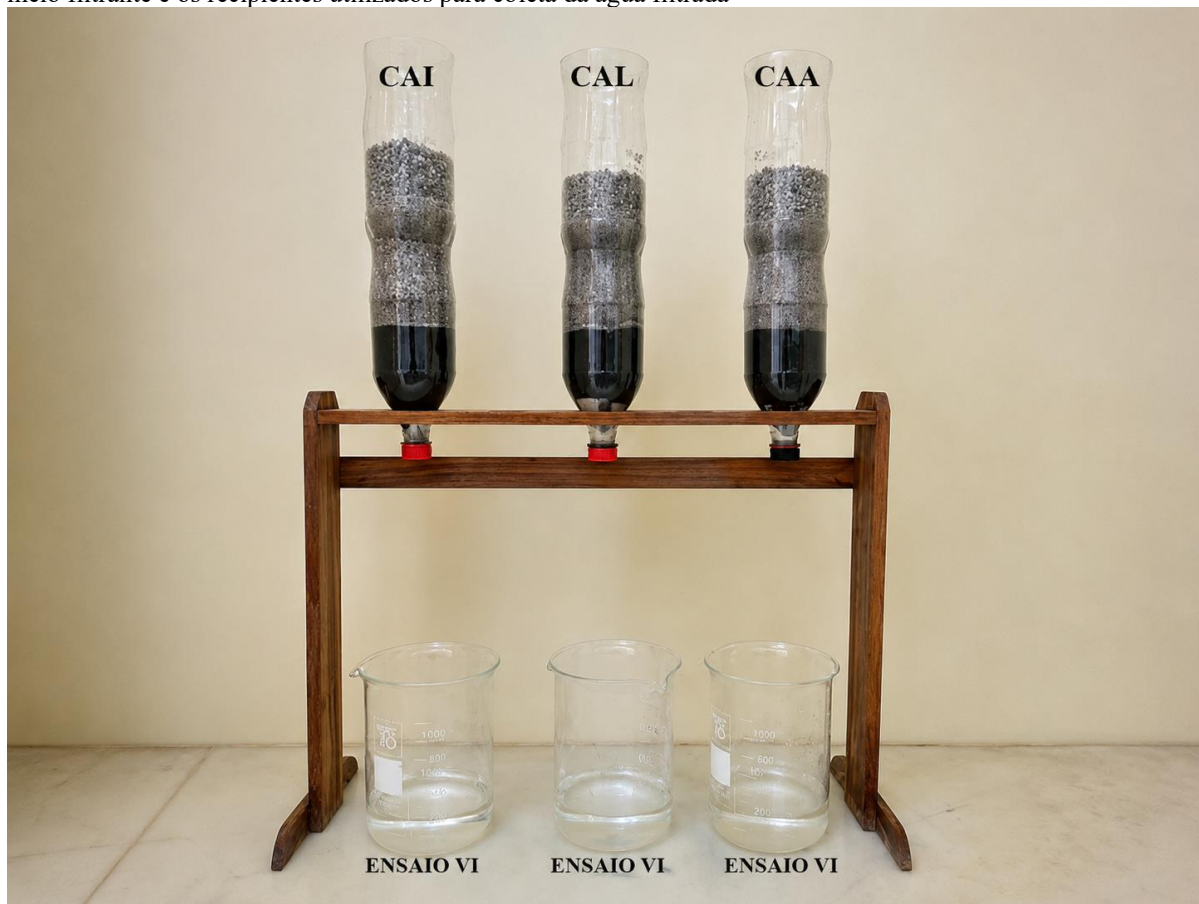
Material	Função no sistema filtrante	Referência
Garrafa de PET reutilizada	Estrutura física do filtro, permitindo a disposição das camadas filtrantes em fluxo descendente.	Elaborado pelo autor.
Cascalho	Retenção inicial de partículas de maior dimensão, distribuição uniforme do fluxo e suporte às camadas filtrantes superiores.	Di Bernardo e Dantas (2005).
Areia	Remoção de sólidos suspensos e partículas finas por mecanismos de retenção física e peneiramento, contribuindo para a redução da turbidez.	Di Bernardo e Dantas (2005).
Algodão ou manta de poliéster (perlon)	Barreira mecânica complementar responsável pela retenção de partículas finas e pela contenção do material filtrante.	Di Bernardo e Dantas (2005).
Carvão ativado de caroço de açaí	Meio adsorvente responsável pela remoção de compostos orgânicos, redução de cor, odor e sabor, além da adsorção de parte das substâncias químicas dissolvidas presentes na água.	Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006); Crittenden et al. (2012).
Fragmentos de calcário	Contribuem para a correção da acidez da água por meio da dissolução gradual de carbonatos, favorecendo a elevação do pH e da alcalinidade.	Di Bernardo e Dantas (2005).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Di Bernardo e Dantas (2005), Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006) e Crittenden et al. (2012).

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nas normas ASTM E11 e ABNT NBR NM ISO 3310-1.

Concluída a montagem, o sistema experimental encontrava-se apto para a realização dos ensaios de filtração. A figura 10 apresenta a configuração final das colunas filtrantes, evidenciando a disposição das camadas do meio filtrante e os recipientes utilizados para coleta da água filtrada.

Figura 10 - Sistema experimental de filtração em escala laboratorial, evidenciando a montagem das colunas filtrantes confeccionadas com garrafas de politereftalato de etileno (PET) de 1 L, a disposição das camadas do meio filtrante e os recipientes utilizados para coleta da água filtrada



Fonte: Acervo do autor.

Após o registro fotográfico, as colunas filtrantes foram previamente lavadas com água destilada para remover partículas soltas e promover a acomodação do meio filtrante. Em seguida, iniciaram-se os ensaios utilizando água bruta coletada em um corpo hídrico localizado na área de estudo.

Em cada ensaio, foram adicionados 10 L de água bruta na parte superior da coluna filtrante, permitindo sua passagem por percolação gravitacional através do leito filtrante. A água filtrada foi coletada em recipientes previamente higienizados posicionados na base das colunas.

Para fins comparativos, foram preparados sistemas contendo carvão ativado industrial (CAI), carvão ativado produzido em laboratório (CAL) e Carvão Ativado produzido por método artesanal (CAA). Todos os experimentos foram conduzidos em triplicata, sendo as amostras de água acondicionadas em frascos esterilizados para posterior realização das análises físico-químicas e microbiológicas.

4.5 Elaboração do produto educacional

O produto educacional desenvolvido nesta pesquisa consiste em uma cartilha ilustrada destinada à divulgação do processo de construção de um sistema simplificado de filtração de água utilizando materiais de baixo custo e carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*). A cartilha integra os produtos desta dissertação e será apresentada no Apêndice A, constituindo um material de apoio voltado à disseminação e à replicação da tecnologia social proposta, em consonância com a finalidade dos mestrados profissionais de produzir conhecimentos aplicados e materiais com potencial de utilização pela sociedade (Capes, 2019).

4.5.1 Concepção da cartilha educativa

A elaboração da cartilha fundamentou-se nos procedimentos experimentais desenvolvidos ao longo da pesquisa, na revisão da literatura especializada e nos registros fotográficos obtidos durante todas as etapas experimentais. O conteúdo foi organizado em sequência lógica, contemplando desde a coleta da biomassa até a montagem do sistema filtrante, utilizando linguagem objetiva e recursos visuais destinados a facilitar a compreensão dos procedimentos descritos.

A proposta editorial adotou uma abordagem crítica e contextualizada, buscando aproximar o conhecimento científico da realidade vivenciada pelas comunidades ribeirinhas amazônicas. Para isso, foram priorizadas soluções de baixo custo, materiais de fácil obtenção e procedimentos compatíveis com as condições locais, favorecendo a articulação entre o conhecimento científico e os saberes construídos no cotidiano dessas populações, conforme os princípios da educação contextualizada e dialógica (Freire, 1996; Leff, 2021).

A concepção da cartilha também se fundamenta nos pressupostos das tecnologias sociais, entendidas como soluções desenvolvidas a partir das necessidades locais, construídas com participação social e voltadas à resolução de problemas concretos, promovendo inclusão, sustentabilidade e apropriação do conhecimento pelas comunidades (DAGNINO, 2004).

Durante a editoração da cartilha foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial como recurso auxiliar para elaboração de ilustrações, composição gráfica e organização visual do material. Entretanto, a concepção pedagógica, a seleção dos conteúdos, a definição da sequência metodológica, a revisão crítica das informações e a validação técnica permaneceram sob responsabilidade exclusiva do autor, assegurando que o produto educacional representasse fielmente os procedimentos desenvolvidos nesta pesquisa.

4.5.2 Organização do conteúdo

A cartilha foi estruturada em seções temáticas, contemplando a apresentação da proposta, os materiais necessários para construção do sistema filtrante, as etapas de produção do carvão ativado, a montagem do sistema de filtração, recomendações para utilização do filtro e orientações gerais para sua manutenção. Também foram incorporadas fotografias obtidas durante a execução da pesquisa, esquemas ilustrativos e imagens produzidas com auxílio de inteligência artificial, empregadas exclusivamente para complementar a representação visual dos procedimentos descritos.

A organização do conteúdo buscou favorecer sua utilização em atividades de ensino, extensão universitária e educação ambiental, permitindo que professores, estudantes e comunidades adaptem os procedimentos apresentados às suas respectivas realidades, respeitando as condições locais e os recursos disponíveis. Essa abordagem reforça o papel da cartilha como instrumento de divulgação científica, tornando o conhecimento técnico mais acessível sem comprometer sua consistência metodológica (Bueno, 2010).

4.5.3 Contribuição do produto educacional para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A elaboração da cartilha está alinhada aos princípios da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, contribuindo para a difusão de conhecimentos científicos aplicados à realidade amazônica e para o fortalecimento de tecnologias sociais voltadas ao tratamento simplificado da água (ONU, 2015).

O produto educacional apresenta contribuição para o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 3 (ODS 3 – Saúde e Bem-Estar), ao promover conhecimentos relacionados à qualidade da água, aos riscos associados ao consumo de água contaminada e à importância de práticas voltadas à proteção da saúde; para o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 4 (ODS 4 – Educação de Qualidade), ao disponibilizar um recurso didático contextualizado para o ensino de Ciências Ambientais; para o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6 – Água Potável e Saneamento), ao difundir procedimentos de baixo custo voltados à melhoria da qualidade da água; e para o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 (ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis), ao incentivar o aproveitamento do caroço de açaí como matéria-prima para a produção de carvão ativado, promovendo a valorização de um resíduo agroindustrial abundante na região amazônica.

Embora a cartilha não tenha sido aplicada ou validada em ambiente escolar durante esta pesquisa, sua elaboração atende ao último objetivo específico da dissertação e amplia o potencial de disseminação da tecnologia social desenvolvida. Dessa forma, o produto educacional extrapola sua função de material de apoio, constituindo-se como instrumento de divulgação científica, educação ambiental e incentivo à adoção de soluções sustentáveis para o tratamento simplificado da água em comunidades amazônicas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Produção do carvão ativado e desenvolvimento do sistema filtrante

A produção de carvão ativado a partir do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*) evidenciou o potencial desse resíduo agroindustrial como material adsorvente para aplicação em sistemas simplificados de tratamento de água. A ampla disponibilidade dessa biomassa na região amazônica, aliada ao grande volume de resíduos gerados pelo processamento do fruto, favorece seu aproveitamento como matéria-prima para produção de carvão ativado, agregando valor a um resíduo abundante e contribuindo para práticas alinhadas à economia circular.

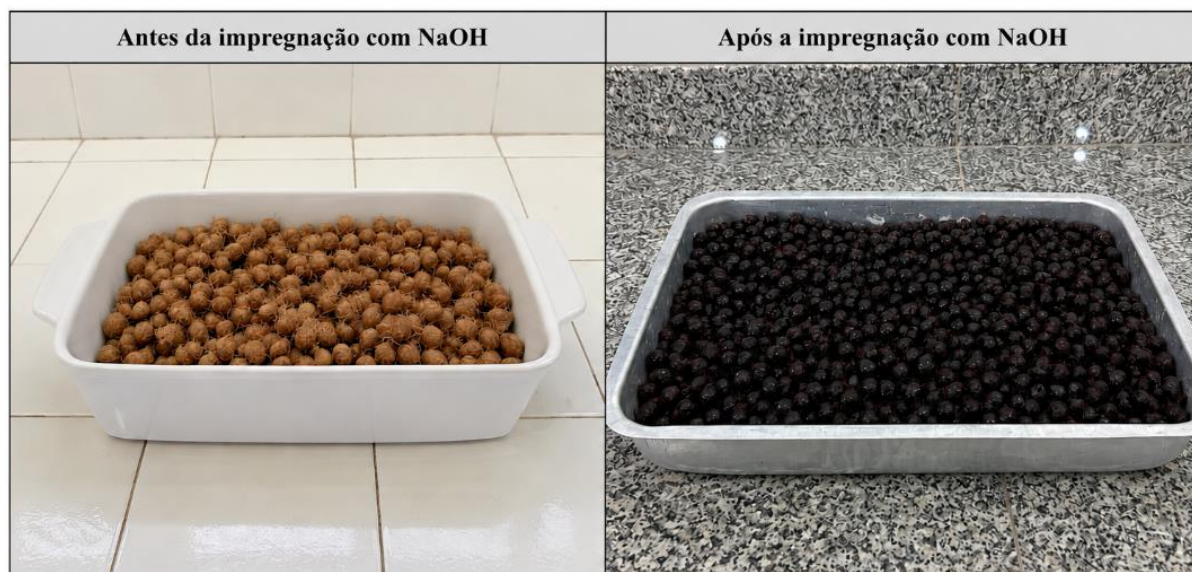
Durante o preparo da biomassa observou-se a presença de resíduos de polpa e de material particulado aderidos aos caroços, tornando necessárias as etapas de lavagem e peneiramento descritas na metodologia. Esses procedimentos proporcionaram maior uniformidade granulométrica e reduziram impurezas que poderiam comprometer o contato entre o agente ativador e a matriz lignocelulósica. Conforme destacam Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006), o preparo adequado do precursor influencia diretamente o desenvolvimento da estrutura porosa e a capacidade adsortiva dos carvões ativados.

Os dois métodos de secagem empregados reduziram adequadamente a umidade da biomassa. A secagem em estufa foi concluída em aproximadamente 24 horas, enquanto a secagem natural demandou cerca de 96 horas. Apesar do maior controle operacional proporcionado pela estufa, a secagem ao ar livre mostrou-se tecnicamente viável e compatível com a realidade de comunidades ribeirinhas e instituições com infraestrutura limitada.

Na etapa de ativação química verificou-se dificuldade inicial na completa solubilização do hidróxido de sódio (NaOH) na concentração de 80 g/L, com formação de precipitado no fundo do recipiente. Para garantir a homogeneização da solução empregaram-se aquecimento e banho de ultrassom, assegurando melhor impregnação do agente ativador na biomassa.

Durante o período de impregnação observou-se alteração da coloração superficial dos caroços de açaí, conforme apresentado na figura 11, indicando interação inicial entre o NaOH e a matriz lignocelulósica. Embora essa alteração visual sugerisse a ocorrência da ativação química, ela não foi considerada suficiente para confirmar sua eficiência, posteriormente verificada pelas análises de microscopia eletrônica de varredura e pelo desempenho dos carvões nos ensaios de filtração.

Figura 11 - Aspecto macroscópico dos caroços de açaí antes e após a impregnação com solução de hidróxido de sódio (NaOH), evidenciando alteração da coloração superficial



Fonte. Elaborado pelo Autor.

Após a impregnação iniciou-se a carbonização da biomassa. Nos ensaios preliminares adotou-se o protocolo de Sousa (2019), utilizando temperatura de 400 °C durante 4 horas para produção do carvão ativado laboratorial (CAL). Nessas condições verificou-se intensa degradação da biomassa, elevada formação de cinzas e baixa recuperação do material carbonizado, indicando que os parâmetros originalmente propostos não eram os mais adequados para o precursor empregado nesta pesquisa.

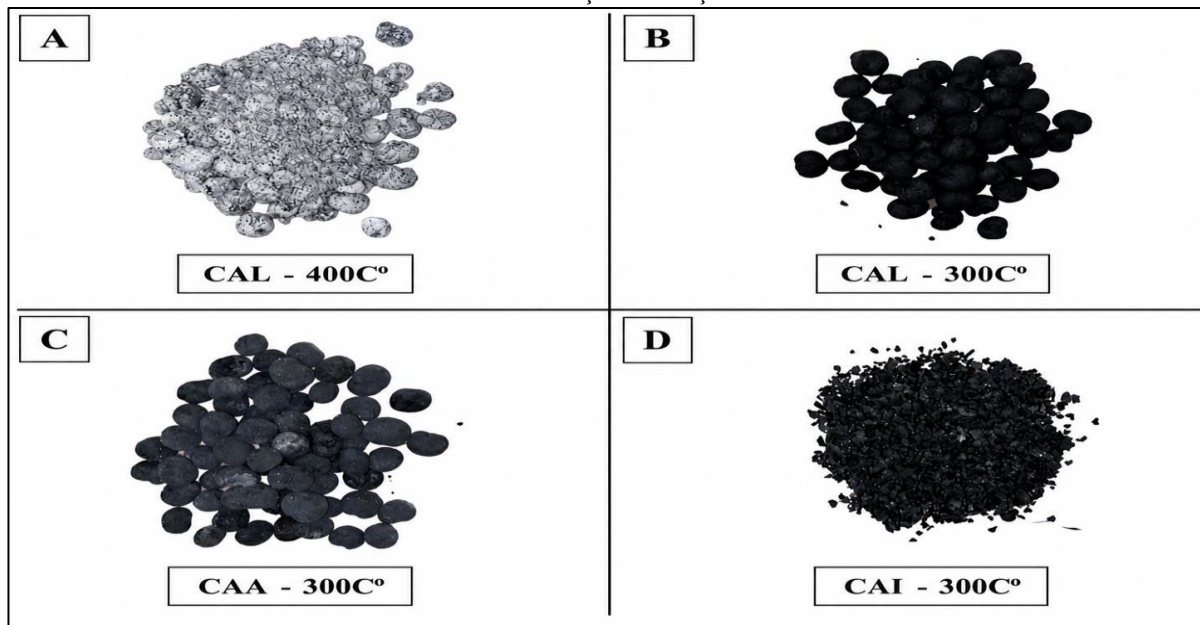
O protocolo foi então ajustado para 300 °C durante 3 horas, condição que reduziu a formação de cinzas e proporcionou rendimento gravimétrico aproximado de 30% para o CAL, passando a ser adotada nos experimentos subsequentes.

A produção do carvão ativado artesanal (CAA) foi realizada em panela metálica aquecida em fogão a lenha durante aproximadamente 7 horas. Em razão das características do sistema, não foi possível monitorar a temperatura de carbonização. O rendimento gravimétrico obtido foi de aproximadamente 20%. Durante esse processo foi necessário revolver periodicamente a biomassa com colher de madeira para uniformizar o aquecimento. Observou-se que esse procedimento favoreceu a fragmentação dos caroços carbonizados, aumentando a formação de partículas finas e cinzas, constituindo uma explicação plausível para o menor rendimento obtido em relação ao processo laboratorial.

A Figura 12 apresenta o aspecto macroscópico dos materiais adsorventes obtidos e utilizados na pesquisa, permitindo comparar visualmente o carvão não ativado (CNA), o carvão

ativado artesanal (CAA), o carvão ativado laboratorial (CAL) e o carvão ativado industrial (CAI) após os respectivos processos de carbonização e ativação.

Figura 12 - Comparação macroscópica dos materiais adsorventes utilizados na pesquisa após os processos de carbonização e ativação



Fonte. Acervo próprio do Autor.

A comparação entre as condições empregadas na produção dos carvões ativados, bem como os respectivos rendimentos gravimétricos obtidos, é apresentada na Tabela 3

Tabela 3- Comparação das Condições de Produção dos carvões ativados utilizados na pesquisa

Amostra	Sistema de carbonização	Tempo de carbonização (h)	Temperatura (°C)	Rendimento (%)	Características observadas
CAL	Mufa	3	300	30	Carbonização mais homogênea, com menor formação de cinzas e maior recuperação de material carbonizado.
CAA	Panela metálica em fogão a lenha	7	Não monitorada	20	Necessidade de revolvimento manual da biomassa, maior geração de partículas finas e menor recuperação de material carbonizado.

Fonte: Acervo do Autor.

Os resultados evidenciaram diferenças entre os dois processos. O CAL apresentou maior rendimento em função do controle das condições de carbonização. Em contrapartida, o método artesanal, embora menos eficiente sob esse aspecto, dispensa infraestrutura laboratorial e pode ser reproduzido em comunidades ribeirinhas e outros contextos com limitações técnicas, característica coerente com a proposta de desenvolvimento de uma tecnologia social.

Concluída a produção do carvão ativado, procedeu-se à montagem do sistema filtrante utilizando garrafas de politereftalato de etileno (PET) com capacidade de 2 L, preenchidas com camadas de cascalho, areia grossa e carvão ativado, conforme descrito na metodologia. O custo estimado para construção de cada unidade foi de aproximadamente R\$ 25,50, considerando apenas os materiais empregados.

Durante a montagem do sistema filtrante, realizou-se um ensaio preliminar utilizando uma coluna composta exclusivamente pelas camadas minerais. Por inspeção visual, observou-se redução da turbidez da água; entretanto, ainda permanecia quantidade significativa de sedimentos finos em suspensão. Após a inclusão da camada de carvão ativado, a água apresentou aspecto visual mais límpido e menor presença de partículas dispersas. A comparação entre os dois ensaios pode ser observada na figura 13, evidenciando a contribuição visual do carvão ativado para o aprimoramento do processo de filtração. Embora essa avaliação tenha sido qualitativa, seus resultados foram posteriormente corroborados pelas análises físico-químicas e microbiológicas realizadas nesta pesquisa.

Figura 13 - Comparação visual da água obtida nos ensaios preliminares de filtração: (A) sistema filtrante sem a camada de carvão ativado; (B) sistema filtrante completo contendo carvão ativado



Fonte: Acervo do autor.

As adaptações introduzidas durante o preparo da biomassa, a ativação química, a carbonização e a montagem do sistema filtrante influenciaram diretamente as características do material produzido. A caracterização morfológica apresentada na seção seguinte permite compreender como essas modificações se refletiram na estrutura superficial dos carvões ativados e, consequentemente, em seu desempenho no tratamento da água.

5.2 Caracterização morfológica do carvão ativado por Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

A caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu analisar as modificações estruturais promovidas pelos processos de carbonização e ativação química aplicados ao caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*). As micrografias foram obtidas em diferentes ampliações, possibilitando acompanhar a evolução da superfície do material desde sua condição in natura até a obtenção dos carvões ativados produzidos pelos métodos artesanal e laboratorial.

A figura 14 reúne as micrografias das amostras de caroço *in natura* (CIN), carvão não ativado (CNA), carvão ativado artesanalmente (CAA) e carvão ativado em laboratório (CAL). A comparação entre essas amostras evidencia uma evolução gradual da morfologia superficial, marcada pelo aumento da rugosidade, pela formação de cavidades e pelo desenvolvimento progressivo da rede porosa à medida que os tratamentos térmico e químico são aplicados.

O caroço de açaí *in natura* (CIN) apresentou superfície relativamente compacta, constituída por fibras lignocelulósicas preservadas e ausência de poros bem definidos. Essa morfologia representa a estrutura original da biomassa, antes da aplicação dos processos de carbonização e ativação, servindo como referência para a interpretação das alterações observadas nas demais amostras.

Após a carbonização, a amostra de carvão não ativado (CNA) passou a apresentar fissuras, trincas e descontinuidades superficiais, resultantes da liberação dos compostos voláteis durante a pirólise. Embora essas alterações indiquem o início da reorganização estrutural do material, a superfície permaneceu predominantemente compacta. Na ampliação de 4500× observaram-se pequenos poros isolados e baixa conectividade entre as cavidades, indicando que a carbonização, isoladamente, não foi suficiente para produzir uma estrutura altamente porosa.

Esse comportamento é compatível com o processo de obtenção de materiais carbonáceos descrito por Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006), no qual a carbonização promove a decomposição térmica da matéria-prima, com liberação de constituintes voláteis e formação de uma matriz enriquecida em carbono. Entretanto, a carbonização, isoladamente, não produz necessariamente uma estrutura porosa com elevada área superficial específica, sendo a etapa de ativação fundamental para o desenvolvimento e a ampliação da porosidade característica dos carvões ativados. Ahmad *et al.* (2014) destacam que as propriedades superficiais e a estrutura porosa dos materiais carbonizados dependem das condições de pirólise, incluindo temperatura, tempo de residência e características da matéria-prima. Essas considerações são compatíveis com a menor definição de estruturas porosas observada na amostra CNA quando comparada às amostras submetidas à etapa de ativação.

Em comparação ao CNA, a amostra de carvão ativado artesanalmente (CAA) apresentou modificações estruturais mais perceptíveis. As micrografias revelaram superfície mais irregular, com aumento da rugosidade, maior número de cavidades e desenvolvimento de canais distribuídos ao longo da matriz carbonizada. Essas alterações indicam que a ativação química favoreceu a remoção de parte dos constituintes orgânicos, ampliando a porosidade do material.

Nas maiores ampliações observou-se que a distribuição dos poros ocorreu de forma menos uniforme quando comparada ao carvão produzido em laboratório. Essa característica pode estar associada às condições do processo artesanal, realizado em fogão a lenha, sem controle da temperatura e com necessidade de revolvimento periódico da biomassa durante a carbonização. Embora esse procedimento tenha favorecido a fragmentação parcial dos caroços carbonizados e a formação de partículas finas, não impediu o desenvolvimento de uma estrutura porosa significativamente superior à observada na amostra CNA.

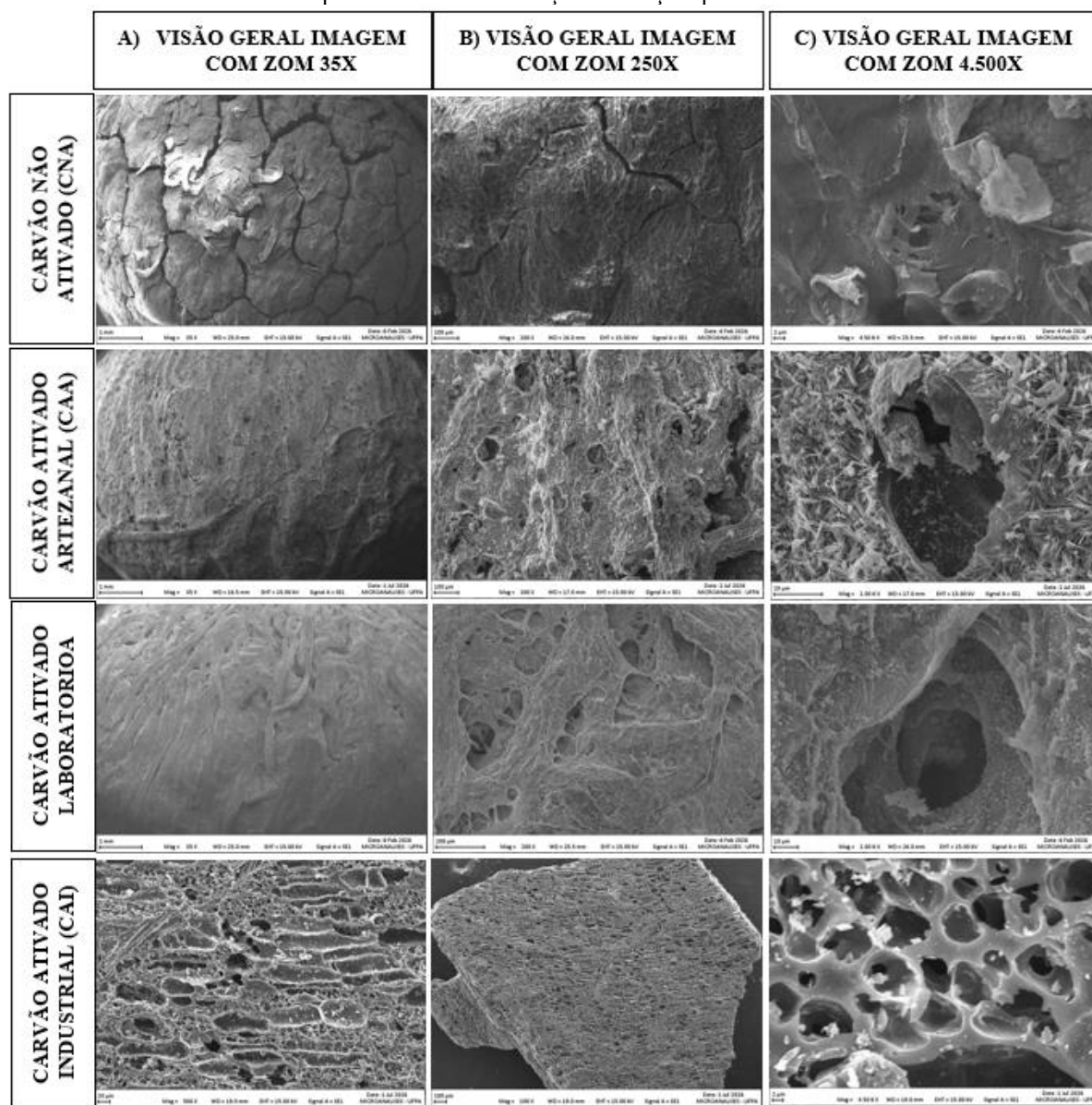
Segundo Lua e Yang (2004), a ativação química promove a remoção de frações carbonosas amorfas e favorece a abertura dos canais internos, aumentando a área superficial específica. Da mesma forma, Ioannidou e Zabaniotou (2007) destacam que diferenças nas condições de carbonização e ativação influenciam diretamente a uniformidade da rede porosa, aspecto compatível com a heterogeneidade observada na amostra CAA.

Entre os materiais avaliados, o carvão ativado produzido em laboratório (CAL) apresentou o maior desenvolvimento estrutural. As micrografias evidenciaram superfície intensamente rugosa, elevada densidade de cavidades e maior conectividade entre os poros. Nas maiores ampliações foram observadas estruturas compatíveis com micro e mesoporos distribuídos de forma mais homogênea ao longo da matriz carbonácea, indicando maior organização da rede porosa.

Esse resultado pode ser atribuído, em parte, às adaptações introduzidas durante o desenvolvimento experimental. Nos ensaios preliminares foi adotado o protocolo descrito por Sousa (2019), utilizando carbonização a 400 °C durante 4 (quatro) horas. Nessas condições observou-se intensa degradação da biomassa, elevada formação de cinzas e baixa recuperação do material carbonizado. A partir dessas observações, o protocolo foi ajustado para 300 °C durante 3 (três) horas, condição que proporcionou rendimento gravimétrico de aproximadamente 30%, preservando melhor a estrutura da biomassa e reduzindo a formação de cinzas. As micrografias sugerem que essa adaptação favoreceu o desenvolvimento de uma rede porosa mais uniforme, evidenciando que pequenas alterações nas condições de carbonização podem influenciar diretamente a morfologia final do carvão ativado.

Resultados semelhantes foram descritos por Sousa (2019) e Silva *et al.* (2023), que observaram aumento da porosidade em carvões ativados produzidos a partir do caroço de açaí após ativação química com hidróxido de sódio. Segundo Bansal e Goyal (2005), a presença simultânea de micro, meso e macroporos favorece tanto a difusão dos contaminantes quanto sua retenção nos sítios ativos do material, aumentando a eficiência dos processos adsorptivos.

Figura 14 - Painel comparativo das micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras de caroço *in natura* (CIN), carvão não ativado (CNA), carvão ativado artesanalmente (CAA) e carvão ativado em laboratório (CAL), em diferentes ampliações, evidenciando a evolução morfológica promovida pelos processos de carbonização e ativação química.



Fonte: Acervo do Autor.

A análise conjunta das micrografias evidencia uma evolução estrutural contínua entre as amostras avaliadas. O caroço *in natura* apresenta superfície compacta e preservada; após a carbonização, o carvão não ativado desenvolve fissuras e pequenas cavidades, ainda insuficientes para caracterizar uma estrutura altamente porosa. A ativação química promove mudanças mais expressivas, inicialmente observadas no carvão ativado artesanal e, de forma mais evidente, no carvão ativado produzido em laboratório, cuja superfície apresenta maior rugosidade, maior densidade de cavidades e melhor conectividade entre os poros.

Essa evolução pode ser representada pela sequência **CIN < CNA < CAA < CAL**, indicando aumento progressivo da complexidade estrutural da biomassa ao longo das etapas de processamento. Embora o carvão ativado artesanal tenha apresentado desenvolvimento significativo da porosidade, a ausência de controle da temperatura durante a carbonização e a necessidade de revolvimento manual da biomassa contribuíram para maior heterogeneidade da estrutura superficial. Em contrapartida, o controle das condições de carbonização empregado na produção do CAL favoreceu a obtenção de uma rede porosa mais uniforme, refletindo diretamente na organização da matriz carbonácea.

As micrografias também evidenciam que as adaptações introduzidas ao protocolo originalmente utilizado constituíram uma etapa importante do desenvolvimento desta pesquisa. A redução da temperatura e do tempo de carbonização permitiu preservar melhor a estrutura do precursor, aumentando a recuperação do carvão produzido sem comprometer o desenvolvimento da porosidade. Esse resultado demonstra que a otimização das condições experimentais influenciou não apenas o rendimento do processo, mas também as características morfológicas do material obtido.

A inclusão das micrografias do carvão ativado industrial (CAI) permitiu ampliar a análise comparativa entre os materiais produzidos nesta pesquisa e um adsorvente comercial amplamente empregado em sistemas de tratamento de água. A comparação das características morfológicas observadas nas diferentes amostras possibilitou avaliar a influência dos processos de ativação e carbonização sobre o desenvolvimento da estrutura porosa, bem como verificar o grau de aproximação entre os carvões ativados produzidos em laboratório (CAL), de forma artesanal (CAA) e o carvão ativado industrial (CAI). Essa análise fornece subsídios para compreender a relação entre a morfologia superficial dos materiais e o desempenho observado nos ensaios de filtração.

As evidências obtidas por microscopia eletrônica de varredura confirmam que os processos de carbonização e ativação química promoveram modificações estruturais sucessivas na biomassa, aumentando progressivamente a rugosidade superficial e o desenvolvimento da rede porosa. Essas características fornecem suporte morfológico para interpretar o comportamento dos materiais nos ensaios de filtração, discutidos na seção seguinte, permitindo relacionar as alterações observadas na microestrutura com o desempenho do sistema filtrante desenvolvido nesta pesquisa.

5.3 Avaliação do desempenho dos sistemas filtrantes na melhoria da qualidade da água

Os ensaios de filtração constituíram a etapa destinada a avaliar o desempenho dos sistemas filtrantes desenvolvidos nesta pesquisa e verificar se as modificações estruturais promovidas pelos processos de carbonização e ativação química refletiram em melhorias efetivas da qualidade da água. Para essa avaliação, foram comparados os resultados obtidos para a água bruta e para a água filtrada utilizando sistemas contendo carvão ativado industrial (CAI), carvão ativado produzido em laboratório (CAL) e carvão ativado produzido artesanalmente (CAA), conforme os procedimentos descritos no tópico 4.

A água utilizada nos experimentos foi coletada no rio Guamá, em frente à Ilha do Combu, município de Belém (PA), nas coordenadas geográficas 1°28'12,56" S e 48°26'32,56" W (WGS 84). Visualmente, a amostra apresentava elevada turbidez, coloração escura e quantidade significativa de material particulado em suspensão, características frequentemente observadas em mananciais superficiais amazônicos, especialmente durante períodos de maior aporte de sedimentos e matéria orgânica provenientes da vegetação ciliar e das áreas periodicamente inundadas (Junk *et al.*, 2011). Essas características justificam a seleção da área de estudo, por representar condições ambientais e de abastecimento semelhantes às observadas em diversas comunidades ribeirinhas amazônicas que utilizam diretamente a água fluvial para suprir suas necessidades cotidianas. A figura 15 apresenta uma vista aérea da área de coleta, obtida por meio de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), permitindo a visualização do ponto de amostragem e de seu contexto ambiental.

Figura 15 - Vista aérea da área de coleta das amostras de água no rio Guamá, em frente à Ilha do Combu, município de Belém (PA), obtida por meio de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)



Fonte: Acervo do Autor.

Os parâmetros selecionados para avaliação compreenderam turbidez, sólidos totais, cor aparente, potencial hidrogeniônico (pH), dureza total, coliformes totais e *Escherichia coli*. A seleção desses indicadores fundamentou-se na sua relevância para a avaliação da eficiência de sistemas simplificados de tratamento de água, permitindo analisar simultaneamente a retenção de material particulado, a melhoria das características físico-químicas e a redução da contaminação microbiológica.

Os resultados experimentais obtidos para cada sistema filtrante são apresentados na Tabela 4, que reúne os valores determinados para a água bruta e para a água tratada pelos sistemas contendo carvão ativado industrial, carvão ativado laboratorial e carvão ativado artesanal. A utilização do carvão ativado industrial como material de referência permite comparar o desempenho dos materiais desenvolvidos nesta pesquisa com um adsorvente comercial amplamente empregado em processos convencionais de tratamento de água.

Tabela 4 - Resultados dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água bruta e da água filtrada pelos sistemas contendo carvão ativado industrial (CAI), carvão ativado laboratorial (CAL) e carvão ativado artesanal (CAA).

Parâmetro	Água bruta (antes da filtração)	CAI (industrial)	CAL (laboratorial)	CAA (artesanal)	Padrão GM/MS nº 888/2021
Turbidez (NTU)	48,5	5,5	6,2	6,0	≤ 5,0
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	210	50	95	39	—
Cor aparente (uH)	132	40	30	35	≤ 15
pH	5,6 – 6,0	5,6 – 5,8	6,4 – 6,5	6,4 – 6,3	6,0 – 9,5
Cloreto (mg L ⁻¹ como Cl ⁻)	32	Não detectável ou detectável abaixo do limite de detecção do método	Não detectável ou detectável abaixo do limite de detecção do método	Não detectável ou detectável abaixo do limite de detecção do método	—
Coliformes totais	Presente	Presente	Presente	Ausente	Ausência em 100 mL
Coliformes termotolerantes (<i>E. coli</i>)	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausência em 100 mL

Fonte: Acervo do Autor.

Com o objetivo de facilitar a comparação entre os sistemas filtrantes, foi calculada a eficiência percentual de remoção dos parâmetros quantitativos em relação à água bruta, utilizando a equação 1. Para o potencial hidrogeniônico (pH), cuja interpretação está relacionada ao enquadramento na faixa de potabilidade, e para os parâmetros microbiológicos

avaliados qualitativamente, a análise baseou-se na conformidade dos resultados obtidos após a filtração.

Equação 1 – Eficiência de remoção dos parâmetros quantitativos

$$\text{Eficiência (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Em que:

C_i = valor do parâmetro na água bruta;

C_f = valor do parâmetro após a filtração.

Os percentuais de eficiência calculados são apresentados na tabela 5, permitindo comparar de forma direta o desempenho dos diferentes sistemas filtrantes.

Tabela 5 - Desempenho comparativo dos sistemas filtrantes com base na eficiência de remoção dos parâmetros quantitativos e na avaliação dos parâmetros microbiológicos.

Parâmetro	Água bruta (antes da filtração)	CAI (industrial)	CAL (laboratorial)	CAA (artesanal)	Padrão GM/MS nº 888/2021
Turbidez (NTU)	48,5	5,5	6,2	6,0	≤ 5,0
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	210	50	95	39	—
Cor aparente (uH)	132	40	30	35	≤ 15
pH	5,6 – 6,0	5,6 – 5,8	6,4 – 6,5	6,4 – 6,3	6,0 – 9,5
Cloreto (mg L ⁻¹ como Cl ⁻)	32	Não detectável ou detectável abaixo do limite de detecção do método	Não detectável ou detectável abaixo do limite de detecção do método	Não detectável ou detectável abaixo do limite de detecção do método	—
Coliformes totais	Presente	Presente	Presente	Ausente	Ausência em 100 mL
Coliformes termotolerantes (<i>E. coli</i>)	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausência em 100 mL

Fonte: Elaborado pelo Autor, com base nos dados experimentais.

Nota: Os valores apresentados nas colunas **CAI**, **CAL** e **CAA** correspondem à eficiência de remoção (%) dos parâmetros quantitativos em relação à água bruta, calculada conforme a Equação 5.1. Para o pH, são apresentados os valores medidos após a filtração, cuja interpretação baseou-se no atendimento à faixa de potabilidade estabelecida pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Para Coliformes totais e *Escherichia coli*, apresentam-se os resultados qualitativos obtidos após a filtração.

A análise conjunta das tabelas 4 e 5 demonstra que todos os sistemas filtrantes promoveram melhorias na qualidade da água em relação à amostra bruta, embora com desempenhos distintos entre os materiais avaliados. De forma geral, o carvão ativado industrial

apresentou os resultados mais consistentes, comportamento esperado em razão do controle rigoroso empregado nas etapas de carbonização, ativação, lavagem e classificação granulométrica durante sua fabricação. Entre os materiais produzidos nesta pesquisa, o carvão ativado laboratorial apresentou desempenho superior ao carvão ativado artesanal na maior parte dos parâmetros analisados, aproximando-se, em diversos aspectos, do comportamento observado para o material de referência.

As diferenças verificadas entre os sistemas filtrantes apresentam correspondência direta com os resultados da caracterização morfológica discutidos no item 5.2. As análises por microscopia eletrônica de varredura evidenciaram que o carvão ativado produzido em laboratório desenvolveu uma estrutura superficial mais homogênea, maior densidade de cavidades e melhor conectividade entre os poros quando comparado ao carvão ativado artesanal. Essas características favorecem o aumento da área superficial específica e da disponibilidade de sítios ativos para adsorção, fatores amplamente reconhecidos como determinantes para o desempenho de materiais carbonáceos empregados no tratamento de água (Marsh; Rodríguez-Reinoso, 2006; Rouquerol *et al.*, 2014). Dessa forma, a evolução morfológica observada nas micrografias apresenta coerência com o comportamento verificado durante os ensaios de filtração.

Embora o carvão ativado artesanal tenha apresentado desempenho inferior em alguns parâmetros, os resultados demonstram que o material foi capaz de promover melhorias significativas na qualidade da água utilizando um processo de produção compatível com a realidade de comunidades ribeirinhas e instituições de ensino com infraestrutura limitada. Esse resultado reforça o potencial de aplicação da tecnologia proposta como alternativa de baixo custo para sistemas simplificados de tratamento de água.

A avaliação comparativa evidencia ainda que a eficiência dos sistemas filtrantes variou conforme o parâmetro analisado, indicando que os mecanismos de remoção dependem das características físico-químicas e microbiológicas dos contaminantes presentes na água. Dessa forma, a discussão apresentada a seguir foi organizada individualmente para cada parâmetro, buscando relacionar os resultados experimentais às características estruturais dos carvões ativados, aos mecanismos predominantes de filtração e adsorção e às evidências descritas na literatura científica.

5.3.1 Turbidez

A turbidez é um dos principais indicadores da qualidade da água por expressar a quantidade de partículas em suspensão, como argilas, siltes, matéria orgânica e

microrganismos. Além de comprometer o aspecto visual, valores elevados dificultam os processos de desinfecção, uma vez que parte dos microrganismos pode permanecer protegida pela matéria particulada. Por essa razão, esse parâmetro é amplamente empregado na avaliação da eficiência de sistemas de tratamento de água (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017).

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam redução expressiva da turbidez após a passagem da água pelos três sistemas filtrantes avaliados. Conforme apresentado na tabela 5.2, as eficiências de remoção foram de 88,7% para o carvão ativado industrial (CAI), 87,6% para o carvão ativado artesanal (CAA) e 87,2% para o carvão ativado produzido em laboratório (CAL). Embora o material comercial tenha apresentado o maior percentual de remoção, a diferença entre os sistemas foi reduzida, indicando comportamento semelhante durante a filtração.

Mais relevante que a pequena diferença percentual é o desempenho alcançado pelo carvão ativado desenvolvido nesta pesquisa. Produzido a partir do caroço de açaí e submetido às adaptações metodológicas descritas no item 5.1, o material laboratorial apresentou eficiência muito próxima à do adsorvente comercial, demonstrando que resíduos agroindustriais disponíveis na região Amazônica podem ser convertidos em materiais com desempenho compatível ao de produtos industrializados.

Os valores finais de turbidez, entretanto, permaneceram ligeiramente acima do limite de 5,0 NTU estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Esse resultado deve ser interpretado considerando as características da água bruta utilizada nos ensaios, que apresentava elevada concentração de sedimentos em suspensão. Nessas condições, a remoção superior a 87% evidencia elevada capacidade de retenção do sistema, ainda que uma única etapa de filtração não tenha sido suficiente para enquadrar completamente esse parâmetro no padrão de potabilidade.

As observações realizadas durante os ensaios experimentais ajudam a compreender esse comportamento. Antes da incorporação do carvão ativado, foi montado um filtro contendo apenas as camadas minerais de areia e cascalho. Nessa configuração, verificou-se redução perceptível da turbidez, confirmando que essas camadas são responsáveis pela retenção da maior parte das partículas de maior granulometria. Apesar disso, a água filtrada ainda apresentava partículas finas dispersas, mantendo aspecto visual levemente turvo.

A inclusão do carvão ativado modificou significativamente esse cenário. Após a montagem completa do sistema, a água apresentou aspecto visual mais límpido, indicando que o carvão atuou principalmente na retenção da fração particulada remanescente e de compostos

orgânicos de menor dimensão. Esse comportamento evidencia que a eficiência do filtro não depende exclusivamente do adsorvente, mas da atuação integrada entre os mecanismos de filtração física promovidos pelas camadas minerais e os processos de adsorção desenvolvidos pelo material carbonáceo.

Essa interpretação é coerente com a caracterização morfológica apresentada no item 5.2. As análises por microscopia eletrônica de varredura mostraram que o carvão ativado produzido em laboratório desenvolveu uma superfície mais rugosa, com maior número de cavidades e melhor conectividade entre os poros quando comparado ao carvão ativado artesanal. Embora a retenção da turbidez seja predominantemente governada por processos físicos, a maior disponibilidade de sítios adsorventes favorece a remoção de partículas coloidais e de matéria orgânica de pequenas dimensões, contribuindo para o desempenho global do sistema filtrante.

Estudos desenvolvidos por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017) demonstram que a remoção da turbidez em filtros granulares resulta da ação simultânea de mecanismos de peneiramento, sedimentação, interceptação e adsorção superficial. De maneira semelhante, Ahmad *et al.* (2014) observaram que carvões ativados produzidos a partir de biomassas lignocelulósicas potencializam a retenção de partículas finas e matéria orgânica, aumentando a eficiência de sistemas simplificados de tratamento de água.

Os resultados obtidos confirmam que a tecnologia proposta apresenta elevado potencial para aplicação em sistemas descentralizados de tratamento de água. Embora o carvão ativado industrial tenha apresentado o maior percentual de remoção, o desempenho alcançado pelo carvão ativado produzido em laboratório mostrou-se tecnicamente equivalente do ponto de vista prático, sobretudo quando considerados o baixo custo da matéria-prima, a disponibilidade regional do caroço de açaí e a simplicidade do processo de produção. Esses aspectos reforçam a viabilidade da tecnologia desenvolvida e demonstram que soluções baseadas em resíduos agroindustriais podem representar alternativas consistentes para o tratamento de água em comunidades com infraestrutura limitada.

5.3.2 Sólidos Totais

Os sólidos totais representam a fração dissolvida e suspensa presente na água e constituem um importante indicador da carga de material transportado pelo manancial. Embora a Portaria GM/MS nº 888/2021 não estabeleça valor máximo permitido para esse parâmetro,

sua redução contribui para a melhoria das características físicas da água e do desempenho dos processos de tratamento.

A concentração de sólidos totais reduziu de 210 mg/L para 90 mg/L no sistema contendo carvão ativado industrial, 95 mg/L no carvão ativado produzido em laboratório e 99 mg/L no carvão ativado artesanal, correspondendo a eficiências de remoção de 57,1%, 54,8% e 52,9%, respectivamente.

As diferenças entre os sistemas foram pequenas. O desempenho do carvão ativado produzido em laboratório aproximou-se do material comercial, indicando que as adaptações introduzidas durante sua produção permitiram obter um adsorvente eficiente na retenção da fração sólida presente na água.

A redução observada resulta da atuação conjunta das camadas minerais e do carvão ativado. Enquanto areia e cascalho retêm partículas de maior dimensão, a estrutura porosa do carvão favorece a remoção de partículas finas e parte da matéria orgânica associada aos sólidos suspensos. Essa interpretação é compatível com as análises de microscopia eletrônica apresentadas no item 5.2, nas quais o carvão ativado laboratorial apresentou maior desenvolvimento da rede porosa em relação ao carvão artesanal.

Resultados semelhantes foram descritos por Ahmad *et al.* (2014), que verificaram aumento da eficiência de remoção de sólidos em sistemas contendo carvões ativados produzidos a partir de biomassas lignocelulósicas. Nesse contexto, os resultados obtidos confirmam o potencial do material desenvolvido para aplicação em sistemas simplificados de tratamento de água.

5.3.3 Cor Aparente

A cor aparente está relacionada principalmente à presença de matéria orgânica dissolvida, substâncias húmicas e partículas coloidais, características comuns em águas superficiais da Amazônia.

A água bruta apresentou 132 uH, reduzindo para 40 uH (CAI), 30 uH (CAL) e 35 uH (CAA). As eficiências de remoção corresponderam a 69,7%, 77,3% e 73,5%, respectivamente.

Esse foi um dos resultados mais expressivos da pesquisa, uma vez que o carvão ativado produzido em laboratório apresentou desempenho superior ao carvão ativado industrial. A maior eficiência sugere que as condições de ativação química e carbonização adotadas favoreceram o desenvolvimento de características superficiais capazes de aumentar a adsorção dos compostos responsáveis pela coloração da água.

Essa interpretação encontra respaldo nas análises de MEV, que evidenciaram superfície mais rugosa, maior quantidade de cavidades e melhor conectividade entre os poros na amostra CAL. Essas características ampliam a área superficial disponível para adsorção e favorecem a retenção de compostos orgânicos dissolvidos, diretamente associados à cor aparente.

Embora a redução tenha sido significativa, o valor final de 30 uH permaneceu acima do limite de 15 uH estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Ainda assim, o desempenho obtido demonstra elevada capacidade de adsorção e evidencia o potencial tecnológico do material produzido nesta pesquisa.

Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006) destacam que compostos responsáveis pela cor apresentam elevada afinidade por superfícies carbonáceas altamente porosas, comportamento igualmente observado por Silva *et al.* (2023) em carvões ativados produzidos a partir do caroço de açaí. Os resultados obtidos corroboram essas observações e reforçam a eficiência do carvão ativado laboratorial na remoção de matéria orgânica dissolvida.

5.3.4 Potencial hidrogeniônico (pH)

A água bruta apresentou pH 4,7, valor inferior ao intervalo de 6,0 a 9,5 estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Após a filtração, foram obtidos valores de 5,50 para o sistema contendo carvão ativado industrial, 7,45 para o carvão ativado produzido em laboratório e 6,95 para o carvão ativado artesanal.

Os resultados mostram comportamentos distintos entre os materiais avaliados. Enquanto o sistema contendo carvão ativado industrial não promoveu correção suficiente para atender ao padrão de potabilidade, os carvões produzidos nesta pesquisa elevaram o pH para valores compatíveis com a legislação, destacando-se o desempenho do material produzido em laboratório.

Esse comportamento está relacionado às características adquiridas durante a ativação química com hidróxido de sódio, etapa discutida no item 5.1. O controle das condições de produção em laboratório provavelmente favoreceu a formação de grupos superficiais capazes de influenciar o equilíbrio ácido-base da água durante o processo de filtração.

A correção do pH representa um resultado particularmente relevante para a aplicação da tecnologia em águas naturalmente ácidas, condição frequente em diversos mananciais amazônicos. Além de atender ao padrão legal, o carvão ativado produzido em laboratório apresentou valor próximo da neutralidade, favorecendo a qualidade da água tratada.

Segundo Bansal e Goyal (2005) e Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006), as propriedades químicas desenvolvidas durante a ativação influenciam diretamente a interação entre o adsorvente e a solução aquosa, podendo modificar o comportamento do pH conforme a composição superficial do material. Os resultados obtidos nesta pesquisa apresentam comportamento compatível com essas observações.

5.3.5 Dureza Total

A dureza total está associada principalmente à presença de íons cálcio e magnésio dissolvidos na água. Embora não represente, por si só, um risco à saúde, concentrações elevadas podem favorecer incrustações em tubulações e interferir em diversos usos da água (Libânio, 2018).

A água bruta apresentou dureza total de 20 mg/L CaCO₃, valor considerado baixo. Após a filtração, esse parâmetro não foi detectado em nenhum dos sistemas avaliados, correspondendo à remoção integral da dureza nas condições experimentais.

Como os três sistemas apresentaram comportamento idêntico, não foram observadas diferenças de desempenho entre o carvão ativado industrial, o carvão ativado laboratorial e o carvão ativado artesanal. Esse resultado indica que a remoção da pequena quantidade de íons presentes ocorreu de maneira semelhante em todos os filtros, possivelmente em razão da baixa concentração inicial do parâmetro.

Embora a Portaria GM/MS nº 888/2021 não estabeleça valor mínimo para dureza, a redução observada confirma que os sistemas filtrantes não promoveram aumento da concentração de sais dissolvidos, preservando uma característica desejável para águas destinadas ao consumo humano.

5.3.6 Coliformes totais e *Escherichia coli*

Os coliformes totais constituem um grupo de bactérias utilizado como indicador das condições higiênico-sanitárias da água. Sua ocorrência não está necessariamente relacionada à contaminação fecal recente, pois esse grupo inclui microrganismos encontrados em diferentes ambientes. A *Escherichia coli* integra esse grupo e apresenta maior especificidade como indicador de contaminação fecal. Por essa razão, sua detecção é utilizada na avaliação da qualidade microbiológica da água destinada ao consumo humano. A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece a ausência de *E. coli* em 100 mL de água para consumo humano.

Na água bruta, foram detectados coliformes totais e *E. coli*. Após a filtração, os coliformes totais permaneceram presentes nos sistemas contendo carvão ativado industrial (CAI) e carvão ativado produzido em laboratório (CAL). No sistema com carvão ativado artesanal (CAA), esse grupo não foi detectado. Para *E. coli*, o comportamento foi diferente: as amostras dos três sistemas apresentaram resultado de ausência após a filtração.

A leitura conjunta desses resultados é importante, uma vez que *E. coli* faz parte do grupo dos coliformes totais. Assim, a presença de coliformes totais nas amostras dos sistemas CAI e CAL, mesmo sem detecção de *E. coli*, indica que outros microrganismos desse grupo permaneceram na água após a passagem pelo filtro. No sistema CAA, tanto os coliformes totais quanto *E. coli* apresentaram resultado de ausência nas condições em que o ensaio foi realizado.

A ausência de *E. coli* nas amostras filtradas não deve ser atribuída exclusivamente ao carvão ativado. O sistema utilizado combina diferentes materiais e mecanismos de tratamento. As camadas minerais participam da retenção física de partículas, enquanto o carvão ativado acrescenta ao sistema propriedades relacionadas à sua estrutura porosa e aos processos de adsorção. O resultado observado, portanto, decorre do funcionamento do conjunto e das condições experimentais adotadas.

Os dados microbiológicos também evidenciam uma limitação do sistema. A permanência de coliformes totais após a filtração com CAI e CAL mostra que a passagem da água pelas camadas filtrantes não foi suficiente para atender integralmente aos requisitos microbiológicos aplicáveis à água destinada ao consumo humano. Mesmo nos ensaios em que não houve detecção dos microrganismos avaliados, o resultado se refere às condições experimentais e aos parâmetros analisados, não sendo suficiente para afirmar a potabilidade da água.

O sistema proposto deve, portanto, ser compreendido como uma etapa de tratamento simplificado destinada à melhoria da qualidade da água. Para fins de consumo humano, sua utilização requer uma etapa complementar de desinfecção, como a cloração ou outro procedimento adequado. Essa limitação não reduz sua utilidade como tecnologia social e recurso educacional; ao contrário, permite discutir, no ensino de Ciências Ambientais, as diferentes etapas envolvidas no tratamento da água e os critérios necessários para que ela seja considerada segura para consumo.

5.3.7 Síntese do desempenho dos sistemas filtrantes

A análise integrada dos resultados demonstra que os sistemas filtrantes desenvolvidos apresentaram desempenho satisfatório na melhoria da qualidade da água. Todos promoveram

reduções expressivas da turbidez, dos sólidos totais e da cor aparente, além da remoção de *Escherichia coli* e da correção do pH nos sistemas contendo carvão ativado produzido em laboratório e artesanal.

Os resultados também evidenciam a relação entre as características estruturais observadas por microscopia eletrônica de varredura e o desempenho dos materiais durante a filtração. O maior desenvolvimento da rede porosa observado no carvão ativado laboratorial refletiu diretamente na eficiência de remoção de compostos responsáveis pela cor da água e no ajuste do potencial hidrogeniônico, confirmando a influência das etapas de ativação química e carbonização discutidas no item 5.1.

Embora o carvão ativado industrial tenha apresentado desempenho ligeiramente superior em alguns parâmetros, as diferenças observadas foram reduzidas e, sob o ponto de vista prático, não comprometem a eficiência do material desenvolvido nesta pesquisa. Em relação à cor aparente, inclusive, o carvão ativado laboratorial apresentou desempenho superior ao adsorvente comercial, evidenciando o potencial da metodologia empregada para produção de materiais carbonáceos de elevado desempenho.

Outro aspecto relevante refere-se à utilização do caroço de açaí como matéria-prima. Além da ampla disponibilidade desse resíduo na região Amazônica, o processo desenvolvido permitiu produzir um adsorvente eficiente utilizando equipamentos acessíveis e procedimentos passíveis de adaptação para diferentes contextos, ampliando as possibilidades de aplicação em comunidades com limitações de infraestrutura.

Em conjunto, os resultados confirmam que a tecnologia proposta representa uma alternativa tecnicamente viável para sistemas simplificados de tratamento de água. Embora não substitua integralmente processos convencionais de potabilização, especialmente quanto à desinfecção final, apresenta elevado potencial para redução da carga de contaminantes e melhoria das características físico-químicas da água, contribuindo para ampliar o acesso a soluções de baixo custo em regiões com vulnerabilidade no abastecimento.

5.4 Relação entre a estrutura porosa e o desempenho dos sistemas filtrantes

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que o desempenho dos sistemas filtrantes está diretamente relacionado às modificações estruturais promovidas durante a produção do carvão ativado. A análise integrada dos processos de carbonização e ativação química (item 5.1), da caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura (item 5.2) e dos ensaios de qualidade da água (item 5.3) permitiu estabelecer uma relação

consistente entre o desenvolvimento da estrutura porosa e a eficiência observada na remoção dos contaminantes.

As micrografias evidenciaram uma evolução progressiva da superfície carbonácea entre as amostras CNA, CAA e CAL. O carvão não ativado apresentou estrutura relativamente compacta e reduzida quantidade de cavidades, enquanto as amostras ativadas desenvolveram superfície mais rugosa, maior número de poros e melhor conectividade entre as cavidades. Essas modificações resultam da remoção de compostos voláteis durante a ativação química, processo responsável pela abertura da estrutura interna do material e pelo aumento da área superficial disponível para adsorção (Marsh; Rodríguez-Reinoso, 2006).

A influência dessa evolução estrutural tornou-se evidente durante os ensaios de filtração. O carvão ativado produzido em laboratório apresentou desempenho muito próximo ao material comercial na remoção da turbidez e dos sólidos totais, além de maior eficiência na redução da cor aparente e na correção do pH. Esses resultados indicam que o aumento da área superficial e da disponibilidade de sítios ativos favoreceu a interação entre o adsorvente e os contaminantes presentes na água, potencializando o desempenho do sistema filtrante.

Entretanto, os resultados também demonstram que a eficiência do filtro não depende exclusivamente do carvão ativado. Os ensaios preliminares realizados durante a montagem do sistema mostraram que as camadas de areia e cascalho já promoviam redução significativa da turbidez, evidenciando a importância da retenção física das partículas de maior granulometria. A incorporação do carvão ativado complementou esse processo, contribuindo principalmente para a remoção de partículas finas, matéria orgânica dissolvida e compostos responsáveis pela coloração da água. Dessa forma, o desempenho observado resulta da atuação integrada entre filtração mecânica e adsorção.

A literatura descreve que a eficiência dos carvões ativados está relacionada não apenas à área superficial específica, mas também à organização da rede porosa. Microporos concentram a maior parte dos sítios adsorventes, os mesoporos facilitam a difusão interna dos contaminantes e os macroporos funcionam como vias de acesso ao interior da estrutura carbonácea (Rouquerol *et al.*, 2014). As características observadas nas micrografias do carvão ativado laboratorial indicam uma organização compatível com esse modelo estrutural, justificando o desempenho obtido nos ensaios experimentais.

Outro aspecto relevante refere-se às propriedades químicas desenvolvidas durante a ativação com hidróxido de sódio. Além de favorecer o desenvolvimento da porosidade, esse tratamento modifica grupos funcionais presentes na superfície do carvão ativado, ampliando sua capacidade de interação com diferentes grupos químicos dissolvidos na água. Esse

comportamento contribui para explicar a remoção integral da dureza e a elevação do pH observadas nos sistemas contendo carvões produzidos nesta pesquisa, embora esses processos também sejam influenciados pelas características da água bruta e pelas condições de operação do filtro (Bansal; Goyal, 2005; Mohan; Pittman Jr., 2007).

A comparação entre os resultados de microscopia e os ensaios de qualidade da água evidencia uma relação de causa e efeito entre as etapas desenvolvidas ao longo desta pesquisa. As modificações estruturais promovidas pela ativação química aumentaram a área superficial e a conectividade da rede porosa, refletindo diretamente na eficiência dos sistemas filtrantes. Assim, a melhoria observada na qualidade da água não pode ser atribuída a um único mecanismo, mas à combinação entre retenção física promovida pelas camadas minerais e adsorção desenvolvida pelo carvão ativado.

Essa integração constitui uma das principais contribuições deste estudo. Além de demonstrar a viabilidade técnica da utilização do caroço de açaí como precursor de carvão ativado, os resultados mostram que o processo de produção desenvolvido foi capaz de gerar um material com desempenho próximo ao carvão ativado comercial e superior na remoção da cor aparente. Considerando a ampla disponibilidade dessa biomassa na Amazônia, sua transformação em adsorvente de elevado desempenho representa uma alternativa promissora para sistemas simplificados e descentralizados de tratamento de água, conciliando valorização de resíduos agroindustriais, sustentabilidade e aplicação em tecnologias sociais.

5.5 Comparação dos resultados com estudos da literatura

Os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam o potencial do caroço de açaí como matéria-prima para produção de carvões ativados destinados ao tratamento de água. As eficiências observadas para os parâmetros físico-químicos e microbiológicos situam-se dentro da faixa reportada em estudos desenvolvidos com biomassas lignocelulósicas, demonstrando que o material produzido apresentou comportamento compatível com adsorventes obtidos por diferentes metodologias.

As análises por microscopia eletrônica de varredura mostraram que a ativação química promoveu alterações significativas na estrutura carbonácea, com aumento da rugosidade superficial, formação de cavidades e maior conectividade entre os poros. Essas modificações acompanharam a melhoria do desempenho dos sistemas filtrantes, evidenciando a relação entre a evolução da estrutura porosa e a eficiência observada nos ensaios de qualidade da água. Esse comportamento é coerente com os modelos descritos por Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006),

Rouquerol *et al.* (2014) e Devi *et al.* (2023), que relacionam o desenvolvimento da porosidade ao aumento da capacidade adsorviva dos materiais carbonáceos.

Os resultados obtidos para turbidez, sólidos totais, cor aparente e pH apresentaram comportamento semelhante ao reportado por Sousa (2019), Silva *et al.* (2023) e Vieira *et al.* (2024). Entretanto, o presente estudo acrescenta uma perspectiva mais ampla ao reunir, em um único modelo experimental, a produção do adsorvente, sua caracterização morfológica e a avaliação do desempenho do sistema filtrante, permitindo interpretar de forma integrada a influência da ativação química sobre a qualidade da água tratada.

A comparação entre os resultados desta pesquisa e aqueles disponíveis na literatura é apresentada na tabela 6, que sintetiza as principais convergências observadas e evidencia os avanços alcançados por esta investigação.

Tabela 6 - Comparação entre os resultados obtidos nesta pesquisa e estudos da literatura envolvendo carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí.

Estudo	Biomassa	Principais resultados	Limitações / Escopo	Contribuição da presente pesquisa
Sousa (2019)	Caroço de açaí	Produção de carvão ativado e elevada adsorção de azul de metileno; desenvolvimento da porosidade após ativação química.	Ênfase na caracterização do adsorvente e em ensaios de adsorção.	Correlação entre a estrutura observada por MEV e o desempenho do sistema filtrante na melhoria da qualidade da água.
Silva et al. (2023)	Caroço de açaí	Redução da turbidez, cor aparente e carga microbiológica utilizando carvão ativado.	Não avaliou diferentes métodos de produção do carvão ativado.	Comparação entre CNA, CAA, CAL e CAI, permitindo analisar a influência do processamento sobre a eficiência da filtração.
Vieira et al. (2024)	Caroço de açaí	Aplicação de carvão granular ativado no tratamento de água com melhorias físico-químicas.	Ênfase na aplicação do adsorvente.	Integração entre produção do carvão, caracterização morfológica, mecanismos de adsorção e desempenho do sistema filtrante.
Presente pesquisa (2026)	Caroço de açaí	Elevada eficiência na redução da turbidez, cor aparente, sólidos totais, correção do pH, remoção da dureza e eliminação de <i>Escherichia coli</i> . Desempenho do CAL próximo ao CAI e superior na remoção da cor aparente.	Sistema simplificado, dependente de desinfecção complementar para potabilidade microbiológica completa.	Integração entre produção do adsorvente, comparação de diferentes métodos de ativação, caracterização por MEV e avaliação físico-química e microbiológica da água, demonstrando a relação entre estrutura porosa e desempenho dos sistemas filtrantes.

Fonte: Adaptado de Sousa (2019), Silva *et al.* (2023), Vieira *et al.* (2024) e dados da pesquisa do autor.

A comparação sintetizada na tabela 6 demonstra que os resultados obtidos são consistentes com aqueles descritos na literatura para carvões ativados produzidos a partir do caroço de açaí. Ao mesmo tempo, evidencia o diferencial metodológico desta pesquisa, que permitiu acompanhar todo o processo, desde a produção do adsorvente até sua aplicação em um sistema simplificado de tratamento de água. Essa abordagem possibilitou estabelecer uma

relação direta entre as modificações estruturais promovidas pela ativação química e o desempenho observado durante a filtração.

Outro aspecto que merece destaque é o desempenho do carvão ativado produzido artesanalmente. Embora inferior ao material obtido em laboratório, o adsorvente promoveu melhorias expressivas na qualidade da água utilizando um processo de produção simplificado. Esse resultado amplia as possibilidades de aplicação da tecnologia em comunidades com acesso restrito à infraestrutura laboratorial, preservando boa parte da eficiência observada nos sistemas convencionais de produção.

No aspecto microbiológico, a eliminação de *Escherichia coli* confirma o potencial do sistema para reduzir a contaminação da água. A permanência de coliformes totais, entretanto, indica que a filtração deve ser associada a uma etapa complementar de desinfecção quando destinada ao consumo humano. Essa interpretação está de acordo com Silva *et al.* (2023), Crittenden *et al.* (2012) e com os critérios estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Além da eficiência técnica, a pesquisa apresenta relevância ambiental ao propor o aproveitamento de um resíduo abundante na Amazônia para produção de um material adsorvente de elevado desempenho. Essa estratégia contribui para a valorização de resíduos agroindustriais, fortalece princípios de economia circular e amplia as possibilidades de adoção de tecnologias de baixo custo voltadas ao tratamento descentralizado de água.

Em síntese, a comparação com a literatura demonstra que os resultados obtidos não apenas corroboram o potencial do carvão ativado de caroço de açaí descrito em estudos anteriores, mas também ampliam esse conhecimento ao integrar caracterização morfológica, mecanismos de adsorção e desempenho dos sistemas filtrantes em uma mesma investigação. Essa abordagem permitiu compreender, de forma consistente, como as alterações estruturais promovidas pela ativação química influenciaram a melhoria da qualidade da água, constituindo a principal contribuição científica desta dissertação.

5.6 Adequação da Proposta à realidade socioambiental amazônica

Os resultados obtidos demonstram que a tecnologia desenvolvida apresenta potencial de aplicação em comunidades amazônicas com acesso limitado a sistemas convencionais de abastecimento. A eficiência observada nos ensaios de filtração, associada ao uso de uma biomassa abundante na região, evidencia a viabilidade do sistema como alternativa para iniciativas locais de tratamento da água.

O aproveitamento do caroço de açaí representa um dos principais diferenciais da proposta. Além de agregar valor a um resíduo amplamente disponível, sua utilização contribui para reduzir impactos associados ao descarte inadequado e fortalece estratégias de aproveitamento sustentável de recursos regionais.

Outro aspecto favorável é a simplicidade do sistema filtrante. Os materiais empregados são facilmente encontrados e a montagem pode ser realizada com recursos acessíveis. Embora o carvão ativado produzido em laboratório tenha apresentado melhor desempenho, os resultados obtidos com o carvão produzido artesanalmente demonstram que processos simplificados também podem gerar adsorventes eficientes, ampliando as possibilidades de aplicação da tecnologia em diferentes contextos.

Os ensaios realizados indicam que o sistema promove melhorias expressivas na qualidade da água, com redução da turbidez, da cor aparente, dos sólidos totais, correção do pH e remoção de *Escherichia coli*. A permanência de coliformes totais, entretanto, demonstra que a filtração deve ser associada a uma etapa complementar de desinfecção quando destinada ao consumo humano. Essa limitação não compromete a proposta, mas delimita adequadamente seu campo de aplicação.

Sob o ponto de vista ambiental, a tecnologia está alinhada aos princípios da economia circular ao transformar um resíduo agroindustrial em um material de maior valor agregado. Simultaneamente, estimula o aproveitamento de recursos locais e reduz a geração de passivos ambientais decorrentes do descarte do caroço de açaí.

Além da aplicação no tratamento da água, o sistema apresenta potencial para utilização em atividades de ensino, extensão e educação ambiental. Sua construção simples favorece o emprego em escolas e projetos comunitários, contribuindo para a difusão de conhecimentos relacionados à qualidade da água, sustentabilidade e valorização de resíduos.

Em síntese, a tecnologia proposta reúne baixo custo, simplicidade operacional e desempenho compatível com os objetivos estabelecidos nesta pesquisa. Essas características reforçam seu potencial como tecnologia social voltada à melhoria da qualidade da água em comunidades amazônicas, desde que associada ao monitoramento da água tratada e, quando necessário, a procedimentos complementares de desinfecção.

5.7 Limitações da pesquisa e perspectivas de aperfeiçoamento

A interpretação dos resultados apresentados nesta pesquisa deve considerar as condições em que o estudo foi desenvolvido. Embora os ensaios tenham demonstrado o potencial do carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí, algumas limitações

metodológicas delimitam o alcance das conclusões e apontam possibilidades de aprofundamento em estudos futuros.

Uma das principais restrições refere-se ao número de ensaios de qualidade da água. Em razão de limitações operacionais e financeiras, foram realizados 5 ensaios completos para cada filtro, quantidade suficiente para identificar tendências consistentes de desempenho entre os sistemas avaliados. Entretanto, a ampliação desse conjunto amostral permitirá a aplicação de análises estatísticas mais robustas e maior confiabilidade na extrapolação dos resultados.

A caracterização do carvão ativado também pode ser aprofundada. As análises por microscopia eletrônica de varredura permitiram compreender a evolução morfológica da superfície do material, porém técnicas complementares, como determinação da área superficial específica pelo método BET, espectroscopia para identificação de grupos funcionais e ensaios de capacidade adsorptiva, poderão ampliar a compreensão dos mecanismos responsáveis pela remoção dos contaminantes. Outro aspecto ainda não investigado refere-se ao comportamento do adsorvente durante o uso contínuo. Não foram realizados ensaios de saturação, regeneração ou perda de eficiência ao longo de sucessivos ciclos de filtração, impossibilitando estimar a vida útil do material e definir critérios técnicos para sua substituição em aplicações práticas.

Do ponto de vista microbiológico, a permanência de coliformes totais após a filtração demonstra que o sistema não deve ser empregado como etapa única de potabilização. Dessa forma, pesquisas futuras poderão avaliar sua associação com processos complementares de desinfecção, como cloração, radiação ultravioleta ou desinfecção solar, ampliando a segurança sanitária da água produzida.

Também se mostra pertinente investigar o desempenho do sistema sob diferentes condições operacionais, incluindo variações na qualidade da água bruta, granulometria do carvão ativado, espessura das camadas filtrantes, vazão e tempo de contato. A avaliação desses fatores poderá contribuir para a otimização do filtro e ampliar sua aplicabilidade em diferentes contextos de utilização.

As perspectivas identificadas convergem com os princípios da Solução Alternativa Coletiva Simplificada de Tratamento de Água com Zeólita (SALTA-z), desenvolvida pela Fundação Nacional de Saúde (Funasa) para ampliar o acesso à água tratada em pequenas comunidades não atendidas por sistemas convencionais de abastecimento. A tecnologia caracteriza-se pela simplicidade de implantação, operação e manutenção e pelo baixo custo, tendo sido empregada inclusive em comunidades ribeirinhas da Amazônia (Funasa, 2018). Embora a SALTA-z e o sistema desenvolvido nesta pesquisa apresentem configurações, materiais filtrantes e processos de tratamento distintos, ambos partem da perspectiva de

utilização de soluções simplificadas e adequadas às condições locais para ampliar o acesso à água de melhor qualidade.

Nesse contexto, o presente estudo acrescenta uma alternativa baseada no aproveitamento do caroço de açaí como material adsorvente, valorizando um resíduo abundante na Amazônia e ampliando o conjunto de tecnologias passíveis de aplicação em sistemas simplificados de tratamento de água. Os resultados obtidos indicam que a utilização desse material apresenta potencial para integrar futuras soluções voltadas às condições socioambientais da região, desde que novos estudos confirmem seu desempenho em escala piloto e em condições reais de operação.

5.8 Contribuições do produto educacional para a educação ambiental e os objetivos do desenvolvimento sustentável

Os resultados obtidos ao longo desta pesquisa demonstram que o sistema filtrante desenvolvido ultrapassa sua função como alternativa para melhoria da qualidade da água. A simplicidade construtiva, o emprego de materiais de fácil obtenção e a utilização de um resíduo regional como matéria-prima conferem ao produto educacional potencial para utilização em atividades de ensino voltadas à compreensão integrada de temas relacionados aos recursos hídricos, ao reaproveitamento de resíduos e às tecnologias ambientais.

Diferentemente de modelos experimentais restritos ao ambiente laboratorial, a proposta desenvolvida possibilita a aproximação entre conceitos científicos e problemas vivenciados pelas comunidades amazônicas. A construção e a utilização do filtro favorecem abordagens interdisciplinares, permitindo relacionar conteúdos de Química, Biologia, Ciências Ambientais e Educação Ambiental a situações concretas do cotidiano, fortalecendo processos de aprendizagem baseados na investigação e na resolução de problemas.

Sob essa perspectiva, o produto educacional apresenta convergência com os princípios da Educação para o Desenvolvimento Sustentável ao estimular o uso responsável dos recursos naturais e a valorização de soluções tecnológicas adaptadas às características regionais. Essa abordagem também dialoga diretamente com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável propostos pela Organização das Nações Unidas, especialmente o ODS 4 (Educação de Qualidade), ao favorecer práticas pedagógicas contextualizadas; o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao incentivar a discussão sobre o acesso à água de melhor qualidade; o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), por promover o aproveitamento de resíduos

agroindustriais; e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao estimular estratégias de uso sustentável dos recursos naturais e redução de impactos ambientais.

Nesse contexto, o produto educacional desenvolvido não se limita à demonstração do funcionamento de um sistema filtrante. Sua principal contribuição consiste em integrar conhecimento científico, valorização de recursos amazônicos e formação ambiental crítica, ampliando as possibilidades de utilização da tecnologia em ações de ensino, extensão universitária e educação ambiental voltadas às diferentes realidades da região.

6 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como propósito investigar a utilização do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*) como precursor para produção de carvão ativado aplicado ao tratamento simplificado da água. O conjunto de procedimentos experimentais adotados permitiu acompanhar todas as etapas do processo, desde a obtenção do adsorvente até a avaliação de seu desempenho na melhoria da qualidade da água.

A caracterização morfológica demonstrou que a ativação química alterou significativamente a superfície do material. O aumento da rugosidade, o aparecimento de cavidades e a formação de uma estrutura porosa mais desenvolvida constituíram evidências consistentes das modificações promovidas durante a produção do carvão ativado. Essas observações forneceram suporte para interpretar o comportamento do material durante os ensaios de filtração.

Os resultados obtidos confirmaram que essas alterações estruturais foram acompanhadas por melhorias no desempenho do sistema. Entre os materiais avaliados, o carvão ativado produzido em laboratório apresentou comportamento semelhante ao carvão ativado industrial para a maior parte dos parâmetros analisados e desempenho superior na remoção da cor aparente. Também foram observadas reduções expressivas da turbidez, dos sólidos totais e da dureza, além da correção do pH e da eliminação de *Escherichia coli*.

A permanência de coliformes totais merece uma interpretação específica. Embora o sistema tenha contribuído para a melhoria microbiológica da água, esse resultado demonstra que a filtração, isoladamente, não atende aos requisitos necessários para caracterizar um processo completo de potabilização. A utilização do filtro deve, portanto, ser associada a métodos complementares de desinfecção quando destinada ao consumo humano.

Uma das questões centrais desta pesquisa consistiu em verificar a influência da ativação química sobre o desempenho do adsorvente. A comparação entre o carvão não ativado, o carvão ativado artesanal, o carvão ativado laboratorial e o carvão ativado industrial mostrou que a ativação representa uma etapa decisiva para o desenvolvimento das propriedades responsáveis pela adsorção. Ao mesmo tempo, o desempenho alcançado pelo carvão produzido artesanalmente demonstra que procedimentos simplificados também podem produzir materiais tecnicamente relevantes para determinadas aplicações.

Os objetivos inicialmente propostos foram atendidos. A produção do carvão ativado, a construção dos sistemas filtrantes, a caracterização morfológica e a avaliação dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos permitiram responder ao problema de pesquisa e estabelecer

relações consistentes entre as características estruturais do adsorvente e sua eficiência durante o tratamento da água.

Alguns resultados passaram a assumir maior importância à medida que a pesquisa foi sendo desenvolvida. A utilização de uma biomassa amplamente disponível na Amazônia, associada ao desempenho obtido nos ensaios experimentais, demonstra que resíduos agroindustriais podem ser incorporados ao desenvolvimento de tecnologias voltadas ao tratamento simplificado da água. Esse aspecto amplia a contribuição do estudo para além da produção do adsorvente, inserindo-o no contexto do aproveitamento sustentável de recursos regionais.

O produto educacional elaborado a partir da pesquisa reforça essa perspectiva. Sua aplicação permite integrar conhecimentos relacionados à qualidade da água, adsorção, reaproveitamento de resíduos e sustentabilidade em atividades de ensino, extensão e educação ambiental, aproximando conteúdos científicos de situações presentes na realidade amazônica e ampliando as possibilidades de utilização dos resultados produzidos.

As limitações identificadas durante a investigação definem oportunidades objetivas para sua continuidade. Estudos envolvendo caracterização físico-química complementar do adsorvente, avaliação da vida útil do carvão ativado, ensaios de regeneração, monitoramento do desempenho em longo prazo e testes em escala piloto poderão ampliar a compreensão sobre o comportamento do sistema e subsidiar futuras aplicações em condições reais de operação.

O conjunto de evidências produzido ao longo desta pesquisa demonstra que o carvão ativado obtido a partir do caroço de açaí apresenta desempenho compatível com sua utilização em sistemas simplificados de tratamento de água. A integração entre produção do adsorvente, caracterização morfológica, avaliação experimental e desenvolvimento de um produto educacional permitiu responder aos objetivos propostos e ampliar o conhecimento sobre o aproveitamento de biomassas amazônicas em tecnologias voltadas à melhoria da qualidade da água.

REFERÊNCIAS

- ACSELRAD, Henri. Ambientalização das lutas sociais: o caso do movimento por justiça ambiental. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 103–119, 2010. DOI: 10.1590/S0103-40142010000100010.
- ACSELRAD, Henri; MELLO, Cecília Campello do Amaral; BEZERRA, Gustavo das Neves. **O que é justiça ambiental**. Rio de Janeiro: Garamond, 2009. 160 p. ISBN 9788576171591.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Atlas Águas: segurança hídrica e saneamento**. Brasília, DF: ANA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024: informe anual**. Brasília, DF: 2024.
- AHMAD, Mahtab; RAJAPAKSHA, Anushka Upamali; LIM, Jung Eun; ZHANG, Ming; BOLAN, Nanthi; MOHAN, Dinesh; VITHANAGE, Meththika; LEE, Sang Soo; OK, Yong Sik. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19–33, 2014. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071.
- ARRUDA, Janaína de Cássia Braga *et al.* Farelo de caroço de açaí em ração para frangos de crescimento lento. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 48, n. 4, p. 298–303, 2018.
- ARRUDA, M.; BERTÉ, R. Tecnologias sociais e justiça ambiental: reflexões para a Amazônia. **Revista Desenvolvimento em Questão**, v. 21, n. 59, p. 9–32, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001: sistemas de gestão ambiental: requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro: 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM ISO 3310-1: peneiras de ensaio — requisitos técnicos e verificação — parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: 2004.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E11: Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. DOI: 10.1520/E0011-22.
- ALBUQUERQUE, Helder Neves de; CERQUEIRA, Joaci dos Santos; BATISTA, Abraão Romão. **Doenças de veiculação hídrica no contexto escolar**. Open Minds International Journal, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 82-100, 2021. DOI: 10.47180/omij.v2i1.102.
- ALMEIDA, A. V. da Costa *et al.* Revalorização do caroço de açaí em uma beneficiadora de frutos no estado do Pará. **GEPROS: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, v. 12, n. 4, 2017.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 24. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2023.

BAGATTOLLI, Carolina; PEZARICO, Giovanna. Tecnologia social: apropriações conceituais e implicações políticas. **InterAção**, Santa Maria, v. 16, n. 1, e90666, 2025. DOI: 10.5902/2357797590666. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/interacao/article/view/90666>. Acesso em: 20 fev. 2026.

BANSAL, R. C.; GOYAL, M. **Activated carbon adsorption**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

BATEDORES de açaí reclamam de coleta dos caroços em Belém. **G1 Pará. Bom Dia Pará**, Belém, 3 jul. 2024. Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/12728308/>. Acesso em: 11 ago. 2026.

BERKES, F. **Sacred ecology**. 2. ed. New York: Routledge, 2008.

BORDALO, Carlos Alexandre Leão. Pelo direito humano ao acesso à água potável na região das águas: uma análise da exclusão e do déficit dos serviços de abastecimento de água potável à população da Amazônia brasileira. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 25, n. 1, p. 261-284, 2022.

BRASIL **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Presidência da República, 1988.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, DF: MEC, 2018.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA)**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2025. Disponível em: <https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/dashboard?modulo=agua>. Acesso em: 10/02/2025.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico – SNISA. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2021**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual prático de análise de água**. 4.ed. Brasília, DF: FUNASA, 2013.

BRASIL Ministério da Saúde. **Manual de saneamento**. 4. ed. Brasília, DF: Funasa, 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual de saneamento**. 5. ed. Brasília, DF: Fundação Nacional de Saúde, 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual da solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano em pequenas comunidades utilizando filtro e dosador desenvolvidos pela Funasa (SALTA-z)**. Brasília, DF: Funasa, 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre 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.

CARNEIRO, Carla Renata de Oliveira; RIBEIRO, Hebe Morganne Campos. Ilha do Combu: um caso concreto sobre a qualidade da água na região insular de Belém do Pará, Brasil. **Revista DCS**, [local não identificado], v. 23, n. 90, e4824, 2026. DOI: 10.54899/dcs.v23i90.4824.

CARVALHO, Isabel Cristina de Moura. **Educação ambiental: a formação do sujeito ecológico**. 7. ed. São Paulo: Cortez, 2020.

CARVALHO, A. M. P.; GONÇALVES, A. M. **Ensino de ciências por investigação: fundamentos e práticas**. 2. ed. São Paulo: Cortez, 2022.

CARVALHO, L. B.; GONÇALVES, C. M. Ensino de ciências por investigação no ensino fundamental: desafios e possibilidades. **Práxis Educacional**, Vitoria da Conquista, v. 18, n. 46, p. 135–152, 2022.

CASTRO, César Nunes de; CEREZINI, Marcela Tavares da Silva. **Saneamento rural no Brasil: a universalização é possível?** Rio de Janeiro: Ipea, 2023 (Texto para Discussão, n. 2875).

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES). **Portaria nº 60, de 20 de março de 2019**. Dispõe sobre o mestrado e doutorado profissionais, no âmbito da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. Brasília, DF: CAPES, 2019.

CORDEIRO, J. **Estimativa de resíduos gerados na produção de açaí em Belém-PA**. Revista Amazônica de Ciências, 2021.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ (COSANPA). **Relatório anual de gestão 2022**. Belém: COSANPA, 2022. Disponível em: <https://www.cosanpa.pa.gov.br>. Acesso em: 20 jun. 2025.

CORRÊA, Luciara Bilhalva; HERNANDES, Juliana Carriconde; SANTOS, Cibele Velleda; SANTOS, Weslei Martins; COLARES, Gustavo Stolzenberg; CORRÊA, Érico Kunde. Análise social de um programa de coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 193–201, maio/ago. 2015. DOI: 10.5902/2236130818876.

CORREA, Homero Vilar; NASCIMENTO, Rosemery da Silva. Abordagem didática da temática água e sustentabilidade: uma imersão nos produtos educacionais do Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional para Ensino das Ciências Ambientais - Associada UFPA. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 368-385, 2024. DOI: 10.34024/revbea.2024.v19.15732.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. **MWH's Water Treatment: Principles and Design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

CRUZ, Fabyo. Cientistas paraenses transformam caroços de açaí em próteses, móveis, concreto e carvão vegetal. **O Liberal**, Belém, 6 mar. 2022. Disponível em: <https://www.oliberal.com/para/cientistas-paraenses-transformam-carocos-de-acai-em-proteses-moveis-concreto-e-carvao-vegetal-1.505264>. Acesso em: 5 jan. 2026.

DAGNINO, Renato. Tecnologia social: uma estratégia para o desenvolvimento. In: LASSANCE JÚNIOR, Antonio *et al.* (org.). **Tecnologia social: uma estratégia para o desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Fundação Banco do Brasil, 2004. p. 187–210.

DALTON, A. S. *et al.* Aproveitamento de resíduos agroindustriais: o caso do açaí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 223–230, 2010.

DALTON, P. *et al.* **Açaí: aspectos socioeconômicos e ambientais do seu cultivo e consumo**. Belém: UFPA, 2010.

DAMASCENA, Valdelson; COSTA, Francimara; PEREIRA, Cloves. Educação ambiental em escola ribeirinha e suas relações com as vivências da comunidade rural (Maués – Amazonas). **Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental**, v. 30, n. 4, 2025. DOI: 10.63595/ambeduc.v30i4.19226.

DEVI, P.; SONEKAR, M.; VERMA, P. Biomass-derived activated carbon for water purification: recent advances and future perspectives. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdã, v. 11, n. 5, 2023.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo; VOLTAN, Paulo Eduardo Nogueira. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3. ed. São Carlos, SP: LDiBe, 2017. 1296 p. ISBN 978-85-62324-05-5.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, 2008.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências. **Megadiversidade**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 113–123, 2005.

FERNANDES, Lara Santana; MARTINS, Bruna Giaretta; PAIXÃO, Juliana Lane; LUSTOZA, Lara Stela Mendes; LEITE, Daniel Mariano. Aproveitamento da semente de açaí para produção de bebida à base de café. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 19, n. 6, p. 510–515, nov./dez. 2011. DOI: 10.13083/reveng.v19i6.317.

FERREIRA, M. S.; SANTOS, F. S.; MONTEIRO, J. M. Compostagem do caroço de açaí e sua utilização como adubo orgânico. **Revista Agro@mbiente**, Boa Vista, v. 12, n. 1, p. 45–55, 2018.

FIORAVANTI, Carlos. Carço de açái: uma riqueza da biodiversidade amazônica com uso em vários setores da economia. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, ed. 323, jan. 2023. Disponível em: <https://namidia.fapesp.br/caroco-de-acai-uma-riqueza-da-biodiversidade-amazonica-com-uso-em-varios-setores-da-economia/414669>. Acesso em: 10 jan. 2026.

FRAXE, T. J. P. (Org.). **Comunidades ribeirinhas amazônicas: modos de vida e uso dos recursos naturais**. Manaus: EDUA, 2007.

FRAXE, Therezinha de Jesus Pinto. **Cultura cabocla-ribeirinha: mitos, lendas e transculturalidade**. São Paulo: Annablume, 2004.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. 18. ed. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

FREIRE, P. **Pedagogia do oprimido**. 50. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2011.

FREITAS, Luciane Albernaz de Araujo; FREITAS, André Luis Castro de. A crise socioambiental: uma crise civilizatória. **REMEA – Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, Rio Grande, v. 31, n. 1, p. 24–40, jan./jun. 2014. DOI: 10.14295/remea.v31i1.4372. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/remea/article/view/4372>. Acesso em: 11 ago. 2026.

FUNDAÇÃO BANCO DO BRASIL. **Tecnologia social e políticas públicas**. Brasília, DF: Fundação Banco do Brasil, 2013.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de análise da água**. 3. ed. Brasília, DF: FUNASA, 2018a.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de tecnologias alternativas para tratamento de água**. 3. ed. Brasília, DF: FUNASA, 2018b.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual prático de vigilância da qualidade da água para consumo humano**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2018c.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOLDSTEIN, Joseph I.; NEWBURY, Dale E.; MICHAEL, Joseph R.; RITCHIE, Nicholas W. M.; SCOTT, John Henry J.; JOY, David C. **Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis**. 4. ed. New York: Springer, 2018. 550 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-6676-9. ISBN 978-1-4939-6674-5.

GUIMARÃES, M. Educação ambiental crítica. In: LAYRARGUES, P. P. (org.). **Identidades da educação ambiental brasileira**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2004. p. 25–34.

GRAMSCI, Antonio. **O rato e a montanha**. Ilustrações de Laia Domènech. Tradução de Thaisa Burani e Luiz Sérgio Henriques. São Paulo: Boitatá, 2019. 44 p. ISBN 978-85-7559-617-3.

GRÜN, M. **Ética e educação ambiental: a conexão necessária**. Campinas: Papirus, 1996.

GUIMARÃES, M. **Educação ambiental: uma via para a cidadania**. São Paulo: Cortez, 2004.

GUERRA, Gutemberg Armando Diniz. Eidorfe Moreira e o aspecto insular de Belém. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, Belém, v. 10, n. 3, p. 583–589, set./dez. 2015. DOI: 10.1590/1981-81222015000300004.

GUO, J.; LU, C. Preparation of microporous activated carbon from pistachio shell by zinc chloride activation. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 68, n. 2, p. 171–175, 1999.

HELLER, L.; REZENDE, S. **Saneamento e saúde: fundamentos para políticas públicas sustentáveis**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

HERREID, C. F. What makes a good case? **Journal of College Science Teaching**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 163–169, 1998.

HISSA, C. E. V. (Org.). **Saberes ambientais: desafios para o conhecimento disciplinar**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022: características dos domicílios e dos moradores: resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: Panorama do Censo 2022 – IBGE. Acesso em: 25/03/2025.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Área de Proteção Ambiental (APA)**. Brasília, DF: ICMBio, 2026. Disponível em: Página oficial sobre Área de Proteção Ambiental – ICMBio. Acesso em: 1 set. 2026.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Avanços do novo marco legal do saneamento básico no Brasil – 2023 (SNISA 2021)**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2023. Disponível em: Avanços do Novo Marco Legal do Saneamento Básico no Brasil – 2023 (SNISA 2021). Acesso em: 01/03/2026.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). **Compendium of chemical terminology (the Gold Book)**. 5. ed. Version 5.0.0. Research Triangle Park: IUPAC, 2025. DOI: 10.1351/goldbook.

IOANNIDOU, O.; ZABANIOTOU, A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 11, n. 9, p. 1966–2005, 2007. DOI: 10.1016/j.rser.2006.03.013.

JACOBI, Pedro Roberto. Educação, meio ambiente e cidadania: perspectivas para um desenvolvimento sustentável. **Educação & Sociedade**, São Paulo, v. 43, e0220055, 2022a.

JACOBI, Pedro Roberto. Governança da água, participação e aprendizagem social: desafios para a sustentabilidade. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 25, p. 1–18, 2022b. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc>. Acesso em: 20 jun. 2025.

JUNK, Wolfgang J.; PIEDADE, Maria Teresa Fernandez; SCHÖNGART, Jochen; COHN-HAFT, Mario; ADENEY, J. Marion; WITTMANN, Florian. A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, [S.l.], v. 31, n. 4, p. 623–640, 2011. DOI: 10.1007/s13157-011-0190-7.

LEFF, E. **Epistemologia ambiental**. 7. ed. São Paulo: Cortez, 2022.

LEFF, Enrique. **Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder**. 12. ed. Petrópolis: Vozes, 2022. (Confirmar se esta é a edição utilizada.)

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4. ed. Campinas: Átomo, 2016.

LIMA, G. M.; COSTA, H. R. Filtração doméstica como prática investigativa no ensino de ciências. **Revista Ensino em Perspectiva**, v. 6, n. 1, 2022. p. 88-101.

LIMA, M. C. *et al.* Farelo de caroço de açaí na alimentação de frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 501–507, 2009.

LIMA, G. M.; COSTA, H. R. Filtração doméstica como prática investigativa no ensino de ciências. **Ensino em Perspectiva**, Fortaleza-CE, v. 6, n. 1, p. 88–101, 2022.

LOPES, M. G.; CARVALHO, A. M. P. Ensino de ciências por investigação e protagonismo estudantil na Amazônia. **Revista Amazônica de Educação em Ciências**, Belém-PA, v. 5, n. 2, p. 88–102, 2023.

LOPES, M. R.; CARVALHO, D. S. Ciências no território: ensino contextualizado e protagonismo estudantil na Amazônia. **Revista Amazônia Educacional**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 44–63, 2023.

LOPES, Raphael Freitas Correia. Educação Ambiental: aprendizagem significativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS E SABERES MULTIDISCIPLINARES, 1., 2022, Volta Redonda, RJ. **Anais [...]**. Volta Redonda, RJ: UniFOA, 2022. p. 1–9. DOI: 10.47385/tudoeciencia.29.2022.

LOUREIRO, Carlos Frederico Bernardo. **Educação ambiental e movimentos sociais na construção da cidadania ecológica**. São Paulo: Cortez, 2004.

LUA, Aik Chong; YANG, Ting. Effect of activation temperature on the textural and chemical properties of potassium hydroxide activated carbon prepared from pistachio-nut shell. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 274, n. 2, p. 594–601, 2004. DOI: 10.1016/j.jcis.2003.10.001.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. ISBN 978-85-9702-656-6.

MARSH, H.; RODRÍGUEZ-REINOSO, F. **Activated carbon**. Amsterdam: Elsevier, 2006.

MARTO, Denis Rodrigo; PALMIERI, Maria Luísa Bonazzi. Environmental Education at school with a focus on water resources: teaching concepts and practices. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 19, 2024. DOI: 10.34024/revbea.2024.v19.16294.

MEDEIROS, Adaelson Campelo; LIMA, Marcelo de Oliveira; GUIMARÃES, Raphael Mendonça. Avaliação da qualidade da água de consumo por comunidades ribeirinhas em áreas de exposição a poluentes urbanos e industriais nos municípios de Abaetetuba e Barcarena no estado do Pará, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 695–708, mar. 2016. DOI: 10.1590/1413-81232015213.26572015.

MENDONÇA, A. L. P. As águas da região Norte brasileira e a luta das comunidades ribeirinhas pelo direito de acesso à água potável. **Revista do Direito Público**, Londrina, v. 18, n. 2, p. 187-204, 2023.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (org.). **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 18. ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2001.

MOHAN, Dinesh; PITTMAN JR., Charles U. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents: a critical review. **Journal of Hazardous Materials**, [S.l.], v. 142, n. 1–2, p. 1–53, 2007. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.006.

MORAES, A. T.; LOPES, C. J.; SILVA, M. B. Carvão ativado de caroço de açaí como meio filtrante: uma solução sustentável para o tratamento de água doméstica. **Revista de Tecnologia Aplicada**, Belém, v. 11, n. 2, p. 97–109, 2023.

MORAES, R. S. *et al.* Potencial do carvão ativado de caroço de açaí para tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 1, p. 1–12, 2023.

MOREIRA, Eidorfe. Belém e sua expressão geográfica. In: MOREIRA, Eidorfe. **Obras reunidas de Eidorfe Moreira**. Belém: CEJUP; Conselho Estadual de Cultura, 1989. v. 1.

NASCIMENTO, W. M. O. **O açaí (*Euterpe Oleracea Mart.*)**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2008.

NOGUEIRA, M. N. L.; SOUZA, Leandro de Oliveira. Educação ambiental: um estudo de caso em uma comunidade ribeirinha do Amazonas. **Ensino em Re-Vista**, v. 26, n. 2, p. 320-344, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/er-v26n2a2019-2>.

NOGUEIRA, O. L. *et al.* **Açaí**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2005.

OLIVEIRA, J. M.; MELO, C. L. Educação contextualizada e saberes tradicionais: desafios do ensino de ciências na Amazônia. **Revista Educação e Fronteiras**, [local a confirmar], v. 17, n. 3, p. 312–329, 2022.

OLIVEIRA, M. A.; MELO, M. F. Saberes ribeirinhos e educação contextualizada: caminhos para a valorização da cultura amazônica. **Revista Educação e Interculturalidade**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 88–101, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Nova York: Organização das Nações Unidas, 2015.

PEREIRA, A. R. *et al.* Carvão ativado de resíduos orgânicos: uma alternativa viável na purificação da água. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 17, n. 2, p. 215–224, 2022.

PEREIRA, D. F. *et al.* Adsorptive properties of açai seed activated carbon. **Journal of Water Process Engineering**, [S.l.], v. 47, 102662, 2022.

POJO, Eliana Campos; ELIAS, Lina Gláucia Dantas; VILHENA, Maria de Nazaré. As águas e os ribeirinhos: beirando sua cultura e margeando seus saberes. **Margens: Revista Interdisciplinar**, [S.l.], v. 8, n. 11, p. 176–198, 2014. DOI: 10.18542/rmi.v8i11.3249.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 276 p. ISBN 978-85-7717-158-3. Disponível em: <https://www.feevale.br/institucional/editora-feevale/metodologia-do-trabalho-cientifico---2-edicao>. Acesso em: 11 ago. 2025.

ROGEZ, Hervé. **Açaí: preparo, composição e melhoramento da conservação**. Belém: EDUFPA, 2000.

ROSA, Ronaldo **Casa de ribeirinhos**. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/912001/casa-de-ribeirinhos>. Acesso em: 2 jul. 2025.

ROUQUEROL, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W.; LLEWELLYN, P.; MAURIN, G. **Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications**. 2. ed. Oxford: Academic Press, 2014.

SANTANA, Diego Rodrigues. **O uso consciente da água para a sustentabilidade: uma abordagem de aprendizagem interdisciplinar no ambiente escolar**. 2023. 129 f. Dissertação (Mestrado em Rede Nacional para o Ensino das Ciências Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/items/0f62443e-141e-4b49-92c9-eb1bf83bb2d0>. Acesso em: 21 04 2026.

SANTOS, Adriana Ramos dos; TREIN, Eunice Schilling. A educação ambiental no contexto ribeirinho amazônico. **Revista de Estudos Universitários – REU**, Sorocaba, v. 36, n. 3, p. 181–200, dez. 2010.

SANTOS, B. S. Para além do pensamento abissal: das linhas globais a uma ecologia dos saberes. In: SANTOS, B. S.; MENESES, M. P. (org.). **Epistemologias do Sul**. São Paulo: Cortez, 2019. p. 31–83.

SANTOS, C. R.; FERREIRA, J. L. Educação ambiental e justiça social na Amazônia: experiências de resistência e formação. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 105–122, 2022.

SANTOS, D. R.; FERREIRA, L. A. Educação científica na Amazônia: práticas pedagógicas e sustentabilidade social. **Revista Norte de Educação**, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 45–61, 2022.

SANTOS, Gesmar Rosa dos; SANTANA, Adrielli. **Água, saneamento e objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) na Amazônia: dificuldades na gestão integrada e universalização dos serviços**. Brasília, DF: Ipea, 2021.

SANTOS, J. P.; PEREIRA, L. H. Filtro artesanal como recurso didático na educação básica: uma abordagem interdisciplinar com foco na sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, Curitiba, v. 14, n. 1, p. 1–18, 2021.

SANTOS, M. F.; PEREIRA, J. Educação ambiental crítica no ensino de ciências. **Práxis Educacional**, Vitória da Conquista – BA, v. 17, n. 45, p. 130–147, 2021.

SANTOS, Milton. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. São Paulo: Hucitec, 1996.

SANTOS, T. M.; PEREIRA, L. M. A construção de filtros de água como prática pedagógica no ensino de ciências. **Revista Ensino em Perspectivas**, [S.l.], v. 11, n. 2, p. 45–60, 2021.

SANTOS, Milton. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. São Paulo: Hucitec, 1996.

SILVA, Alisson Clay Rios da; COELHO, Dayse Natalia Matos; MONTEIRO, Sérgio Neves; CÂNDIDO, Verônica Scarpini. Caracterização microestrutural do caroço do açaí para aplicação com material compósito de matriz polimérica. *In*: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO, 73., 2018, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2018. p. 2375–2382. DOI: 10.5151/1516-392X-242.

SILVA, Flaviana Cavalcanti da; SANT'ANA, Antonio Lázaro; MAIA, Ana Heloisa; RODRIGUES, Rosilva Brito; SILVA, Elisandra Alves. A tecnologia social pais (produção agroecológica integrada e sustentável) em assentamentos do município de Castilho-SP. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 9., 2015, Belém. Resumo.... Belém: CBA, 2015. Disponível no Cadernos de Agroecologia, v. 10, n. 3. <https://revista.aba-agroecologia.org.br/cad/article/view/19999>.

SILVA, Gheizon Raunny; SILVA, Maria Cristina Basilio Crispim da; MELO, Gabrielle Moraes de. Educação Ambiental não formal: a utilização de mídias sociais como forma de disseminação de tecnologias socioambientais. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 244–258, 2022. DOI: 10.34024/revbea.2022.v17.13482.

SILVA, M. S. *et al.* Produção e aplicação de filtro de baixo custo com carvão ativado a partir do resíduo de caroço de açaí nativo. **Ciência Florestal**, [S.l.], v. 33, n. 2, p. 1–18, 2023.

SILVA, R. O.; LIMA, T. Educação sanitária e acesso à água em comunidades ribeirinhas. **Educação Ambiental em Ação**, [S.l.], n. 81, 2022.

SILVA, V. P. *et al.* Eficiência do carvão ativado do caroço de açaí em filtros de baixo custo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 3, p. 457–466, 2023.

SOUZA, A. P.; LIMA, V. C. Qualidade da água em comunidades ribeirinhas da Amazônia: desafios e soluções. **Revista Saúde & Ambiente**, [S.l.], v. 12, n. 1, p. 55–67, 2021.

SOUZA, A. L.; LIMA, F. G. Água e território: desafios do abastecimento em comunidades tradicionais ribeirinhas da Amazônia. **Geoamazônia**, Belém, v. 9, n. 2, p. 155–170, 2021.

SOUSA, A. P. **Avaliação de filtros artesanais com carvão de açaí para tratamento de água**. 2019. 00f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Ou o DOI

TCHOBANOGLIOUS, G. **MWH's water treatment: principles and design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

UNITED NATIONS. **The sustainable development goals report 2024**. New York: United Nations, 2024.

VARGAS, Gloria Maria. Natureza e ciências sociais. **Sociedade e Estado**, Brasília, v. 18, n. 1–2, p. 137–154, 2003. DOI: 10.1590/S0102-69922003000100008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/se/a/7B5BDHPJXkqwNyDJybddxLz/>. Acesso em: 11 fev. 2026.

VASCONCELLOS, Andréa Araujo de. Tecnologia Social: uma revisão de literatura. **InterAção**, Santa Maria, v. 16, n. 1, e89357, p. 1–21, 2025. DOI: 10.5902/2357797589357.

VELOSO, Nircele da Silva Leal *et al.* A pós-graduação e a sustentabilidade do abastecimento de comunidades ribeirinhas na Amazônia por meio de água de chuva: da concepção à ação. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, Brasília, v. 10, n. 21, p. 761–791, 2013.

VIEIRA, José Sebastião Cidreira; ANO, João Darlon Alves do; MELO, Gabriela Ribeiro; PEREIRA, Agustinho Rodrigues; REIS, Alexandre da Costa; CARVALHO, Francisco Wanderson Pinto de; CARVALHO, Edson Mauro Viana de; RODRIGUES, Makson Rangel de Melo. Pirólise dos caroços do açaí para obtenção de carvão granulado ativado para tratamento de água destinada ao consumo humano. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 10, n. 7, p. 1–20, 2024. DOI: 10.34117/bjd10n8-012.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). **Education for sustainable development: a roadmap**. Paris: UNESCO, 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Drinking-water**. Geneva: World Health Organization, 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Drinking-water**. Geneva: World Health Organization, 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for drinking-water quality**. 4. ed. Geneva: World Health Organization, 2022.

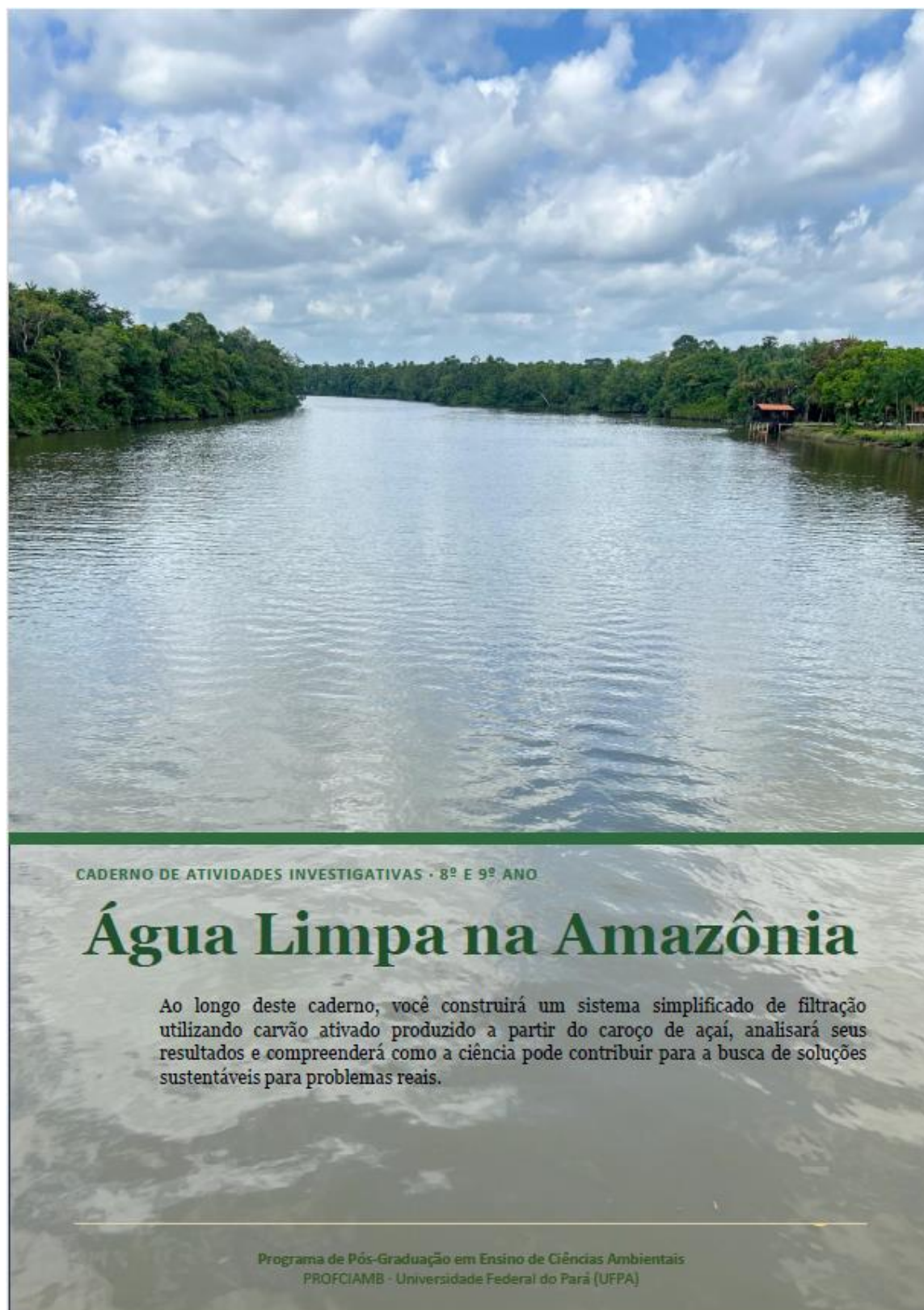
WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO); UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF). **Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines.** Geneva: World Health Organization; New York: UNICEF, 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO); UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF). **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022: special focus on gender.** Geneva: WHO; UNICEF, 2023.

ZHANG, T.; WALAWENDER, W. P.; FAN, L. T.; FAN, M.; DROWN, E. **Preparation of activated carbon from forest and agricultural residues through chemical activation.** *Bioresource Technology*, Amsterdam, v. 93, n. 3, 2004. p. 215-221.

APÊNDICE A – CADERNO DIDÁTICO PEDAGÓGICO ÁGUA LIMPA NA AMANZONIA

LINK DO PRODUTO - <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1190463>





Ficha Técnica

Água Limpa na Amazônia · Caderno de Atividades Investigativas

Título da Publicação

Água Limpa na Amazônia — Caderno de Atividades Investigativas

Tipo de Publicação

Material Didático-Pedagógico

Autoria, Coordenação e Ilustrações

Everaldo Lira da Cunha

Orientação Acadêmica

Profa. Dra Mary Ellen Moraes — UFPA

Vinculação Acadêmica

Produto educacional desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Ambientais — PROFCIAMB/UFPA, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Revisão Técnica

Universidade Federal do Pará - UFPA

Revisão Pedagógica

Universidade Federal do Pará — UFPA

Instituições Parceiras

Universidade do Estado do Pará - UEPA

Público-alvo

Estudantes do 8º e 9º ano do Ensino Fundamental e professores de Ciências.

Finalidade da Publicação

Apoiar atividades investigativas sobre a qualidade da água, incentivando o estudo do reaproveitamento de resíduos amazônicos e o desenvolvimento de conhecimentos em Ciências Ambientais.

Local e Ano

Belém, Pará, Brasil — 2026



Créditos e Direito Autoral

Água Limpa na Amazônia · Caderno de Atividades Investigativas

CRÉDITOS DE IMAGEM

Ilustrações, imagens e tratamento gráfico: Everaldo Lira da Cunha

Fonte das ilustrações técnicas: Elaboração do autor com apoio de recursos digitais (2026).

Fotografias: Material de autoria própria, complementado por imagens geradas com inteligência artificial e por imagens de referência utilizadas mediante citação das respectivas fontes.

DIREITO AUTORAL

©Everaldo Lira da Cunha, 2026.

Esta obra está protegida pela Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998 (Lei de Direitos Autorais).

É permitida a reprodução total ou parcial do conteúdo, desde que citada a fonte, para fins educacionais, científicos e não comerciais.

AVISO DE USO E RESPONSABILIDADE TÉCNICA

As atividades e orientações apresentadas neste Caderno devem ser adaptadas às condições locais e, quando necessário, acompanhadas por orientação técnica especializada ou por um docente.



Apresentação

Caderno de Atividades Investigativas

Esta Caderno foi construída a partir de uma pesquisa sobre água, filtração e reaproveitamento do caroço de açaí. Sua elaboração nasceu do interesse em aproximar o conhecimento produzido na universidade de questões presentes no cotidiano da comunidade ribeirinha amazônica.

Na Amazônia, a água faz parte da paisagem, do trabalho, da alimentação e dos modos de vida. Para muitas famílias ribeirinhas, rios, igarapés e poços são as principais fontes de abastecimento. Apesar de sua presença abundante, nem sempre a água disponível apresenta condições adequadas para o consumo. Ao mesmo tempo, grandes quantidades de caroços de açaí são descartadas diariamente, mesmo sendo um material com possibilidades de reaproveitamento.

A partir dessa realidade, o caroço de açaí foi transformado em carvão ativado e utilizado como uma das camadas de um sistema simplificado de filtração. Esse processo deu origem às atividades reunidas neste caderno, que permitem acompanhar o percurso da pesquisa, desde o preparo do material até a montagem do filtro e a análise da água.

O conteúdo não foi organizado apenas para explicar como um filtro funciona. A proposta é fazer com que cada estudante observe, faça perguntas, registre suas ideias, compare materiais e procure compreender o que acontece durante o experimento. Algumas respostas poderão surgir ao longo das atividades; outras poderão conduzir a novas investigações.

Este material foi pensado especialmente para o ensino de Ciências nos anos finais do Ensino Fundamental, considerando a realidade das escolas e da comunidade ribeirinha amazônica. Ele também pode ser adaptado a feiras de Ciências, projetos ambientais e outras atividades desenvolvidas dentro ou fora da escola.

Espero que estas páginas contribuam para olhar a água e os resíduos produzidos em nossa região com mais atenção. Muitas vezes, uma investigação começa justamente quando passamos a observar de outra maneira aquilo que sempre esteve ao nosso redor.