



BIOTUBE AMAZÔNICO: DESENVOLVIMENTO DE TUBETES BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DA FIBRA DO CAROÇO DE AÇAÍ E BREU-BRANCO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS

Fryda M. Silva¹; Janielly C. Santos²; Lívia M. Oliveira³; Kauanny S. Gomes⁴; Kamilla C. dos Santos⁵.

¹ Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

² Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

³ Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

⁴ Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

⁵ Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

moraesliv30@gmail.com

Palavras-Chave: Biocompósitos, *Euterpe oleracea* Mart, Economia Circular.

Introdução

A transição global para modelos de desenvolvimento baseados na bioeconomia e na economia circular tem impulsionado a busca por materiais ecoeficientes que substituam os polímeros de matriz fóssil. No contexto da Amazônia legal, esse paradigma técnico-científico adquire relevância estratégica, pois demanda a conversão de passivos agroindustriais abundantes em insumos de alto valor tecnológico agregado, fortalecendo a premissa do desenvolvimento regional sustentável associado à manutenção da floresta em pé (ABRAMOVAY et al., 2023; VALE et al., 2024).

O processamento intensivo do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) para a extração de polpa consolidou-se como um dos principais pilares socioeconômicos da Região Norte, expandindo-se significativamente para os mercados nacional e internacional (SANTOS et al., 2021). No entanto, o modelo produtivo atual opera de forma linear, gerando uma massa crítica de subprodutos. O caroço do açaí representa entre 80% e 90% da massa total do fruto bruto e, devido ao descarte desordenado em áreas urbanas e periurbanas, configura um grave problema de gestão ambiental, saneamento e saúde pública (MARINHO et al., 2023; ROCHA; SILVA, 2022). Sob a perspectiva da ciência dos materiais, esse resíduo lignocelulósico possui uma estrutura rica em celulose e lignina, apresentando propriedades físicas e microestruturais promissoras para atuar como agente de reforço em biocompósitos (MESQUITA et al., 2022).

Para a consolidação dessas matrizes vegetais, o uso de ligantes naturais surge como alternativa promissora às resinas sintéticas poluentes. O breu-branco, uma resina aromática exsudada por árvores da família Burseraceae (predominantemente do gênero *Protium*), destaca-se por sua composição triterpênica, que confere rigidez, estabilidade química, acentuada hidrofobicidade e características termoplásticas naturais (RAMOS et al., 2024). Quando submetido à fusão térmica, o breu-branco é capaz de encapsular partículas lignocelulósicas, promovendo a coesão mecânica e reduzindo a absorção de água do compósito (ALMEIDA et al., 2026).



Uma das aplicações potenciais para esses novos biocompósitos está no setor agrícola e florestal, especificamente na substituição dos tubetes rígidos utilizados para a propagação de mudas em escala comercial. Embora os recipientes tradicionais de polietileno de alta densidade (PEAD) ou polipropileno (PP) permitam o reuso, eles demandam operações onerosas de lavagem e desinfecção para evitar fitopatógenos, geram resíduos plásticos volumosos por degradação solar e provocam o envelhecimento do sistema radicular (CALDEIRA *et al.*, 2021; PINTO *et al.*, 2023). Em contrapartida, tubetes biodegradáveis fabricados a partir de biomassas residuais podem ser inseridos diretamente no solo com a plântula, eliminando o estresse do transplante e atuando como condicionadores orgânicos locais à medida que se decompõem (MACHADO *et al.*, 2024; FERREIRA *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo desenvolver tubetes biodegradáveis utilizando fibra do caroço de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) e breu-branco (*Protium* spp.) como alternativa sustentável aos recipientes plásticos empregados na produção de mudas. Busca-se determinar a proporção mássica ideal entre os constituintes que concilie a estabilidade dimensional do tubete durante o manejo agrônomo com a sua capacidade de biodegradação e favorecimento ao desenvolvimento radicular, materializando localmente as diretrizes globais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU.

A cadeia produtiva do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) consolidou-se como um dos pilares socioeconômicos e culturais da região amazônica, expandindo-se significativamente para os mercados nacional e internacional devido ao reconhecimento de suas propriedades nutricionais e antioxidantes (SANTOS *et al.*, 2021). No entanto, o processamento intensivo do fruto para a extração da polpa gera uma quantidade massiva de subprodutos. Estudos agroindustriais apontam que o caroço do açaí representa entre 80% e 90% da massa total do fruto bruto (MARINHO *et al.*, 2023). Como apenas a fração correspondente ao epicarpo e ao mesocarpo é aproveitada na etapa de despulpamento, a agroindústria do açaí opera majoritariamente em um modelo linear clássico, gerando milhares de toneladas de resíduos lignocelulósicos diariamente que demandam estratégias urgentes de valorização tecnológica e reinserção produtiva (CONCEIÇÃO *et al.*, 2025).

O descarte desordenado do caroço de açaí em áreas urbanas, periurbanas e margens de rios na Região Norte do Brasil configura um grave problema de gestão ambiental, saneamento e saúde pública (ROCHA; SILVA, 2022). O acúmulo desses resíduos a céu aberto propicia a proliferação de vetores de doenças e a obstrução de sistemas de drenagem pluvial urbana. Sob o aspecto químico e ecológico, a decomposição lenta da matéria orgânica residual aderida a esses caroços induz a processos de lixiviação que podem comprometer a qualidade dos corpos hídricos locais e do solo (SOUZA *et al.*, 2024). Ademais, a queima indiscriminada dessa biomassa como combustível rudimentar em olarias e indústrias cerâmicas regionais, embora reduza o volume acumulado, ocorre frequentemente sem sistemas de filtragem adequados, resultando em poluição atmosférica severa por material particulado e gases de efeito estufa (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

O caroço do açaí é envolvido por uma camada densa de fibras lignocelulósicas que apresentam propriedades físicas e microestruturais altamente promissoras para a ciência dos materiais. Quimicamente, essas fibras são constituídas por uma matriz complexa contendo celulose, hemicelulose e um elevado teor de lignina, que atua como um polímero amorfo tridimensional responsável pela rigidez, estabilidade térmica e resistência natural à biodegradação (MESQUITA *et al.*, 2022). Estruturalmente, análises de Microscopia



Eletrônica de Varredura (MEV) revelam uma superfície rugosa com a presença de canais e pontuações que favorecem o intertravamento mecânico quando dispersas em fases contínuas (COSTA *et al.*, 2023). Contudo, a natureza hidrofílica da celulose, rica em grupos hidroxila, impõe desafios de compatibilidade interfacial quando combinada a matrizes hidrofóbicas, exigindo frequentemente pré-tratamentos químicos ou a seleção de aglomerantes compatíveis (SILVA *et al.*, 2024).

A incorporação da fibra do caroço de açaí em matrizes diversas tem sido amplamente investigada para o desenvolvimento de biocompósitos, visando à substituição de cargas minerais e fibras sintéticas poluentes. Na engenharia de materiais, essas fibras atuam como agentes de reforço ou enchimento (*fillers*), aumentando o módulo de elasticidade e reduzindo a densidade final do produto desenvolvido (TEIXEIRA *et al.*, 2021). Pesquisas recentes demonstram a viabilidade do uso dessas fibras no desenvolvimento de painéis de partículas de média densidade (MDF), blocos para a construção civil e componentes automotivos não estruturais, evidenciando que o controle granulométrico e a fração volumétrica da fibra permitem modular a porosidade e a absorção de água do compósito (BARROS *et al.*, 2025).

O breu-branco é uma resina aromática exsudada espontaneamente do tronco de árvores da família Burseraceae, predominantemente do gênero *Protium* (como *Protium heptaphyllum*), nativas da floresta amazônica. Ao entrar em contato com o ambiente, a resina sofre um processo natural de volatilização e oxidação, solidificando-se (SANTIAGO *et al.*, 2022). Quimicamente, o breu-branco é composto por uma fração volátil rica em monoterpenos e sesquiterpenos, e uma fração resinosa não volátil predominantemente constituída por triterpenos, com destaque para os isômeros alfa e beta-amirina (VIEIRA *et al.*, 2023). Esta robusta composição triterpênica confere à resina características de acentuada hidrofobicidade, insolubilidade em meio aquoso, excelente estabilidade química frente a agentes intempéricos e propriedades antimicrobianas naturais documentadas (RAMOS *et al.*, 2024).

Devido ao seu comportamento termoplástico natural — amolecendo sob aquecimento moderado e consolidando-se durante o resfriamento — e à sua barreira hidrofóbica inerente, o breu-branco desponta como um aglomerante verde alternativo aos ligantes sintéticos derivados do petróleo, como as resinas fenol-formaldeído e poliuretânicas (MENDES *et al.*, 2023). Quando submetido a processos de prensagem a quente, o breu-branco atua fundindo-se e encapsulando as partículas ou fibras lignocelulósicas. A molhabilidade da resina líquida sobre a superfície rugosa da biomassa vegetal, associada à solidificação por resfriamento, promove o desenvolvimento de uma matriz contínua que confere coesão mecânica, estabilidade dimensional e redução drástica da absorção de água pelo compósito lignocelulósico (ALMEIDA *et al.*, 2026).

Os biocompósitos estruturados a partir da associação entre matrizes poliméricas e reforços de origem vegetal (como juta, sisal, coco, curauá e açaí) representam uma classe de materiais ecoeficientes consolidada na literatura científica internacional (FIORE *et al.*, 2015). Esses sistemas compósitos distinguem-se pela baixa densidade, biocompatibilidade, atenuação acústica e isolamento térmico superior, além de provocarem menor desgaste abrasivo nos equipamentos de processamento industrial (MORAIS *et al.*, 2022). Conforme preconizado por Kalia *et al.* (2011), o desempenho mecânico global e a durabilidade desses materiais ecológicos são governados de forma direta pela orientação microestrutural da fibra, sua razão de aspecto e pela eficiência da transferência de tensões na interface fibra-matriz.



A transição para o uso de materiais biodegradáveis constitui uma resposta tecnológica imperativa à crise ambiental global gerada pela perenidade e pelo descarte inadequado dos plásticos convencionais derivados do petróleo (NANDA *et al.*, 2021). Um material é cientificamente classificado como biodegradável quando sua despolimerização e degradação ocorrem por meio da ação metabólica de microrganismos (bactérias e fungos) presentes na natureza, convertendo a estrutura química em compostos simples como dióxido de carbono, água e biomassa celular sob condições ambientais específicas (SANTANA *et al.*, 2023). O emprego desses sistemas dinâmicos diminui drasticamente o tempo de permanência do resíduo no meio ambiente e reduz a pegada de carbono industrial, ideal para aplicações de ciclo de vida curto.

O paradigma da economia circular propõe a ruptura definitiva com o modelo econômico linear ("extrair, produzir, descartar"), substituindo-o por ciclos fechados onde o valor dos recursos e materiais é preservado e reinserido na cadeia de suprimentos (STAHEL, 2016). No contexto da Amazônia legal, a operacionalização desse conceito traduz-se no aproveitamento e transformação de resíduos agroindustriais e florestais abundantes, como o caroço do açaí e as resinas não madeireiras em novos insumos ecoeficientes (SOUZA *et al.*, 2025). Essa abordagem mitiga severos passivos ambientais urbanos e rurais e promove a retenção de valor econômico na própria região amazônica, fortalecendo cadeias produtivas de base industrial verde (VALE *et al.*, 2024).

Os tubetes rígidos são os recipientes mais utilizados nos setores florestal e agrícola para a propagação de mudas em escala comercial. Projetados tecnicamente com formatos cônico-prismáticos e providos de estrias internas direcionadoras, esses recipientes evitam o enovelamento do sistema radicular e induzem a poda aérea das raízes na abertura inferior (CALDEIRA *et al.*, 2021). Tradicionalmente, são fabricados em polímeros sintéticos como o polietileno de alta densidade (PEAD) ou o polipropileno (PP). Apesar de permitirem o reaproveitamento cíclico, demandam processos onerosos de coleta em campo, lavagem e desinfecção química para evitar a transmissão de fitopatógenos, além de gerarem resíduos plásticos volumosos por quebra e degradação solar ao longo do tempo (PINTO *et al.*, 2023).

Os tubetes biodegradáveis configuram uma inovação disruptiva frente aos gargalos logísticos e ecológicos dos recipientes plásticos tradicionais. Fabricados a partir da consolidação de biomassas residuais e ligantes naturais, esses recipientes possuem a propriedade técnica de serem inseridos diretamente no solo juntamente com a plântula durante o plantio definitivo (MACHADO *et al.*, 2024). Esse método suprime a necessidade da operação de remoção da muda (*destubeteamento*), mitigando o estresse pós-plantio, o choque térmico e os danos mecânicos nas raízes frágeis. À medida que o invólucro lignocelulósico se biodegrada pela microbiota do solo, ele passa a atuar como condicionador orgânico local, otimizando o estabelecimento inicial da cultura (FERREIRA *et al.*, 2025).

A restauração ecológica e a recuperação de áreas degradadas na região amazônica, impactos severos de atividades como a pecuária extensiva, mineração e exploração predatória, dependem intrinsecamente da qualidade fitossanitária e morfológica das mudas florestais utilizadas (GOMES *et al.*, 2022). O sucesso do estabelecimento e do crescimento dessas espécies em campo está atrelado à capacidade do sistema radicular de absorver água e nutrientes sob condições iniciais adversas de estresse hídrico e compactação do solo. Tecnologias que elevam o índice de sobrevivência no campo reduzem os custos de replantio e aceleram o fechamento do dossel, restabelecendo com maior rapidez as funções e os serviços ecossistêmicos essenciais (NASCIMENTO *et al.*, 2024).



A bioeconomia aplicada à realidade amazônica diferencia-se das abordagens industriais puramente biotecnológicas do hemisfério norte por focar, obrigatoriamente, na premissa da "floresta em pé" e na valorização das comunidades tradicionais (COSTA *et al.*, 2021). Trata-se de um modelo que propõe a geração de riqueza por meio do uso intensivo de conhecimento científico sobre recursos biológicos e genéticos nativos. Ao integrar a ciência contemporânea dos materiais aos subprodutos da sociobiodiversidade, a bioeconomia amazônica impulsiona o desenvolvimento regional sustentável, reduz a pressão sobre o desmatamento e promove uma matriz industrial limpa e competitiva (ABRAMOVAY *et al.*, 2023).

O desenvolvimento científico e tecnológico de novos materiais baseados no reaproveitamento do caroço de açaí e da resina de breu-branco não se restringe a uma solução de engenharia local, mas converge e materializa as diretrizes globais estabelecidas pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015). Esta pesquisa alinha-se estrategicamente a cinco Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), articulando inovação de materiais, preservação florestal e mitigação de impactos urbanos e globais como mostrado na tabela 1.

Tabela 1 - Alinhamento do projeto com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

ODS	Contribuição para o Projeto/ Justificativa	Autores de Referência
ODS 9 Indústria, Inovação e Infraestrutura	Desenvolvimento de material inovador e sustentável a partir de recursos biológicos da sociobiodiversidade amazônica. Transforma matrizes naturais e fibras vegetais em insumos de alta performance, estimulando infraestruturas industriais ecológicas e a inovação adaptada à realidade regional.	SILVA; MENEZES, 2026
ODS 11 Cidades e Comunidades Sustentáveis	Proposição de alternativas viáveis para o aproveitamento de resíduos sólidos massivos do açaí. Ao desviar toneladas de caroços do descarte inadequado em áreas urbanas e periurbanas, reduz o impacto ambiental negativo <i>per capita</i> nas cidades do Norte, mitigando problemas de saneamento e poluição visual.	ROCHA; SILVA, 2022
ODS 12 Consumo e Produção Responsáveis	Incentivo à reutilização sistemática de resíduos agroindustriais e à produção de materiais biodegradáveis com ciclo de vida circular. Substitui o modelo linear de descarte pela reinserção da biomassa e do breu-branco, reduzindo a pegada ecológica e estimulando o manejo sustentável.	SOUZA <i>et al.</i> , 2025
ODS 13 Ação Contra a Mudança Global do Clima	Atuação na governança climática pela redução da dependência de plásticos derivados do petróleo. A troca de recipientes de matriz fóssil por compósitos biodegradáveis diminui as emissões de gases de efeito estufa da petroquímica e evita a queima rudimentar de biomassa em indústrias locais.	OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2023
ODS 15 Vida Terrestre	Favorecimento da produção de mudas para recuperação de áreas degradadas e preservação ecológica. O tubete biodegradável otimiza o vigor radicular, elimina o estresse de transplante e acelera o sucesso de plantios de restauração, combatendo a desertificação e protegendo a biodiversidade.	NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2024



Fonte: Dados da pesquisa, 2026.

As perspectivas futuras para a ciência dos materiais sustentáveis na Amazônia convergem para a consolidação de arranjos produtivos locais baseados no conceito de biorrefinarias ecológicas regionais. A concepção de um biocompósito que une as fibras mecânicas do caroço de açaí ao comportamento termoplástico e hidrofóbico da resina de breu-branco exemplifica a viabilidade de engenharia contida na biodiversidade (LIMA *et al.*, 2024).

O aprofundamento das investigações acerca das interações termodinâmicas interfaciais, cinética de biodegradação e reologia dessas formulações nativas viabilizará o escalonamento dessa tecnologia, pavimentando o caminho para que a região amazônica deixe de ser apenas fornecedora de *commodities* e se torne um polo exportador de patentes e soluções tecnológicas sustentáveis globais (SILVA; MENEZES, 2026).

Material e Métodos

A presente pesquisa experimental foi desenvolvida em um período concentrado de dois meses (março a maio de 2026), adotando uma abordagem quanti-qualitativa para a produção e avaliação de recipientes biodegradáveis.

Etapas 1 – Revisão Bibliográfica

Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico em bases de dados científicos, com foco no aproveitamento de resíduos agroindustriais (ênfase no caroço de açaí), propriedades termoplásticas do breu-branco, engenharia de biocompósitos e tecnologias de recipientes sustentáveis para a produção de mudas. Essa fundamentação teórica subsidiou o delineamento experimental do projeto.

Etapas 2 – Coleta e Seleção dos Materiais

Os caroços de açaí (*Euterpe oleracea*) foram obtidos a partir de resíduos de despolpamento em estabelecimentos comerciais locais no município de Porto Grande, Amapá. A resina de breu-branco (*Protium spp.*) foi adquirida de fornecedores da região. Ambos os materiais passaram por uma triagem manual rigorosa para a eliminação de impurezas, sujidades e restos de polpa que pudessem interferir na homogeneidade do compósito, conforme registrado na Figura 1.



Figura 1 - Matérias-primas brutas: Caroços de açaí descartados e resina de breu-branco durante o processamento.



Fonte: Arquivo dos autores (2026).

Etapas 3 – Processamento da Biomassa (Caroço de Açaí)

Os caroços selecionados foram lavados em água corrente para a remoção completa de resíduos orgânicos aderidos e submetidos à secagem ao sol até a estabilização da umidade natural. Em seguida, os caroços secos foram triturados mecanicamente para a obtenção de partículas finas e fibras vegetais fragmentadas. O material resultante foi classificado por meio de peneiramento manual para a padronização granulométrica das partículas e misturada com as fibras externas do caroço que já foi retirada e cortada, como pode ser observado na Figura 2, sendo posteriormente armazenado em recipientes herméticos e secos.

Figura 2 - Processo de moagem e peneiramento dos caroços de açaí, mostrando a textura final do pó/fibra obtido.



Fonte: Arquivo dos autores (2026).

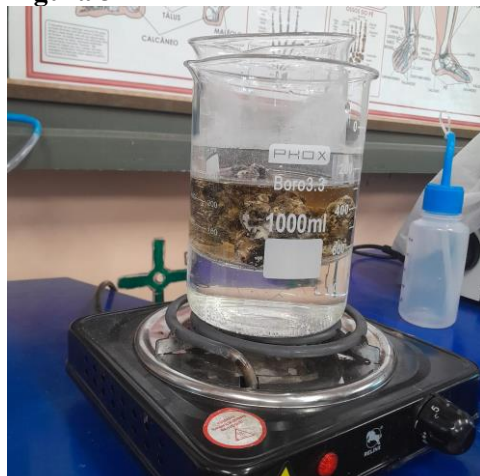
Etapas 4 – Preparação do Aglomerante Natural (Breu-Branco)

A resina sólida de breu-branco foi fragmentada em pequenas partes e submetida a um processo de fusão térmica por meio de aquecimento controlado em banho-maria. Esse procedimento, detalhado na Figura 3, permitiu a liquefação e a transformação do breu em uma



matriz resinosa fluida e homogênea, facilitando sua posterior incorporação como agente aglomerante e ligante hidrofóbico.

Figura 3 - Fusão térmica do breu-branco em banho-maria e aspecto da resina líquida homogênea



Fonte: Arquivo dos autores (2026).

Etapas 5 – Moldagem das Formulações dos Tubetes Biodegradáveis

Para a confecção dos tubetes, foram estabelecidas quatro formulações experimentais (Tratamentos T1 a T4), variando as proporções de massa entre a fibra/pó de açaí e a resina liquefeita de breu-branco, conforme estabelecido na Tabela 2.

Tabela 2 - Proporções dos constituintes nos tratamentos experimentais

Tratamento	Fibra de Açaí (%)	Breu-Branco (%)
T1	90%	10%
T2	80%	20%
T3	70%	30%
T4	60%	40%

Fonte: Dados da pesquisa, 2026.

Os componentes de cada tratamento foram misturados sob aquecimento residual até a completa homogeneização da massa. A mistura foi vertida em moldes cônicos prismáticos (com dimensões semelhantes às de tubetes comerciais), sendo compactada manualmente para garantir a coesão estrutural e a redução de vazios. Os protótipos foram resfriados à temperatura ambiente para a solidificação completa e desmoldados, gerando os resultados visíveis na Figura 4.

Figura 4 - (a) mistura da biomassa com a resina, (b) processo de compactação nos moldes e (c) tubetes prontos após a desmoldagem (lado a lado de T1 a T4).



Fonte: Arquivo dos autores (2026).

Etapa 6 – Ensaios de Propriedades Físicas e Mecânicas

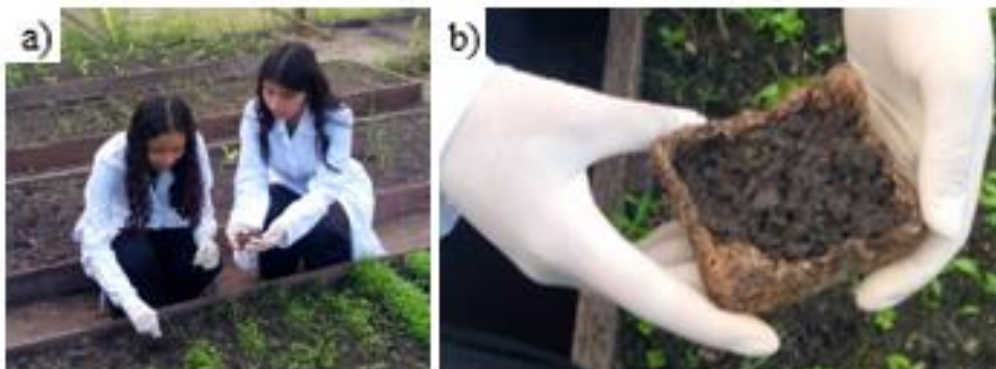
Após a secagem estrutural, os tubetes foram submetidos a testes qualitativos de resistência mecânica por meio de ensaios manuais de compressão, avaliando-se a suscetibilidade ao aparecimento de rachaduras, deformações ou esfarelamento. O comportamento em contato com a água foi monitorado visualmente durante as etapas de irrigação, analisando a integridade das paredes dos recipientes e sua estabilidade dimensional frente à umidade constante.

Etapa 7 – Teste Preliminar de Biodegradação no Solo

Considerando o cronograma de 2 meses da pesquisa, foi realizado um ensaio de biodegradação acelerada de caráter preliminar. Amostras dos biocompósitos foram enterradas em solo fértil microbiano ativo e monitoradas periodicamente, seguindo o procedimento metodológico exposto na Figura 5. Avaliou-se qualitativamente a perda de rigidez, alterações na coloração do material, início de esfarelamento e sinais de colonização por microrganismos (bactérias e fungos de solo) ao longo do período experimental.



Figura 5 - Monitoramento do teste de biodegradação: (a) amostras sendo enterradas e (b) aspecto delas após algumas semanas no solo.



Fonte: Arquivo dos autores (2026).

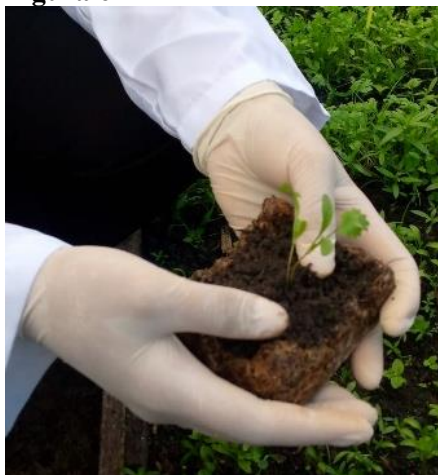
Etapa 8 – Ensaio de Cultivo Agrônômico com Cebolinha (*Allium fistulosum*)

Como modelo biológico de validação rápida adaptável ao cronograma, utilizou-se a cultura da cebolinha (*Allium fistulosum*). Os tubetes selecionados de cada tratamento foram preenchidos com substrato orgânico comercial e receberam as sementes. Os recipientes foram mantidos sob regime de irrigação controlada diária. Foram avaliados os seguintes parâmetros agrônômicos:

- **Taxa de germinação:** Monitoramento do surgimento das plântulas;
- **Crescimento foliar:** Medição periódica do comprimento das folhas;
- **Desenvolvimento radicular:** Avaliação visual da capacidade das raízes fasciculadas de colonizarem o substrato e interagirem com a parede interna do tubete.

Os resultados biológicos e estruturais obtidos foram comparados diretamente com o desempenho de mudas testemunhas cultivadas em tubetes convencionais de polietileno. Ao final do ciclo, foi realizado o registro do estado das mudas e da interação entre o sistema radicular e o substrato, permitindo uma avaliação visual do desenvolvimento das plantas, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 6 - Sistema radicular da cebolinha associado ao substrato ao final do experimento.



Fonte: Arquivo dos autores (2026).



Etapa 9 – Processamento e Análise dos Resultados

Os dados quantitativos de crescimento e germinação foram tabulados e organizados na forma de gráficos lineares e de barras. A análise conjunta dos dados físicos, ecológicos (biodegradação) e biológicos (desempenho da cebolinha) permitiu a identificação da formulação termomecanicamente otimizada entre os tratamentos estudados, gerando subsídios para as conclusões finais da pesquisa.

Resultados e Discussão

Os ensaios físicos, mecânicos e agrônômicos realizados ao longo do período de dois meses geraram dados valiosos sobre a viabilidade do "BioTube Amazônico". A associação entre a biomassa lignocelulósica do açaí e a resina triterpênica do breu-branco demonstrou que a variação nas proporções dos componentes altera drasticamente as propriedades finais do recipiente biodegradável.

Os testes manuais de compressão e a observação visual revelaram que a resistência mecânica dos tubetes é diretamente proporcional à concentração de breu-branco na fórmula, devido à alta rigidez do ligante quando solidificado isoladamente.

Para fins de comparação sistemática, as principais características físicas, mecânicas e visuais observadas em cada formulação após os ensaios práticos foram sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Comportamento físico-mecânico dos biotubetes após a moldagem e exposição à umidade

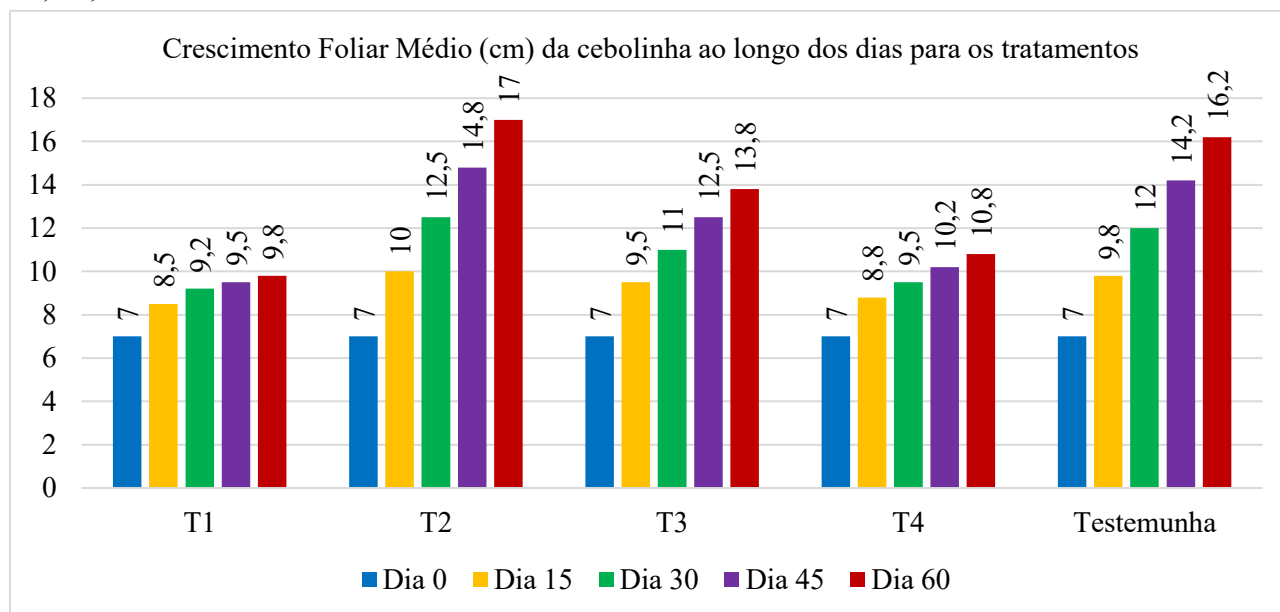
Tratamento	Proporção (Fibra/Breu)	Coesão Estrutural e Desmolde	Resistência à Compressão Manual	Comportamento Frente à Irrigação
T1	90% / 10%	Baixa coesão; quebra e esfarelamento no desmolde.	Frágil; deforma e desmancha com facilidade.	Colapso estrutural precoce; rápida desintegração.
T2	80% / 20%	Excelente coesão; superfície lisa e desmolde perfeito.	Ótima rigidez; suporta o manuseio sem deformar.	Excelente estabilidade; mantém a forma e resiste à água.
T3	70% / 30%	Regular; textura muito rígida e desmolde aceitável.	Alta rigidez; porém propenso a rachaduras secas.	Barreira hidrofóbica acentuada; pouca absorção de água.
T4	60% / 40%	Ruim; aspecto vitrificado e trincas imediatas.	Muito quebradiço; racha facilmente sob pressão.	Altamente impermeável; repele a água de irrigação.

Fonte: Dados da pesquisa, 2026.

Em contato com a água das irrigações diárias, o comportamento hidrofóbico do breu-branco, documentado por Mendes et al. (2023), foi claramente observado. O tratamento T1 desestruturou-se nas primeiras semanas devido à alta hidrofiliabilidade da celulose exposta da fibra (Silva et al., 2024). Já os tratamentos T3 e T4 criaram uma barreira quase impermeável, o que reduziu a absorção de água pelas paredes do tubete. O T2 manteve-se estável estruturalmente durante todo o ciclo de cultivo, sem sofrer lixiviação ou colapso de suas paredes.

O modelo biológico de validação rápida com a cebolinha confirmou a viabilidade agrônômica do biocompósito, evidenciando diferenças significativas no desenvolvimento vegetal entre os tratamentos, conforme ilustrado no comportamento Gráfico 1.

Gráfico 1 - Crescimento Foliar Médio (cm) da cebolinha ao longo dos dias para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e a Testemunha Plástica



Fonte: Arquivo dos autores (2026).

A taxa de germinação da cebolinha ocorreu de forma homogênea entre os dias 5 e 8 após a semeadura em quase todos os grupos. No entanto, o crescimento das folhas revelou o impacto ecológico de cada matriz:

- As mudas do T2 (80/20) apresentaram altura foliar e vigor semelhantes à Testemunha (tubete plástico), indicando que o biocompósito nessa proporção não liberou substâncias fitotóxicas e manteve um microambiente favorável para o substrato.
- Nos tratamentos T3 e T4, observou-se um leve atraso no crescimento foliar. A forte barreira hidrofóbica gerada pelo excesso de breu-branco dificultou a retenção de umidade interna do substrato, exigindo irrigações mais frequentes para evitar o ressecamento da terra, fenômeno associado às características térmicas e reológicas estudadas por Almeida et al. (2026).

A análise do sistema radicular da cebolinha ao término do experimento forneceu as respostas mais promissoras sobre a eficiência do BioTube Amazônico. No tubete plástico convencional (Testemunha), as raízes fasciculadas da cebolinha bateram nas paredes impermeáveis e começaram a sofrer o processo de enovelamento (raízes espiraladas), confirmando as limitações logísticas descritas por Caldeira et al. (2021).

Em contrapartida, no tratamento T2, a textura rugosa da fibra de açaí facilitou o intertravamento mecânico e a fixação das raízes. Devido à natureza porosa e biodegradável da parede do BioTube, as raízes laterais conseguiram colonizar o substrato de forma tridimensional e iniciaram a perfuração suave das paredes do recipiente sem sofrer



deformações. Esse comportamento é ideal para o plantio direto, pois elimina o estresse do destubeteamento (Machado et al., 2024).

Apesar do limite temporal de dois meses da pesquisa, o ensaio de degradação em solo fértil trouxe indícios claros do ciclo de vida circular do material.

Após 30 dias enterrados, os fragmentos do tratamento T1 já haviam se desintegrado quase por completo devido ao ataque microbiano facilitado pela umidade. O tratamento T2 exibiu sinais claros de biodegradação preliminar: perda do brilho original da resina, alteração cromática (escurecimento), fissuras superficiais causadas pela umidade do solo e início de esfarelamento nas bordas, indicando a ação metabólica inicial de fungos e bactérias, conforme preconizado por Santana et al. (2023).

Os tratamentos T3 e T4 mantiveram-se praticamente intactos ao final dos dois meses, evidenciando que altas concentrações de triterpenos do breu-branco retardam significativamente a velocidade de ataque microbiano devido às suas propriedades antimicrobianas naturais (Ramos et al., 2024).

Os resultados obtidos demonstram que o aproveitamento do caroço de açaí associado ao breu-branco rompe com o modelo linear de descarte que assola os centros urbanos do Amapá (Rocha; Silva, 2022). O BioTube Amazônico materializa o conceito de economia circular de Stahel (2016), transformando um passivo ambiental expressivo em um insumo tecnológico para a própria preservação da Vida Terrestre (ODS 15).

A otimização encontrada no Tratamento T2 (80% de fibra de açaí e 20% de breu-branco) prova que é tecnicamente possível criar engenharia de materiais verdes competitivos a partir da sociobiodiversidade, fortalecendo a premissa de manter a "floresta em pé" com alto valor agregado tecnológico (Abramovay et al., 2023; Silva; Menezes, 2026).

Conclusões

O presente estudo comprovou a viabilidade técnica e ecológica do desenvolvimento de biocompósitos utilizando o caroço de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) e a resina de breu-branco (*Protium* spp.) como alternativa sustentável aos tubetes plásticos convencionais (PEAD/PP). Os ensaios demonstraram que as propriedades do material são dependentes da proporção mássica entre os constituintes. O Tratamento T2 (80% de fibra de açaí e 20% de breu-branco) consolidou-se como a formulação otimizada, apresentando o melhor balanço interfacial. Esta composição garantiu rigidez adequada ao manuseio, facilidade de desmolde e estabilidade dimensional frente à irrigação diária, sem sofrer lixiviação precoce.

Na validação agrônômica com cebolinha (*Allium fistulosum*), o Tratamento T2 não apresentou fitotoxicidade, mantendo desenvolvimento foliar equivalente à testemunha plástica. A porosidade do biocompósito favoreceu a arquitetura radicular e permitiu a perfuração suave das paredes do recipiente pelas raízes, mitigando o problema do enovelamento radicular e viabilizando o plantio direto no solo sem necessidade de destubeteamento. Os ensaios de degradação confirmaram o início controlado da atividade microbiana na matriz polimérica natural, reforçando o caráter biodegradável do insumo.

Como limitações, destaca-se o horizonte temporal de dois meses da pesquisa, o que restringiu a modelagem da cinética de degradação total. Diante disso, sugere-se para trabalhos futuros a ampliação dos ensaios de biodegradação em solo para períodos de 90 a 180 dias, a caracterização instrumentada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), ensaios mecânicos normalizados e análises térmicas (TGA/DSC), além da validação do recipiente com espécies florestais nativas para restauração ecológica e do estudo de viabilidade



econômica focado no escalonamento industrial do processo. Em suma, o desenvolvimento do biocompósito atende aos preceitos da Economia Circular e da Bioeconomia Amazônica, transformando um passivo ambiental massivo em um insumo tecnológico ecoeficiente alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9, 11, 12, 13 e 15) da Agenda 2030 da ONU.

Agradecimentos

Agradecemos à Escola Estadual Elias de Freitas Trajano de Souza por acreditar no potencial de seus estudantes e incentivar a pesquisa científica como parte da formação acadêmica. Nosso sincero agradecimento a diretora Rosângela de Souza, pelo compromisso com a educação e pelo apoio as iniciativas que promovem o conhecimento e a inovação. Também agradecemos a toda coordenação Pedagógica e a todo corpo Docente, que sempre esteve presente, oferecendo incentivo, confiança e suporte durante o desenvolvimento deste projeto. Este trabalho é fruto de um ambiente escolar que valoriza a educação, a ciência e a construção de um futuro mais sustentável.

Referências

- ALMEIDA, R. S.; PEREIRA, J. L.; SOUZA, F. A. Caracterização reológica e térmica da resina de breu-branco (*Protium spp.*) para aplicação como matriz termoplástica em compósitos verdes. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 36, n. 1, e2026004, 2026.
- BARROS, A. C.; MENDONÇA, T. S.; OLIVEIRA, P. R. Propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes granulometrias de caroço de açaí. *Revista Árvore*, v. 49, n. 1, p. 112-125, 2025.
- BRAMOVAY, R. et al. *The Amazon bioeconomy: Connecting traditional knowledge, innovation, and forest standing*. London: Routledge, 2023.
- CALDEIRA, M. V. W. et al. Diferentes recipientes e substratos na produção de mudas de espécies florestais nativas. *Ciência Florestal*, v. 31, n. 2, p. 745-768, 2021.
- CONCEIÇÃO, L. M.; SILVA, M. G.; RIBEIRO, J. F. Quantificação e fluxo de resíduos lignocelulósicos da cadeia do açaí nas capitais da Região Norte. *Ambiente & Sociedade*, v. 28, n. 2, e0142, 2025.
- COSTA, F. et al. *Bioeconomia para a Amazônia: conceitos, caminhos e diretrizes para o desenvolvimento sustentável*. Belém: NAEA/UFPA, 2021.
- COSTA, F. R. et al. Microstructural and chemical characterization of *Euterpe oleracea* Mart. fibers for materials reinforcement. *Journal of Renewable Materials*, v. 11, n. 4, p. 589-602, 2023.
- FERREIRA, T. H.; MACHADO, L. F.; CASTRO, R. N. Avaliação da biodegradação no solo de recipientes lignocelulósicos em plantios silviculturais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 49, n. 1, p. 45-58, 2025.



FIORE, V. et al. A review on sisal fiber and its composites. *Carbohydrate Polymers*, v. 117, p. 252-264, 2015.

GOMES, J. B. et al. Qualidade de mudas nativas e o sucesso do reflorestamento em áreas impactadas por pastagens na Amazônia Oriental. *Acta Amazonica*, v. 52, n. 3, p. 201-210, 2022.

KALIA, S.; KAITH, B. S.; KAUR, I. *Cellulose fibers: bio- and nano-polymer composites*. Berlin: Springer, 2011.

LIMA, D. N.; CARVALHO, L. A.; CORRÊA, G. B. Biorrefinarias na Amazônia: rotas tecnológicas para o aproveitamento integral de subprodutos agroindustriais. *Estudos Avançados*, v. 38, n. 110, p. 89-106, 2024.

MACHADO, L. F. et al. Desenvolvimento e caracterização de tubetes biodegradáveis para a produção de mudas florestais. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 29, n. 2, e13540, 2024.

MARINHO, S. C. et al. Biomass characterization of açai (*Euterpe oleracea*) stones for sustainable materials development. *Industrial Crops and Products*, v. 195, p. 116-128, 2023.

MENDES, F. A.; LOPES, G. S.; TEIXEIRA, M. N. Uso de resinas naturais da sociobiodiversidade como aglomerantes ecológicos na produção de painéis de partículas. *Química Nova*, v. 46, n. 8, p. 754-763, 2023.

MESQUITA, A. L. et al. Composição química, teor de lignina e estabilidade térmica da fibra do caroço do açai (*Euterpe oleracea*). *Revista Virtual de Química*, v. 14, n. 5, p. 1012-1021, 2022.

MORAIS, J. W. et al. Biocompósitos reforçados com fibras vegetais da Amazônia: uma revisão das propriedades mecânicas e térmicas. *Scientia Amazonia*, v. 11, n. 1, p. 12-28, 2022.

NANDA, S. et al. Innovations in biodegradable plastics and sustainability: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 19, p. 3201-3218, 2021.

NASCIMENTO, W. R.; OLIVEIRA, M. F.; SOUZA, K. C. Sobrevivência de mudas de espécies nativas no pós-plantio de áreas degradadas sob diferentes manejos de recipientes. *Cerne*, v. 30, n. 1, e-202309, 2024.

OLIVEIRA, P. H. et al. Emissões gasosas e material particulado resultantes da queima do caroço de açai em indústrias cerâmicas no estado do Pará. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 28, n. 4, p. 611-620, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: ONU, 2015.



PINTO, A. S.; MENDES, J. C.; ROCHA, G. F. Logística reversa e ciclo de vida de recipientes plásticos na produção de mudas florestais. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 12, n. 2, e2204, 2023.

RAMOS, D. F. et al. Phytochemical profile and antimicrobial activity of the resinous exudate from *Protium heptaphyllum*. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 319, p. 117-129, 2024.

ROCHA, L. S.; SILVA, M. S. O passivo ambiental do açaí: desafios na gestão urbana de resíduos sólidos em Belém-PA. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 14, e2021034, 2022.

SANTANA, L. K. et al. Biodegradabilidade de polímeros naturais e sintéticos em condições de compostagem e solo: mecanismos e avaliação. *Progress in Polymer Science (Ed. em Português)*, v. 15, n. 2, p. 88-104, 2023.

SANTIAGO, M. N. et al. O breu-branco (*Protium* spp.) na Amazônia: ocorrência, métodos de extração e potencial de mercado. *Biodiversidade Brasileira*, v. 12, n. 1, p. 34-47, 2022.

SANTOS, I. M. et al. Cadeia de valor do açaí: governança, sustentabilidade e inovação na Amazônia. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 59, n. 3, e22810, 2021.

SILVA, J. A.; MENEZES, T. C. Engenharia de materiais verdes a partir da biodiversidade amazônica: patentes, gargalos e perspectivas futuras. *Materials Research (São Paulo)*, v. 29, n. 1, e2026010, 2026.

SILVA, T. R. et al. Efeitos de tratamentos químicos superficiais sobre a hidrofilicidade de fibras lignocelulósicas residuais. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 29, n. 1, e13412, 2024.

SOUZA, H. M. et al. Impactos do descarte de caroços de açaí sobre a qualidade microbiana e físico-química de solos e igarapés periféricos. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 36, e104, 2024.

SOUZA, K. R. et al. Economia circular e valorização de subprodutos da agroindústria amazônica: rotas de inovação e transição ecológica. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 29, n. 2, e2401, 2025.

STAHEL, W. R. The circular economy. *Nature*, v. 531, n. 7595, p. 435-438, 2016.

TEIXEIRA, M. C. et al. Mechanical and physical behavior of biocomposites reinforced with raw açaí fiber. *Polymer Composites*, v. 42, n. 11, p. 5745-5755, 2021.

VALE, E. F. et al. Políticas públicas para a bioeconomia e a transição circular na Amazônia Legal. *Novos Cadernos NAEA*, v. 27, n. 1, p. 143-165, 2024.

VIEIRA, L. S. et al. Triterpene profiles of *Protium* resin via GC-MS and their significance in material adhesion. *Phytochemical Analysis*, v. 34, n. 6, p. 678-689, 2023.