

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA - PPGBIOTEC
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DAS CINZAS DE CURAUÁ
(*Ananas comosus* var. *erectifolius* L. B. Smith) PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Tese apresentada ao Programa Multi-Institucional de Pós-Graduação em Biotecnologia da Universidade Federal do Amazonas como parte das exigências para obtenção do título de Doutor.

Orientador: PhD. Luiz Antonio de Oliveira
Coorientador: Prof. Dr. Francisco Xavier Nobre

MANAUS
Março – 2026

JOSÉ LUIZ ZANIRATO MAIA

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DAS CINZAS DE CURAUÁ
(*Ananas comosus* var. *erectifolius* L. B. Smith) COM VISTAS A PRODUÇÃO DE
BIODIESEL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. Linha de pesquisa: Gestão da inovação em biotecnologia.

Orientador: Dr. Luiz Antonio de Oliveira - INPA
Coorientador: Dr. Francisco Xavier Nobre - IFAM

MANAUS
Março – 2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M217a Maia, José Luiz Zanirato
Análise das características físico-químicas das cinzas de curauá (*Ananas comosus* var. *Erectifolius* L. B. Smith) para a produção de biodiesel / José Luiz Zanirato Maia. - 2026.
80 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Luiz Antonio de Oliveira.
Coorientador(a): Francisco Xavier Nobre.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Manaus, 2026.

1. Fibras vegetais. 2. Bioeconomia. 3. Biocombustíveis. 4. Sustentabilidade. 5. Cadeias produtivas. I. Oliveira, Luiz Antonio de. II. Nobre, Francisco Xavier. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. IV. Título

JOSÉ LUIZ ZANIRATO MAIA

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DAS CINZAS DE CURAUÁ
(*Ananas comosus* var. *erectifolius* L. B. Smith) PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Tese com vistas a aprovação para doutorado no
Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia
– PPGBIOTEC, na Universidade Federal do
Amazonas – UFAM. Área de concentração:
Biotecnologia.
Linha de pesquisa: Gestão da inovação em
biotecnologia.

Aprovado em 16 de março de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Antonio de Oliveira
Presidente

Prof. Dr. Carlos Augusto de Azevedo
Membro

Prof. Dr. José Ferreira da Silva
Membro

Profª. Dra. Ires Paula de Andrade Miranda
Membro

Prof. Dra Milena Gaion Malosso
membro

A Deus, aos meus pais, meus familiares e amigos que sempre me apoiaram em todos os momentos dessa trajetória, quer seja por meio de elogios ou de críticas construtivas, assim contribuindo para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir a concretização dessa meta.

Ao meus pais, Gumercindo Zanirato Maia e Berta Maria Maia que me transmitiram os valores que tem me norteado durante minha vida, e ao amor que depositaram sobre mim.

Ao meu orientador Prof. Ph.D. Luiz Antonio de Oliveira, que excedeu os limites da academia, tornando-se um grande amigo e mentor.

Ao meu coorientador, Dr. Francisco Xavier Nobre, pelo acompanhamento constante e comprometimento com a pesquisa científica através do exercício da docência.

Ao Prof. PhD Carlos Augusto de Azevedo, grande referência científica e pessoal.

Ao meu saudoso amigo Prof. PhD Pedro Ivo Soares Braga, que me incentivou a abraçar esse destino, quando eu não acreditava ser possível.

A todos os meus amigos pelo apoio e pelo carinho durante essa jornada.

Aos colegas pesquisadores da UFAM, UEA, IFAM e INPA que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, e sem os quais não seria possível realizá-lo.

À Universidade Federal do Amazonas, pela oportunidade de participar do programa de biotecnologia.

Ao Estado do Amazonas, que serviu de inspiração para esse trabalho e para muitos outros projetos.

O ensino, como a justiça, como a administração, prospera e vive muito mais realmente da verdade e moralidade, com que se pratica, do que das grandes inovações e belas reformas que se lhe consagram (Rui Barbosa).

RESUMO

A utilização de recursos naturais tem despertado crescente interesse mundial. Nesse contexto, diferentes fontes renováveis vêm sendo estudadas como alternativas aos polímeros sintéticos ou para aprimorar propriedades de materiais existentes. Entre essas fontes, destaca-se a fibra de curauá (*Ananas comosus* var. *erectifolius* L. B. Smith), que apresenta alta resistência, baixa densidade, elevada finura e elevado teor de celulose. Tais características tornam-na promissora para o desenvolvimento de compósitos e nanocelulose. Este trabalho investigou as propriedades morfológicas, químicas e estruturais das fibras e cinzas de curauá, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX). As fibras revelaram morfologia típica de materiais lignocelulósicos, enquanto as cinzas, obtidas por pirólise, apresentaram partículas irregulares e enriquecimento inorgânico, com predominância de Ca, K, Si, Fe, S e P. Os resultados confirmaram a presença de fases cristalinas estáveis, como K_2SO_4 , $CaSO_4$ e SiP_2O_7 , evidenciando o potencial do curauá como biomassa para aplicações tecnológicas em materiais cerâmicos, aditivos minerais e compósitos sustentáveis. Além disso, demonstrou-se a viabilidade do uso das cinzas como catalisador para reaproveitamento de óleo residual na produção de biodiesel. Os resultados inéditos obtidos indicam impactos tecnológicos, econômicos, sociais e ambientais relevantes, reforçando a importância da bioeconomia na Amazônia.

Palavras-chave: fibras vegetais; bioeconomia; biocombustíveis; sustentabilidade; cadeias produtivas.

ABSTRACT

The use of natural resources has attracted increasing global interest. In this context, various renewable sources have been studied as alternatives to synthetic polymers or to improve the properties of existing materials. Among these sources, curauá fiber (*Ananas comosus* var. *erectifolius* L. B. Smith) stands out due to its high strength, low density, fineness, and high cellulose content. These features make it promising for the development of composites and nanocellulose. This study investigated the morphological, chemical, and structural properties of curauá fibers and ash using scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), and X-ray diffraction (XRD). The fibers exhibited typical lignocellulosic morphology, while the ash, obtained by pyrolysis, showed irregular particles and inorganic enrichment, with predominance of Ca, K, Si, Fe, S, and P. The results confirmed the presence of stable crystalline phases such as K_2SO_4 , $CaSO_4$, and SiP_2O_7 , highlighting curauá's potential as biomass for technological applications in ceramics, mineral additives, and sustainable composites. Furthermore, the feasibility of using curauá ash as a catalyst for waste oil reuse in biodiesel production was demonstrated. These unprecedented findings indicate significant technological, economic, social, and environmental impacts, reinforcing the importance of bioeconomy in the Amazon region.

Keywords: plant fibers; bioeconomy; biofuels; sustainability; production chains.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxo de processos para produção do Curauá	Pág. 15
Figura 2	Potencial econômico do curauá na estruturação de cadeias produtivas	Pág. 16
Figura 3	Cultivo de curauá em campo	Pág. 18
Figura 4	Colheita manual das folhas do curauá	Pág. 20
Figura 5	Fibras vegetais extraídas mecanicamente	Pág. 21
Figura 6	Esquema de processo para formação dos biocompósitos	Pág. 26
Figura 7	Principais palavras-chave relacionadas aos termos de pesquisa usados na busca na base de dados Scopus.	Pág. 41
Figura 8	(a) número e porcentagem de documentos por país (à esquerda) e (b) tipo de documento (à direita) para curauá.	Pág. 47
Figura 9	Principais financiadores de recursos para o desenvolvimento de projetos e pesquisas relacionadas às buscas realizadas.	Pág. 48
Figura 10	Preparação das cinzas de curauá	Pág. 53
Figura 11	Imagens MEV das fibras de curauá	Pág. 59
Figura 12	Padrão de difração da (a) biomassa e (b) cinzas das fibras do curauá	Pág. 61
Figura 13	Representação esquemática da célula unitária do (a) K_2SO_4 , (b) SiP_2O_7 e (c) $CaSO_4$	Pág. 62
Figura 14	Valores observados versus valores previstos para 3 fatores e 2 níveis	Pág. 70
Figura 15	Gráfico de Pareto analisando o grau de influência das variáveis na conversão do biodiesel	Pág. 70
Figura 16	Gráfico de contorno do efeito do tempo de reação e da relação temperatura sobre a conversão de FAME (%) (a) e da temperatura de reação e da relação molar metanol: óleo sobre a conversão de FAME (%) (b).	Pág. 70
Figura 17	Hipercubo para demonstrar a previsão da correlação entre as variáveis medidas para o processo de conversão metanol: óleo realizado em Phyton	Pág. 71
Figura 18	Hipercubo para demonstrar a previsão da correlação entre as variáveis medidas para o processo de conversão de metanol em óleo	Pág. 72
Figura 19	Superfície ajustada – Variável: Taxa de conversão (%) para 3 fatores e 2 níveis	Pág. 72
Figura 20	Curvas de caracterização dos elementos presentes nas amostras.	Pág. 73
Figura 21	Curva de adsorção x temperatura das amostras	Pág. 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Relação entre a produtividade versus receitas com o plantio do curauá	Pág. 20
Tabela 2	Propriedades físico-químicas do óleo de soja refinado	Pág. 29
Tabela 3	Total de documentos, documentos publicados nos últimos 10 anos e proporção de estado da arte (SA) da base de dados Scopus correspondentes às palavras-chave: curauá, <i>Ananas erectifolius</i> , curauá e <i>Ananas erectifolius</i> e curauá ou <i>Ananas erectifolius</i> .	Pág. 41
Tabela 4	Título dos manuscritos, ano de publicação, título dos periódicos, fator de impacto (FI) e citações.	Pág. 46
Tabela 5	Autor, publicações, índice H, citações e filiação.	Pág. 49
Tabela 6	Tratamento do solo	Pág. 54
Tabela 7	Resultado da análise elementar semiquantitativa para os elementos presentes na biomassa moída e cinzas do curauá, como também, os teores reportados pela literatura consultada	Pág. 60
Tabela 8	Variáveis independentes de Box-Behnken (codificadas e não codificadas) para a otimização das variáveis de reação no processo de transesterificação	Pág. 66
Tabela 9	Desenho experimental para a otimização de várias variáveis de reação na reação de transesterificação	Pág. 66
Tabela 10	Relação entre as variáveis do estudo e a taxa média de conversão do biodiesel	Pág. 67
Tabela 11	Coefficientes de regressão estimados para a taxa de conversão em %	Pág. 67
Tabela 12	Análise de variância (ANOVA) para % de taxa de conversão	Pág. 69
Tabela 13	Valores observados versus valores previstos da taxa de conversão óleo/metanol para a produção de biodiesel.	Pág. 69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Ácido Naftalenoacético
ALD	Deposição de Camada Atômica
BAP	6-benzilaminopurina
CBA	Cost-Benefit Analysis
CBA	Centro de Bioeconomia da Amazônia
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CVD	Deposição Química em fase de Vapor
DRX	Difratometria de Raios-X
DTG	Termogravimetria Derivada
FCA	Faculdade de Ciências Agrárias
FTIR	Espectroscopia do Infravermelho com Transformada de Fourier
GEE	Gases de Efeito Estufa
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
LCA	Life Cycle Assessment
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MEV	Microscópio eletrônico de Varredura
Mpa	Mega Pascal
MRE	Ministério das Relações Exteriores
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PVC	Policloreto de polivinila
RDC	Resolução de Diretoria Colegiada
RNEA	Relatório Nova Economia da Amazônia
TC	Teor de Cinzas
TG	Termogravimetria
UFAM	Universidade Federal do Amazonas

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

1.1	Contextualização da pesquisa	14
1.2	Potenciais aplicações	16
1.3	Aplicações dos subprodutos/derivados do Curauá	17
1.4	Características vegetativas e físicas do curauá	18
1.5	Taxonomia	19
1.6	Fibras Vegetais	19
1.7	Métodos de replicação convencionais e biotecnológicos	22
1.8	Justificativa	23
1.9	Problemática	29
1.10	Hipóteses	30
1.11	Objetivos	30

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1	Bioeconomia	31
2.2	Análise bibliométrica para determinação do estado da arte de pesquisas sobre o curauá (<i>Ananas comosus</i> var. <i>erectifolius</i>): características, aplicações e tendências	36

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1	Etapas detalhadas do processo	51
3.2	Síntese do catalisador de cinzas de curauá	52
3.3	Procedência do material vegetal	53
3.4	Descrição da área experimental	53
3.5	Delineamento experimental	54
3.6	Caracterizações	56

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1	Análise morfológica: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das fibras	57
4.2	Espectroscopia de Fluorescência de raios X (FRX)	60
4.3	Difração de raios X (DRX)	61
4.4	Composição elementar por FRX	63
4.5	Purificação do biodiesel	64
4.6	Ressonância Magnética Nuclear	65
4.7	Otimização da conversão de FAME utilizando a metodologia de superfície de resposta (RSM)	65
4.8	Resultados de XRD (MEV/EDS)	73
4.9	Resultados do BET	73
4.10	Análise dos resultados	74

5. CONCLUSÕES

	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
--	----------------------------	----

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização da pesquisa

O curauá (*Ananas comosus* var. *erectifolius* L. B. Smith) é uma bromeliácea terrestre de pequeno a médio porte, herbácea, monocotiledônea e perene, possui folhas eretas, coriáceas e duras. Possui duas variedades distintas, o curauá branco, com folhas verdes claro, e o curauá roxo, com folhas avermelhadas. Suas folhas têm em média 4 a 5cm de largura e até 1,5m de comprimento CORDEIRO et al., (2011). É uma planta uma planta rústica, nativa da Amazônia, bastante adaptada aos diferentes tipos de solos regionais, crescendo bem tanto em solos argilosos como arenosos, sendo uma espécie ainda pouco estudada. A crescente demanda da fibra do curauá por diversos segmentos industriais (eletroeletrônica, injeção plástica, fitofármacos, automobilística etc.) a tornou uma espécie estratégica, criando uma perspectiva social e ambiental para seu uso Campelo et al., (2021).

Devido às suas características vegetativas relacionadas ao ciclo curto de produção (cerca de oito meses) e ao grande porte das plantas, com grande potencial para a produção de fibras naturais, são consideradas de grande importância para o mercado. A crescente demanda pelo uso de fibras naturais deve-se principalmente à crescente atenção global quanto à conservação ambiental e ao uso econômico de matérias-primas renováveis. Matérias-primas de fontes renováveis, recicláveis e biodegradáveis são uma das alternativas para a produção de manufaturados ecologicamente corretos, pois o acúmulo de materiais não biodegradáveis nos descartes aumenta à medida que cresce a população dos centros urbanos.

A substituição de matérias-primas renováveis por materiais derivados do petróleo na produção de compostos elastoméricos atende a esses ideais. A fibra desta planta possui alta resistência, maciez e leveza Campelo et al., (2021). As fibras extraídas das folhas do curauá possuem alta resistência mecânica, além de uma massa pequena, possibilitando, assim, diferentes aplicações para as mais diversas cadeias produtivas, como, por exemplo: material para reforço em compósitos, no desenvolvimento de novos materiais, para aplicações desde segmento de madeira e móveis, construção civil, naval, automobilística, saúde, eletroeletrônicos, têxtil etc. A fibra de carauá também tem potencial, com vantagens, como substituto para a fibra de vidro, devido às suas propriedades mecânicas (alto módulo, superior até mesmo ao do aço), que se apresenta com maior resistência do que outras fibras naturais, como o sisal, a fibra de coco, a

malva e a juta. Dependendo do tipo de produto, a fibra de Curauá pode ser usada desde proporções que variam entre 5 e 30% da matéria prima até 50%, quando associada a materiais menos nobres, como por exemplo resíduos de madeira e similares, com adição de resinas, de acordo com as especificações da matéria prima a ser substituída.

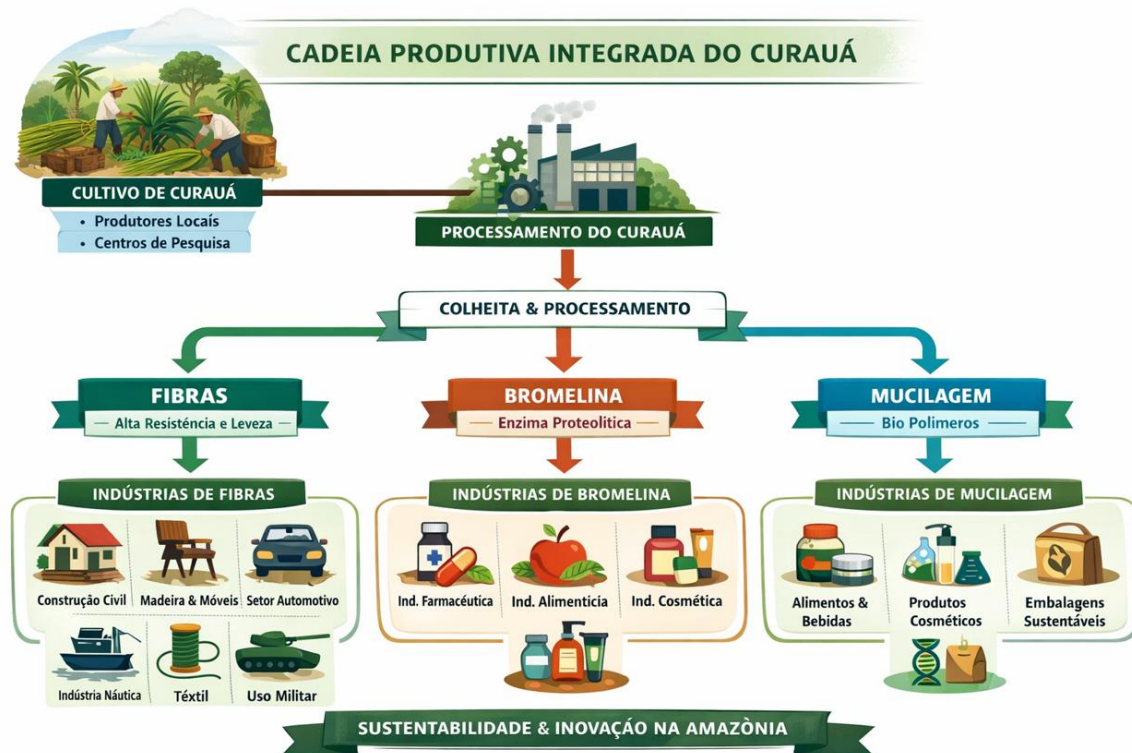
A fibra de curauá tem grande potencial para ser utilizada também como reforço em biocompósitos, sendo atualmente inviável, devido a pequena área cultivada, e consequentemente à baixa produção e à falta de infraestrutura para produzir as fibras para a indústria, dessa forma, muitas vezes, o curauá termina por ser substituído por outros tipos de fibras vegetais Ramamoorthy et al. (2015). A figura 1 demonstra o fluxo de processos para garantir a produção em escala para atender as demandas das empresas para inserção das matérias primas em diferentes cadeias produtivas.

Figura 01: Fluxo de processos para produção do Curuá



A figura 02 demonstra as etapas para processamento e beneficiamento de insumos oriundos da biodiversidade amazônica, de forma inédita e com grande potencial de inserção em diversas cadeias produtivas, com foco no desenvolvimento de produtos sustentáveis e da mitigação de emissão de gases de efeito estufa – GEE.

Figura 02: Potencial econômico do curauá na estruturação de cadeias produtivas.



A fibra do curauá é conhecida por sua baixa densidade e alta resistência à tração, sendo um substituto sustentável para a fibra de vidro.

1.2 Potenciais aplicações:

- 1.2.1 Construção Civil: Utilizada como reforço em compósitos de cimento e concreto para evitar fissuras e melhorar o isolamento térmico/acústico.
- 1.2.2 Madeira e Móveis: Fabricação de painéis de partículas (aglomerados) e MDF ecológico, além de reforço em mobiliário de design sustentável.
- 1.2.3 Náutica: Fabricação de cascos de barcos e componentes internos que exigem resistência à umidade e baixo peso.
- 1.2.4 Têxtil: Produção de fios de alta tenacidade para tecidos técnicos e vestuário de alta performance.
- 1.1.1 Automotiva: Painéis internos, consoles e suportes de teto (grandes montadoras já utilizam o curauá para reduzir o peso dos veículos).

1.1.2 Militar: Desenvolvimento de blindagens leves e compósitos para equipamentos de proteção individual.

1.3 Aplicações dos subprodutos/derivados do Curauá

1.3.1 Bromelina: Extraída principalmente do talo e do fruto, esta enzima possui alto valor agregado no mercado global.

- a) Indústria Farmacêutica: Utilizada em medicamentos anti-inflamatórios, auxiliares digestivos e no tratamento de queimaduras (desbridamento de tecidos).
- b) Indústria Alimentícia: Agente amaciante de carnes e clarificante em processos de fabricação de bebidas (cervejas e sucos).
- c) Indústria Cosmética: Atua em peelings enzimáticos e cremes renovadores celulares, devido à sua capacidade de digerir proteínas mortas da pele.

1.3.2 Mucilagem: O subproduto do desfibramento, antes descartado, hoje é visto como uma base para a economia circular.

- a) Indústria Alimentícia: Atua como espessante natural e estabilizante em molhos, iogurtes e sobremesas.
- b) Medicinais e Cosméticos: Base para hidrogéis, curativos cicatrizantes e formulações de "beleza limpa" (clean beauty).
- c) Biotecnologia: Meio de cultura para microrganismos e base para o desenvolvimento de novos biomateriais.
- d) Embalagens Sustentáveis: Criação de filmes biodegradáveis e bioplásticos para substituir polímeros derivados de petróleo.

A produção de nanofibras é outro campo importante que vem sendo estudado para aplicação da fibra de curauá como matéria-prima, por exemplo, devido ao alto teor de celulose, presente em aproximadamente 70% Caraschi, Leão, (2001). Diversas estruturas podem ser obtidas dependendo do tipo de processo aplicado, dessa forma o uso potencial como reforço dessas nanofibras de curauá ou nanofibras de celulose tem sido estudado. Resultados obtidos por Souza et al. (2005), mostraram uma tendência ao aumento das propriedades mecânicas do álcool polivinílico em compósitos. Outros aspectos que contribuem para valorização do uso da fibra do curauá refere-se ao baixo impacto ambiental em comparação com outras fibras, especialmente as artificiais. Se considerarmos a escala nano, o potencial da fibra de curauá é

ainda maior, comparável ao das fibras artificiais de alto desempenho, tal como a fibra de carbono.

1.4 Características vegetativas e físicas do curauá

O curauá possui fibras lignocelulósicas, estando entre as mais singulares do Brasil, sendo reconhecida desde os tempos pré-colombianos por suas aplicações Tomczak; Satyanarayana; Sydenstricker, (2007). a espécie tem grande área de dispersão, ocorrendo também em outros países da Floresta Amazônica, tais como Guiana, Colômbia, Venezuela e Suriname, sendo identificada por nomes diferentes, como kurowa, curaua, caroa, abacaxi selvagem etc. Essas plantas são utilizadas pelos habitantes na confecção de inúmeros utensílios, como cordas para arcos, redes de pesca, redes de dormir e utilizadas também como mercadoria de troca com outras tribos.

Uma pesquisa realizada por Leao et al., (2015), chegou à conclusão de que todas as plantas encontradas nas diferentes áreas da Amazônia possuem o mesmo genótipo. Na bacia do rio Amazonas, especificamente na região oeste do estado do Pará, a fibra é muito popular, uma vez que nessa região se encontram as primeiras plantações comerciais de curauá Zah et al., (2007). Na figura 03 temos um exemplo de plantio do curauá em campo, com baixo impacto em relação a associação com outras culturas regionais.

Figura 03: Cultivo de curauá em campo



Fonte: <https://blogdohiellevy.com.br/> (adaptado pelo autor)

A planta possui folhas rígidas, eretas e de superfície plana. As suas dimensões são de aproximadamente 1 a 1,5 m de comprimento, 40 mm de largura e 5 mm de espessura, Tomczak;

Satyanarayana; Sydenstricker, (2007). Em geral, cada planta produz cerca de 50-60 folhas/ano, com peso médio de 150 g cada, num povoamento de alta densidade de 40.000 a 50.000 plantas, o que resulta em uma produção de 3 a 9 toneladas de fibras secas por hectare/ano, sem irrigação e com precipitação anual superior a 2.000 mm/ano. No entanto, a exploração de melhores métodos e técnicas de manejo da cultura, como o preparo do solo (preparo e nivelamento com métodos mecanizados), aplicação de fertilizantes (NPK) e pesticidas, e procedimentos de corte raso, podem aumentar a produção para dois dígitos Tomczak; Satyanarayana; Sydenstricker, (2007), Zah et al., (2007).

1.5 Taxonomia

As espécies do gênero *Ananas*, como o curauá, pertencem à família Bromeliácea, composta por três subfamílias: Bromelioideae, Pitcairnioideae e Tillandsioideae. Segundo Krah, (2013), foram descritos 56 gêneros e 3086 espécies da família bromeliáceas. A diferenciação entre subfamílias se dá por meio de características anatômicas, como: margem foliar, posição do ovário, tipo de fruto, hábito de crescimento e semente. No Brasil, foram descritas 1207 espécies de bromeliáceas e 42 gêneros.

Dentro das Bromeliaceae algumas espécies se destacaram como fontes de fibras para compósitos, sendo o gênero *Ananas* (especialmente *Ananas comosus*, o abacaxi) o mais relevante, utilizado industrialmente para produção de fibras como o “piña fiber” nas Filipinas e em pesquisas de biocompósitos no Brasil. Outras bromélias como *Neoglaziovia variegata* também são conhecidas por fornecer fibras resistentes, entretanto os resultados não chegam próximo aos obtidos pelo Curauá.

1.6 Fibras Vegetais

Fibra vegetal também conhecida como fibra lignocelulósica, é um material orgânico composto basicamente pelos seguintes elementos químicos: carbono, oxigênio, hidrogênio e o nitrogênio dispostos em macromoléculas de celulose, polioses (hemicelulose) e lignina. Logo, também estão relacionados a compostos de extração, como: solventes orgânicos, resinas, óleos, pectinas, carboidratos simples (açúcares), terpenos, alcaloides, saponinas, polifenóis, gomas, gorduras e compostos inorgânicos Silva e Aquino, (2008).

As fibras também podem ser classificadas como células dentro de uma diversidade de tipologias celulares que compõem tecidos vegetais. Caracterizam-se morfológicamente por terem formas alongadas e extremidades finas. As paredes das fibras tornam-se mais grossas, rígidas e lignificadas conforme a planta amadurece. Fisiologicamente, as fibras proporcionam sustentação mecânica aos tecidos vegetais, localizados, em sua maioria na parte aérea da planta, formada respectivamente por caule, folhas, frutos e sementes Cutler et al. (2011). Entretanto, o que denominamos de fibras, são células oriundas de tecido parenquimático, ou fibras elementares associadas a feixes vasculares de transporte de seiva Defoirdt et al. (2010).

Figura 04. Colheita manual das folhas do curauá



Fonte: Pematec Triangel -www.pematec.com.br/curaua.htm)

Tradicionalmente, as fibras vegetais (Figura 04) eram utilizadas para fabricação de produtos artesanais, como redes, linhas de pesca e cordas. Porém, na década de 90, após o reconhecimento comercial pelas indústrias automobilísticas brasileiras, as fibras passaram a ser aplicadas na confecção de painéis de portas, painéis de instrumentos e outras peças internas de automóveis, ônibus e caminhões Tomczak et al., (2007), Zah et al., (2007), conforme Leão et al. (2013).

Tabela 01: Relação entre a produtividade versus receitas com o plantio do curauá

Ativos	Produtividade (kg/ha)	Área utilizada (ha)	Produtividade Total (kg)	Receita Unit.	Ano 1
Curauá	3700	100	370000	R\$ 9,00	R\$ 3.330.000,00
Bromelina	74	100	7400	R\$ 400,00	R\$ 2.960.000,00
Mucilagem	370	100	37000	R\$ 3,00	R\$ 111.000,00
					R\$ 6.401.000,00

Sobre a tabela 01 é importante observar que os dados apresentados se referem às informações disponíveis sobre a produtividade média, quando feito cultivo em grande escala do curauá, entretanto os valores apresentados podem mudar de acordo com diversos fatores, tais como: tipos de solo, adubação, irrigação ou aspectos climáticos da região, assim como os valores estimados para venda, a partir da razão oferta e demanda do mercado, conforme o cliente e aplicação da matéria prima.

Figura 05. Fibras vegetais extraídas mecanicamente.



Fonte: <https://www.researchgate.net/publication/321682067> (consultado em 26/05/2025)

A figura 5 apresenta o visual das fibras de curauá depois do desfibramento, lavagem e secagem. A fibra é composta quimicamente por 73,6% de celulose, 9,9% de hemicelulose, 7,5% de lignina, segundo Leão e Caraschi, (2006). O curauá possui baixo teor de lignina quando comparado a outras fibras, como a juta (16%), o bagaço de cana-de-açúcar (25%) e a fibra de coco (43%), Trindade et al., (2008). Possui alto grau de cristalinidade, variando de 67 a 75,6%, devido ao alto teor de celulose Tomczak et al., (2007), Trindade et al., (2008). Souza, Silva e Fujiyama (2005) compararam as fibras de curauá com juta e coco e relataram que o curauá apresentou o maior alongamento na ruptura e a maior resistência à carga, seguido por uma combinação de duas fibras, malva e juta.

1.7 Métodos de replicação convencionais e biotecnológicos

1.7.1 Métodos convencionais

As plantas de curauá podem ser propagadas a partir da divisão de brotos que emergem da base e da copa da planta adulta. No entanto, este método dá origem a um número reduzido de plântulas e não uniforme dificultando a colheita mecânica. Moreira; (2014) elaborou uma dissertação de mestrado com o objetivo de caracterizar o banco de germoplasma de plantas de curauá na região amazônica, uma vez que as aplicações industriais da planta exigirão grandes e uniformes quantidades de fibras. As técnicas utilizadas foram a micropropagação e a embriogênese somática de segmento foliar de curauá, que resultaram em diferenças significativas entre os grupos.

1.7.2 Métodos biotecnológicos

A micropropagação *in vitro* é a aplicação mais prática da cultura de tecidos vegetais. A técnica tem demonstrado grande eficiência na produção de plantas mais uniformes e sadias em relação aos métodos convencionais de reprodução Machado et al, (2009); Santos et al., (2005). Embora a composição do meio de cultura seja suficientemente conhecida, muitas outras variáveis são essenciais nesse processo, como os procedimentos preliminares para a escolha da matriz, o tipo e a forma de excisão dos explantes, sua desinfestação e proteção antioxidante, as condições ambientais de cultivo (temperatura, umidade relativa do ar, luminosidade, fotoperíodo, entre outros), as condições de manejo das subculturas e a transferência das plântulas para condições *ex vitro*.

O cultivo *in vitro* pode conduzir a fibras de alta qualidade, com características muito uniformes e otimizar a produção de fibras. A diferenciação de gemas apicais e a multiplicação de brotos, etapas importantes da micropropagação *in vitro*, são viáveis para as plantas de curauá. Explantes (3 a 5 mm de comprimento) podem ser obtidos de plantas jovens ainda em fase de crescimento vegetativo.

O tratamento com o fungicida Cercobin 70%, seguido de imersão numa solução de etanol 70%, e depois numa solução de hipoclorito de sódio a 2. 5%, tem-se revelado eficaz no controlo da contaminação por microrganismos; o tratamento com solução antioxidante (ácido ascórbico), antes da inoculação *in vitro*, tem-se revelado essencial para a proteção dos explantes nas fases

de diferenciação celular e estabelecimento dos meristemas que deve ser feita em escuridão total por um período de 20 dias; o equilíbrio dos reguladores vegetais (1,0 mg L⁻¹ ANA + 2,0 mg L⁻¹ BAP) estimulam a proliferação e o crescimento in vitro de *Ananas erectifolius* L.B. Smith Garcia et al., (2010). Esse fato possibilita a qualquer empresa suprir em escala industrial a demanda de fibra de curauá.

1.8 Justificativa

As fibras de origem vegetal podem ser utilizadas no desenvolvimento de novos "compostos verdes" ecologicamente corretos, uma vez que a poluição ambiental é minimizada e as florestas tropicais florestas tropicais são preservadas. A redução do consumo de energia e a minimização dos impactos ambientais também têm sido fatores significativos na expansão da aplicabilidade dos compósitos reforçados com fibra vegetal em uma ampla variedade de cadeias produtivas.

As fibras vegetais possuem grandes vantagens sobre as fibras sintéticas, incluindo biodegradabilidade, leveza, baixo custo, não-abrasividade e propriedades mecânicas aceitáveis. Entretanto, as propriedades inerentes às fibras vegetais, como qualidade variável da fibra, baixas propriedades mecânicas, teor de umidade, baixa resistência ao impacto, falta de integração com matrizes de polímeros hidrofóbicos e uma tendência natural à aglomeração, representam desafios para o desenvolvimento e a aplicação de compósitos de fibra vegetal.

A ênfase de nosso estudo visa a superação dessas limitações, para melhorar o desempenho dos compostos de fibra vegetal e suas aplicações. Com base nesse conceito passamos a apresentar possíveis aplicações para as fibras vegetais.

1.8.1 Indústria automotiva

Apesar de existir diversas pesquisas em vários âmbitos, voltados para o uso do curauá como insumo para diversos produtos a grande maioria das aplicações é voltada para o setor automobilístico, basicamente como aplicação para revestimentos dos veículos, com vistas a prover o isolamento acústico e térmico, ou ainda simplesmente para enchimento dos bancos.

Os compósitos reforçados com fibra de curauá são especialmente promissores no setor automotivo porque poderiam substituir os compósitos de fibra de vidro para peças automotivas,

uma vez que podem alcançar propriedades satisfatórias, com menos problemas de descarte. Embora os compósitos de fibra de curauá possam atingir resistência à tração de 160 MPa (fibras não tratadas), Gomes et al. destacaram que os compósitos de curauá com resistência à tração em torno de 130 MPa não podem ser aplicados com sucesso para substituir as fibras de vidro para essas aplicações, cujos compósitos podem atingir 288 MPa. Para aumentar o fator de segurança dos compósitos de curauá, diferentes configurações e tratamentos de fibra podem ser testados.

1.8.2 Construção Civil

Materiais compostos reforçados com fibras celulósicas de madeira e outras fontes de fibras são alternativas de uma promissora classe de produtos de construção, permitindo uma construção, especialmente quando aplicados de forma modular em canteiros de obras, por meio da eliminação de uma série de etapas e outros problemas na implementação de mudanças finais. Algumas das muitas vantagens de usar os painéis como elementos de construção elementos de construção incluem precisão geométrica, variedade de tamanho, acabamento e facilidade de instalação Matoski et al., (2013). São materiais ecologicamente corretos, de baixo custo, oferecem desempenho técnico adequado e requerem baixo nível de industrialização para o processamento Maden e Gamstedt, (2013). Além disso, permitem agregar valor à materiais de baixa aceitação, como como desbaste de madeira, resíduos de processamento de madeira e outras fibras naturais Sá et al., (2010), bem como podem reduzir ou eliminar características indesejáveis, como o tamanho original da matéria-prima material, defeitos naturais, higroscopicidade e anisotropia Paula et al., (2009).

O uso de componentes originários da madeira, como as como as fibras vegetais, ainda não é significativo na construção civil devido à falta de compreensão dos mecanismos e tecnologias envolvidas na interface entre o cimento e os materiais cimento e materiais lignocelulósicos para o desenvolvimento de materiais compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais fibras vegetais Fan et al., (2012). Entre as possíveis dificuldades na fabricação de painéis compostos de madeira, os painéis compostos de cimento podem ser mencionados como compostos fenólicos compostos fenólicos, ácidos, açúcares solúveis, resinas e extrativos de fibras lignocelulósicas que podem ser responsáveis pelo retardo ou até mesmo a prevenção total da pega, pois ao entrar em contato com o ambiente alcalino gerado pelo cimento, solubilizam-se e reagem com este, impedindo a cristalização e o endurecimento Iwakiri e Prata, (2008).

Para superar essas possíveis incompatibilidades químicas entre a matriz cimentícia e as fibras com altos níveis de elevados de extrativos são usados em tratamentos de fibras, cujo objetivo é remover substâncias químicas inibidoras. Alguns dos tratamentos mais comuns são: imersão das partículas ou fibras em água fria por 24 horas; imersão em água quente por 6 horas; imersão em solução de NaOH Moslemi et al., (1983).

1.8.3 Nanocompósitos

Biocompósitos são materiais formados por uma matriz com reforço utilizando fibras naturais, como juta, coco, sisal, abacaxi, rami, bambu, banana e do bagaço de cana-de-açúcar, cujas fibras são de baixos custos com altas propriedades específicas, baixa densidade e biodegradáveis Bergamo et al., (2022). A fabricação de biocompósitos está se tornando frequente, pois possibilita uniformizar as características dos materiais para formação de um novo material, com uso de tecnologias inovadoras, surge a possibilidade de alterações das fibras, além dos meios ligantes, sendo possível produzir compósitos com injeção de fibras naturais em diversas formas, promovendo soluções operacionais relacionadas com as propriedades físicas e mecânicas, tais como: dureza, densidade, e degradação, causada por raios ultravioleta, ácidos e bases.

O uso potencial da nano fibra como material de reforço representa um novo campo correlacionado às aplicações convencionais como microfibras, uma vez que se pode obter maior resistência em sua área de superfície que pode interagir com a matriz, sendo muito maior do que o valor encontrado nos micros reforços convencionais, menor densidade, matéria-prima abundante, renovável e alta transparência. Todos esses aspectos tornaram essas nanofibras, ou a nano celulose em geral, extremamente atraentes para o desenvolvimento de novos compósitos Seydibeyoglu; Oksman, (2008); Habibi et al., (2010). Os tratamentos finais nas nanofibras, como o processo de purificação ou algumas modificações químicas, são particularmente importantes, pois podem facilitar a interação com a matriz, dependendo dos tratamentos da cadeia de celulose, e a estrutura, a superfície e a composição também podem ser alteradas.

Corrêa (2010) utilizou o processo de extrusão para incorporar de 1 a 7% de nanomateriais de curauá e etileno acetato de vinila. A fraca dispersão do nano materiais foi facilmente observada durante a remoção da água em suspensão e a tendência das fibras de se aglomerarem, causando a criação de aglomerados no material. O módulo elástico nano compósito apresentou um pequeno aumento, com uma diminuição na deformação na ruptura. O curauá mercerizado

apresentou um aumento no módulo elástico melhor do que o nano materiais e, portanto, pode ser considerado como tendo as melhores propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras vegetais, utilizando a incorporação de monômeros nas matrizes, no preenchimento dos espaços vazios dos lignocelulósicos, melhorando dessa forma a resistência à compressão e a resistência à abrasão (dureza), podendo restringir à livre movimentação de água para o interior, limitando assim as condições para biodeterioração.

Souza et al. (2010) testaram o resíduo de fibras de curauá como componente de reforço para o álcool polivinílico, combinando propriedades importantes como resistência e transparência desse polímero, por exemplo, o compósito pode ser aplicado na confecção de materiais como lentes de contato. Loureiro, (2022).

Figura 06 – Esquema de processo para formação dos biocompósitos



Fonte: (BALAJI,2015) Adaptado pelo autor

Para a fabricação de biocompósitos a escolha da fibra é principalmente baseada nos requisitos de projeto do produto final, sendo que as propriedades mecânicas finais dos compósitos são influenciadas não só pelo tipo de fibra, mas também pela atividade química superficial, isto é, os grupos químicos superficiais presentes. Monteiro; Almeida, (2006). Será necessário, através de pesquisas futuras, realizar testes para determinar se existem variáveis entre o curauá branco e roxo.

1.8.4 Biopolímeros

O desenvolvimento de compósitos de fibras naturais e polímeros encontra duas restrições principais ligadas às propriedades intrínsecas das fibras naturais; sendo elas a baixa temperatura de processamento devido à estabilidade térmica limitada e alta absorção de umidade. Por isso os termoplásticos que amolecem em temperaturas abaixo de 200°C são adequados para esses compostos (por exemplo, poliolefinas ou PVC). O segundo problema pode ser resolvido com o uso de extrusoras de desgaseificação capazes de remover a umidade das fibras. Ambos os

problemas podem ser consideravelmente simplificados pela deposição de revestimentos protetores, por exemplo, pelos métodos Chemical Vapor Deposition (CVD), Atomic Layer Deposition (ALD) ou sol-gel métodos sol-gel.

Vários artigos foram dedicados à investigação estrutural das fibras de *Ananas erectifolius* por meio de MEV, mas, apesar da boa qualidade das micrografias, elas foram tiradas com uma ampliação bastante baixa. Até o momento, a fibra de curauá nunca foi usada como suporte para revestimentos funcionais obtidos por técnicas de deposição em fase de vapor.

1.8.5 Biodiesel

Uma das grandes tendências atuais é a utilização de biomassa integral ou residual como matéria-prima para desenvolvimento de diversos bioprodutos, com potencial de uso em diferentes setores da economia. A expectativa é reduzir a dependência do uso de fontes de energia fóssil, assim como mitigar o impacto sobre a biodiversidade e o meio ambiente. As soluções inovadoras da bioeconomia, em especial aquelas provenientes do uso da biotecnologia industrial, fornecem uma contribuição importante para a transição das atuais práticas econômicas não-sustentáveis, para sistemas industriais renováveis, economia circular e de base biológica, aliando inovação e sustentabilidade como solução dos principais desafios do mercado globalizado atual.

Diversas alternativas para geração de energia limpa, em substituição ao modelo atual, vêm sendo estudadas e aplicadas ao longo dos anos Farooq et al., (2018), com o principal objetivo de diminuir os impactos ambientais causados pelo uso dos combustíveis convencionais. Dentro as diversas matérias-primas que são desenvolvidas, uma das principais é o biodiesel, pois é um material renovável, biodegradável, pode ser usado como uma alternativa ao diesel e é considerado um combustível neutro de CO₂ Vakros; (2018).

No Brasil, o óleo diesel Gollakota et al., (2019); Tan et al., (2019) é a principal matriz de combustível utilizada, representando cerca de 16,4% da participação energética, ou cerca de 70,294 milhões de litros (EPE, 2020). Nesse cenário, o percentual de biodiesel correspondendo a 1,2% da matriz energética brasileira, cerca de 3,841 milhões litros, com perspectiva de incrementar a mistura de biodiesel em diesel em 15% (v/v) em 2023 (CNPE, 2018).

A reação transesterificação de triglicerídeos, de origem animal ou vegetal, com álcoois simples, como metanol ou etanol, é o caminho reacional mais comum para a obtenção de biodiesel, na presença de um catalisador, normalmente básico e por catálise homogênea REIS, C. M. et. al., (2015), como por exemplo, NaOH ou KOH. Entretanto o uso de catalisadores deste tipo possui algumas restrições, relacionadas a problemas de aplicação, como por exemplo, a difícil reutilização e separação da mistura reacional, assim como uma maior probabilidade de provocar uma reação de saponificação, e consequentemente gerar resíduos aquosos decorrentes da purificação do biodiesel El Barnossi et al., (2021); Elias et al., (2020) Fan et al.; (2012); EPE (2020).

Devido às dificuldades apresentadas para uma catálise homogênea, os catalisadores utilizados em processos heterogêneos vêm sendo pesquisados com vistas a promover etapas reacionais, através das quais seria possível separar e reutilizar o catalisador de forma mais simplificada, além de gerar menos resíduos aquosos, e diminuir o risco da reação de saponificação Soares dias et al., (2020).

Diversas biomassas podem ser utilizadas para a produção de catalisadores, dentre estas, o material residual da casca da banana, que é um produto notável, pois é uma fruta amplamente consumida, com produção nacional de 6.752.171 toneladas em 2018 no Brasil (PAM, 2018) e cerca de 115,74 milhões de toneladas em 2018 no mundo Barnossi et al., (2021), na qual aproximadamente de 30 a 40% da fruta corresponde a casca Albarelli et al., (2011). Além da busca por catalisadores de baixo custo e que gerem menor impacto ao meio ambiente, outra vertente no processo de produção do biodiesel é a pesquisa relacionada à matriz base do biodiesel, uma vez que, no início, este era sintetizado de oleaginosas (primeira geração), devido às discussões relacionadas à competição com fontes alimentares, foram iniciados estudos utilizando materiais residuais lignocelulósicos (segunda geração), porém, a produção a partir dessa matriz. Apesar da grande quantidade disponível de matéria prima, e do menor custo em relação às fontes alimentares, ainda é considerada como sendo de alto valor para a grande produção de biodiesel Elias et al., (2020).

Buscando minimizar os custos de produção, o uso dos resíduos de óleo de cozinha passou a tornar-se um atrativo para produção de biodiesel, devido ser um material de baixo custo e de grande disponibilidade, com cerca de 5 milhões de toneladas/ano. A produção de biodiesel diminui os impactos ambientais causados por sua destinação inadequada Gollakota et al., (2019); Tan et al.,

(2019). Quando reutilizado, o óleo sofre degradação, principalmente térmica, gerando alguns derivados que são prejudiciais à saúde humana e animal. Assim sendo, o óleo de cozinha usado representa um custo com cerca de duas a três vezes menor do que o óleo puro Vela et al., (2020). Em relação à composição média do óleo de soja, Oliveira e Vieira; (2008) destacam que essa matriz é composta, principalmente, por ácido linoleico (54,5%), oleico (22,3%) ácidos graxos insaturados com pontos de fusão em -5°C e 4°C, respectivamente, bem como ácido palmítico (12,7%), linolênico (4,5%) e esteárico (3,9%).

A presença desses ácidos graxos insaturados, especialmente o oleico, linoleico e o linolênico são os que se destacam da fração lipídica do óleo de soja, já que são facilmente oxidados e o número de insaturações nas moléculas torna um fator decisivo na velocidade da reação. Logo, tal característica é repassada aos correspondentes dos ésteres metílicos (biodiesel) obtidos a partir dessa oleaginosa Beltrão, (2008).

O óleo de soja é considerado uma fonte potencial para a produção do biodiesel, pela abundância de matéria prima e suas propriedades físico-químicas Oliveira; Vieira; (2008), sendo também aquele que é amplamente usado pela Petrobras. A produção de biodiesel a partir da soja compreende à produção de soja, transporte para a instalação de processamento, separação de óleo e farelo e conversão em biodiesel através do processo de transesterificação e, finalmente, a distribuição de biodiesel Sheehan et al., (1998). O óleo de soja apresenta propriedades físico-químicas descritas na Tabela 02, bem como uma composição variada de ácidos graxos saturados e insaturados.

Tabela 02: Propriedades físico-químicas do óleo de soja refinado

Propriedades	Valores de referência
Acidez (mg NaOH/g)	< 0,6
Índice de Peróxido (mEq/Kg)	< 10
Iodo (gI ₂ /100 g)	120 – 141
Saponificação (mg KOH/g)	180 – 200
Peso Específico (g/cm ³)	0,916 – 0,922
Material Insaponificável (%)	< 1,0%

Fonte: Valores de referência: RDC N° 482, de 23/09/1999, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

1.9 Problemática

Com base nas informações coletadas sobre potenciais aplicações para a fibra do curauá, a questão norteadora desse trabalho recai sobre o desenvolvimento de uma aplicação inovadora para as fibras, analisando a viabilidade do seu uso como catalizador no processo de conversão

de óleos vegetais e graxos para a produção de biodiesel, produtos esses caracterizados como resíduos que seriam descartados de outros processos industriais ou comerciais.

1.10 Hipóteses

1.10.1 H0: O uso das cinzas de curauá não apresenta diferenças significativas de taxa de conversão com outros tipos de catalisadores heterogêneos, atualmente em uso para produção de biodiesel.

1.10.2 H1: O uso das cinzas de curauá apresenta uma taxa de conversão significativamente maior do que todos os catalisadores heterogêneos atualmente em uso para a produção de biodiesel.

1.11 Objetivos

1.11.1 Objetivo Geral: O estudo visou a realização de ensaios para caracterização das fibras e cinzas de curauá com a finalidade de atuar como catalisador para a produção de biodiesel, sobre resíduos de óleos descartados de outros processos.

1.11.2 Objetivos Específicos:

- Propor o uso das folhas do curauá, assim como os subprodutos derivados do processamentos delas (bromelina e mucilagem), como insumos para agregação de valor a cadeias produtivas de forma sustentável, reduzindo assim o descarte inadequado de materiais advindos de processos industriais e/ou comerciais;
- Preparar amostras, na forma de fibras e cinzas das folhas do curauá (*Ananas erectifolius*) para desenvolvimento da pesquisa aplicada;
- Analisar as características físico-química das fibras e das cinzas em laboratório, com base em diversas técnicas reconhecidas;
- Diferenciar os resultados obtidos, com vistas a comprovação do ineditismo da pesquisa, comparando com outras publicações de relevância;
- Experimentar o uso dos insumos do curauá para produção de biodiesel; e
- Relatar em artigo científico os resultados obtidos através dos estudos.

2 REVISÃO DA LITERATURA - ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

2.1 Bioeconomia

A bioeconomia é um conceito para o qual não há um consenso, tanto no Brasil quanto no exterior, por exemplo:

- 2.1.1 De acordo com a visão do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o termo está ligado a soluções ao uso de recursos biológicos MCTIC; (2018); CGEE, (2021);
- 2.1.2 Para o Ministério das Relações Exteriores (MRE) a definição refere-se à geração de bioenergia Biofuture Platform, (2018);
- 2.1.3 Para o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) tem como foco os aspectos sociais, valorizando a agricultura familiar e o conhecimento tradicional MAPA; (2019);
- 2.1.4 Para o MMA: Conjunto de atividades econômicas que utilizam recursos biológicos renováveis (como biodiversidade, biomassa e biotecnologia) para gerar produtos, processos e serviços sustentáveis, além de promover o desenvolvimento sustentável, conciliando crescimento econômico com conservação ambiental. Com base legal instituída pelo Decreto nº 12.044, de 5 de junho de 2024, que criou a Estratégia Nacional de Bioeconomia.
- 2.1.5 No setor privado, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) apresenta um conceito de bioeconomia ligado à agricultura, incluindo biotecnologia médica Silva, Pereira e Martins; (2018).

Parte dessas abordagens relativas ao conceito de bioeconomia têm como foco a substituição de insumos fósseis por insumos biológicos, e não contabilizam a biodiversidade. Esses conceitos encorajam atividades econômicas de baixo carbono baseados em processos de homogeneização Costa et al.; (2022).

De acordo com Costa et al.; (2022), dentro da Amazônia Legal a bioeconomia precisa estabelecer um conceito próprio, que inclua a melhoria das ferramentas e técnicas relacionadas a exploração racional dos recursos da floresta, de forma que a população local possa desenvolver novos processos produtivos, com agregação de valor para as cadeias produtivas, de forma a promover negócios que impulsionem um modelo de economia circular.

A bioeconomia amazônica deve ser capaz de se ajustar à capacidade de produção de forma sustentável, desenvolvendo-se a partir de atividades econômicas, de forma a respeitar o complexo equilíbrio ecológico do ecossistema, garantindo a saúde da floresta e dos rios, além de promover os valores intangíveis associados ao conhecimento tradicional, mas com o viés da Pesquisa científica, Desenvolvimento e da inovação tecnológica.

O processo de transição de uma economia intensiva em carbono para uma economia que privilegie a floresta em pé compreende grandes mudanças sociais e tecnológicas, além de transformações científicas, em instituições e em comportamentos Bergamo et al.; (2022).

Nobre, C.A. et al.; (2023) citam a bioeconomia como sendo um indutor-chave para se alcançar crescimento econômico sem desmatamento na Amazônia. Estatísticas apresentadas no Relatório Nova Economia da Amazônia (RNEA) basearam-se em um total dos 67 setores que compõem a economia brasileira, com especial foco nas cadeias intensivas em desmatamento: pecuária e grãos-algodão.

Pesquisas de campo, bem como nas bases de dados estaduais e federais, complementam o banco de informações que permite elaborar os fluxos transacionados entre as regiões e ao longo das cadeias produtivas, do setor primário ao terciário. Por outro lado, a metodologia apresentada no RNEA demanda um grande esforço de obtenção de dados, o que limita tanto o número de produtos quanto a abrangência regional.

Essa metodologia foi desenvolvida considerando apenas 13 produtos nativos (açaí fruto e açaí palmito, cacau, castanha, babaçu coco e babaçu óleo, cupuaçu, mel, borracha, buriti, urucum, copaíba e andiroba). Detalhes metodológicos podem ser encontrados em Silva et al.; (2022).

Vale ressaltar que a abrangência da bioeconomia é muito maior do que aquela apresentada no RNEA. Pesquisas dão conta de que os povos da Amazônia possuem uma alimentação extremamente diversificada, composta por mais de 270 itens cotidianamente utilizados na culinária, contra menos de 30 entre não-indígenas da mesma região Mesquita e Barreto, (2015); Skeltis, (2019); Romeiro, (1998); Costa; Fernandes, (2016).

Atualmente há dois modelos econômicos que são regidos por diferentes paradigmas tecnológicos e coexistem de forma desigual na Amazônia. Em primeiro lugar citamos o modelo

conhecido como “mecânico-químico” que é o modelo atualmente dominante. Esse modelo é decorrente das políticas econômicas implantadas na região nos últimos 70 anos e caracteriza-se pelo uso de soluções que alteram os princípios naturais, com vistas a atender às necessidades da industrialização e urbanização crescentes Loureiro; (2022). No âmbito da agricultura esse modelo baseia-se na especialização dos sistemas produtivos homogêneos, buscando a maximização dos ganhos com base em dois fatores:

- 2.1.6 Uso extensivo da terra e dos recursos naturais, com soluções mecânicas, onde há abundância de terra (ou onde a regulação fundiária permite avançar sobre a floresta);
- 2.1.7 Uso intensivo da terra e dos recursos naturais, com soluções (bio)químicas, onde o acesso à terra é limitado. Por esse motivo, tal modelo denomina-se mecânico-químico. A mecanização aumenta a produtividade, mas depende da monocultura e da homogeneização para obter ganho de escala que, por sua vez, demanda insumos químicos a fim de garantir a capacidade de suporte, na forma de pesticidas e agrotóxicos. Esse paradigma tecnológico se consolidou com a Revolução Verde.

As tecnologias derivadas implicam na transformação profunda da natureza originária, além de alto impacto na biodiversidade e em outros recursos naturais. No meio rural, esse modelo vê a natureza como matéria-prima ou capital físico Silva H.; (2017).

Recentemente surgiu uma nova visão, denominada agricultura regenerativa¹, que é um modelo de produção agrícola que busca não apenas reduzir impactos ambientais, mas restaurar e melhorar os ecossistemas, especialmente o solo, a biodiversidade e os ciclos da água. Ela se diferencia da agricultura convencional e até da sustentável por ter como objetivo central a regeneração dos recursos naturais.

Outro paradigma econômico que passamos a explicitar refere-se ao modelo “agroextrativista” Costa,(2021); Costa, (2008; 2009; 2014). Segundo o qual as tecnologias foram desenvolvidas pelas sociedades originárias do complexo e diverso ecossistema amazônico, amadurecidas ao longo de séculos, e cujas soluções tecnológicas têm como objetivo fundamental o manejo sustentável da natureza, ao invés de transformá-la.

¹ Agricultura Regenerativa: Conjunto de práticas agrícolas que visam restaurar a saúde do solo, aumentar a biodiversidade, melhorar a resiliência das lavouras e fortalecer os ciclos naturais.

As técnicas utilizadas ampliam a produtividade e o retorno natural dos sistemas produtivos vivos. Trata-se de um paradigma que se ajusta às condições e ritmos de reprodução e permanência do bioma. Em alguns lugares da Amazônia legal, principalmente nas áreas de floresta, o modelo agroextrativista é uma alternativa ao padrão mecânico-químico de produção de riqueza Romeiro, (1998); Costa; Fernandes, (2016).

As tecnologias são representadas por um conjunto de soluções baseadas em princípios agroecológicos, agroextrativistas ou agroflorestais. As referências técnicas e tecnológicas do paradigma agroextrativista se aproximam do que Bugge, Hansen e Klitkou (2016) e Vivien (2019) identificam como bioeconomia bioecológica².

Na Amazônia, a sociobioeconomia é adequada à capacidade de suporte do bioma, e baseada no ritmo de exploração feito pelas comunidades locais de forma criativa e endógena. Por ter como característica a dependência da manutenção da própria floresta, e mais bem adaptada às mudanças climáticas e apresenta resultados no combate à fome e à desigualdade Costa et al., (2022).

Em um contexto mais amplo, a relação entre a conservação ambiental versus a subsistência dos povos originários e comunidades ribeirinhas dependem do acesso a recursos básicos, ou de forma mais ampla a cidadania. No Brasil, as políticas públicas de acesso à cidadania estão centradas na Constituição de 1988 e em programas sociais que buscam garantir direitos fundamentais como saúde, educação, moradia, segurança alimentar e inclusão social. Dessa forma, as mesmas políticas públicas que fomentam o desenvolvimento da bioeconomia não podem atingir seus objetivos de forma plena caso os indicadores estratégicos de governança não contemplem os aspectos supracitados, para foco na melhoria da qualidade de vida da população.

A implementação efetiva do conceito de economia circular ³começou em 1996 na Alemanha, acompanhado de uma lei: "Ciclo Fechado de Substâncias e Lei de Gerenciamento de Resíduos". Essa lei estabeleceu um modelo para o gerenciamento de resíduos em ciclo fechado, garantindo assim que o descarte de resíduos é compatível com o meio ambiente (SU et al., (2013).

² Bioeconomia Bioecológica: uso de recursos biológicos (biomassa, biodiversidade, biotecnologia) para gerar produtos e serviços sustentáveis.

³ Economia Circular: A economia circular é um modelo econômico que busca maximizar a utilização de recursos, reduzir resíduos e minimizar a extração de matérias-primas, promovendo a reutilização, a reciclagem e a regeneração dos recursos.

“ ... às novas sociedades de consumo e ao crescimento vertiginoso da atividade industrial, as emissões para o meio ambiente, a geração de resíduos e os aterros sanitários tornaram-se cada vez mais numerosos. Além disso, em razão da crescente população mundial e, especialmente, do forte crescimento da classe média, estima-se que a demanda por recursos aumente rapidamente, indicando um crescente consumo de recursos naturais” LIEDER; RASHID, (2016).”

A transição para uma economia circular, na qual o valor dos recursos é preservado, deve ser apoiada por políticas e decisões operacionais baseadas em evidências. Existem diversos métodos usados para fornecer essas evidências, tais como o Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), Cost-Benefit Analysis (CBA), entretanto esses métodos não são consistentes de forma suficiente para abranger adequadamente a criação e a distribuição do valor sistêmico e multidimensional, que abrange os domínios social, ambiental, econômico e técnico Iacovidou, Millward-Hopkins et al., (2017).

A adoção de padrões de produção em ciclo fechado, no contexto de um modelo econômico sustentável, visa aumentar a eficiência do uso de recursos, com foco na redução da geração dos resíduos urbanos e industriais, com vistas a alcançar um melhor equilíbrio entre economia, meio ambiente e sociedade Ghisellini; Cialani; Ulgiati, (2016).

Dentro de nosso estudo as fibras vegetais possuem enorme potencial para substituir os insumos atualmente em uso, e que tem grande impacto no meio ambiente, além do que possuir um tempo para degradação pós-uso estimado em décadas ou até centenas de anos, dependendo do tipo da matéria prima utilizada na produção, isso agravado a de emissão de gases de efeito estufa (GEE), que são gerados dentro nas plantas industriais, resultando assim no acúmulo de fatores sociais, econômicos, ambientais e tecnológicos que são necessários para a tratamento dos efeitos desse modelo insustentável para a população.

Nesse contexto a bioeconomia surge como uma forma de promover um modelo baseado em práticas que oferecem soluções sustentáveis para estabelecer uma relação mais harmônica entre o crescimento econômico e uso dos recursos naturais. Dentro dessa proposta, o campo de atuação da bioeconomia reúne conhecimentos inovadores que englobam, mas não se restringem a biotecnologia, biologia sintética, física de materiais, química de renováveis e outras áreas para criar produtos e serviços de menor impacto para a natureza. Produção de energia limpa, plásticos biodegradáveis e alimentos funcionais são exemplos de produtos que seguem essa linha de pensamento.

De acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), a bioeconomia movimentará no mercado mundial um montante estimado em 2 trilhões de euros, gerando cerca de 22 milhões de empregos. Estudos apontam que a bioeconomia responderá, até 2030, por 2,7% do Produto Interno Bruto (PIB) dos seus países membros, percentual que poderá ser ainda maior em países como o Brasil, que dispõe de uma grande biodiversidade e políticas públicas com vistas a fortalecer as cadeias produtivas que utilizam os recursos naturais de forma sustentável e consciente (*The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda. OCDE, 2009*). Além disso, questões que envolvem o desenvolvimento de um programa de desenvolvimento da bioeconomia são citadas em menos metade dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, e envolvem aspectos que tratam, desde a segurança alimentar até a garantia de acesso à energia e saúde. Outro aspecto que deve ser destacado é a capacidade de integrar agricultura e indústria, ambas sendo parte importante de um mesmo processo no desenvolvimento econômico.

No Brasil e principalmente na região amazônica, a bioeconomia tem o potencial para desenvolver toda uma variedade de cadeias produtivas, que vão desde a agricultura, em prol de um aumento da produtividade na produção de alimentos, e no desenvolvimento de defensivos agrícolas naturais; assim como o uso de fibras; geração de energia; prestação de serviços ambientais e ecossistêmicos; química verde etc.

A tendência mundial é buscar soluções inovadoras e sustentáveis, que assegurem ao mesmo tempo a conservação da biodiversidade e a proteção dos ecossistemas naturais. Adicionalmente, a formação de competência nas áreas de bioenergia (nitrogênio verde), agricultura (defensivos agrícolas ecológicos) e biotecnologia faz do Brasil um dos protagonistas no cenário da bioeconomia em nível mundial.

2.2 Análise bibliométrica para determinação do estado da arte de pesquisas sobre o curauá (*Ananas comosus* var. *erectifolius*): características, aplicações e tendências.

A recorrente necessidade em substituição parcial ou total dos insumos derivados de fontes não renováveis tem reforçado a busca pela valorização da bioeconomia e fortalecimento de tecnologias sustentáveis. Este estudo buscou investigar por meio de documentos científicos publicados na base de dados Scopus, o número de publicações científicas e citações

relacionadas a fatores como países, autores, principais financiadores, palavras-chave, periódicos e evolução temporal do número de publicações na qual constavam a palavra *curauá*.

Com base nos resultados obtidos, foi possível confirmar que a palavra *curauá* esteve presente em 368 documentos científicos disponíveis na base de dados, sendo 221 publicadas entre 2015 e 2025, o que representa aproximadamente 60% das publicações. O protagonismo brasileiro no desenvolvimento de tecnológicas com diversas aplicações a partir das fibras ou bioativos do curauá ficou evidente, onde as principais financiadoras deste tipo de pesquisa são brasileiras, dentre as quais, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação Carlos Chagas (FCC).

Dentre os países que mais publicaram destaca-se o Brasil com 86% do total das publicações, seguido da Índia (8%), Portugal (5%), França (3%), Estados Unidos (2%), Japão (2%), Holanda (2%), Itália (2%) e Reino Unido (2%). Por fim, o presente estudo revelou informações que apontam para avanços significativos, em caso de acesso a investimentos, sobretudo na região Norte do Brasil, com potencial na liderança de produção de biofibras com aplicações diversas, a partir do curauá amazônico.

Atualmente existe apenas uma área de plantio, estruturada na comunidade de Novo Remanso, próxima da cidade de Itacoatiara, com meio hectare de curauá, mas existem inúmeros projetos que demandam uma área de plantio significativamente maior, o que, caso não seja desenvolvido em curto prazo, pode inviabilizar as cadeias produtivas, ou ainda, em médio prazo, levar essa oportunidade potencial para outras regiões.

O curauá (*Ananas erectifolius* ou *Ananas comosus* var. *erectifolius*) é uma bromélia nativa da Amazônia, popularmente conhecida por curauá, curauá-da-Amazônia, abacaxi ornamental e abacaxi selvagem Campelo et al., (2021b). É amplamente utilizado pelos povos da Amazônia brasileira e de outros países fronteiriços (Guiana Inglesa, Venezuela, Suriname e Colômbia) para diferentes aplicações, em virtude das propriedades físicas e químicas exibidas, as quais garantem uma notável versatilidade de suas fibras Krishnasamy et al., (2025). Trata-se de uma planta monoica, herbácea e rústica, cujas folhas eretas, coriáceas em formato de espada, podem

apresentar coloração verde (curauá branco) ou arroxeada (curauá roxo), que podem chegar a 2 m de comprimento Neves et al., (2023).

Adaptada a diferentes solos e climas tropicais, o curauá é cultivado principalmente nos estados do Pará e do Amazonas De Castro et al., (2025). Segundo DUVAL et al., (2003), o curauá evoluiu do *Ananas comosus* var. *microstachys* por meio de múltiplos processos de adaptação de domesticação. Suas fibras destacam-se por serem extremamente leves e macias, sendo consideradas uma das mais resistentes entre as fibras vegetais conhecidas, alcançando resistência a tração de aproximadamente 630 MPa e densidade de 1.12 gcm^{-3} a depender do processamento e combinações com outros materiais Salim et al., (2025). Contudo, OLIVEIRA, E. C. P. DE et al., (2008) descrevem em seu estudo, que fatores de produção, como temperatura, umidade, disponibilidade de água e radiação solar, como também, características do solo (drenagem, pH, concentração única e concentração de macro e micronutrientes), podem interferir drasticamente no rendimento da fibra por hectare.

O gênero *Ananas* apresenta composição química rica em cadeias carbônicas tridimensionais de celulose (~73.6%) e menor composição de hemicelulose (~9.9%) e lignina (~7.5%), sendo os teores de umidade e cinzas, respectivamente, cerca de 0,9 % e 7,9 % Azevedo; Giacon; Bortoleto, (2025). As fibras oriundas de matrizes vegetais, como é o caso do curauá, representam o mais abundante grupo de fibras naturais com potencial de escalonamento e recuperação de áreas degradadas. Segundo o estudo apresentado por Eleutério et al., (2025), o conteúdo de celulose na fibra do curauá contribui com melhorias de interação desta com outras matrizes orgânicas ou inorgânicas na confecção de compósitos poliméricos, enquanto a hemicelulose e lignina favorecem às características hidrofóbicas e termo estabilidade do produto desejado.

Do ponto de vista ambiental, o curauá constitui uma alternativa ecologicamente e economicamente viável para substituir materiais sintéticos de origem não renovável, contribuindo para a redução de impactos causados pelos derivados de microplásticos ou reforço em estruturas ou processos que emitem elevadas taxas de gases de efeito estufa Portela et al., (2025). Neste contexto, Barbosa et al., (2025) relatam melhorias das propriedades mecânicas de argamassa cimentícia com a adição das fibras do curauá ao comparado com o padrão de argamassa contendo fibras de propileno como reforço após 365 dias, confirmando

características promissoras para o campo da construção civil. Por outro lado, Neto et al., (2023) realizaram o estudo das propriedades térmicas e mecânicas de fibras de curauá combinados com nanotubos de carbono e resina epóxi onde constatou-se que a combinação destes materiais resultou em um compósito com melhorias na estabilidade térmica, reduzindo o percentual de perda entre 25 e 300 °C, como também, confirmou-se o aumento da resistência a tração em aproximadamente 82%.

As propriedades mecânicas de compósitos de curauá também foram estudados por Delgado-Aguilar et al., (2019) com fins ao desenvolvimento de peças automotivas, onde confirmou-se o atendimento aos padrões mínimos exigidos para a aplicação desejada, tornando-se um candidato promissor na fabricação de peças automotivas baseadas em compósitos com fibras naturais.

Este trabalho buscou apresentar o cenário de publicações científicas relacionadas ao curauá na base de dados Scopus, usando a análise bibliométrica, o qual consiste num método quantitativo utilizado para avaliar a produção científica por meio do tratamento estatístico de publicações, citações, autores, periódicos, palavras-chave e redes de colaboração Ding et al., (2023); Zheng et al., (2022). Portanto, o objetivo central deste tipo de análise é identificar padrões, tendências, impactos e relações no desenvolvimento de uma área do conhecimento, permitindo mapear o estado da arte, os temas mais recorrentes, os pesquisadores mais influentes e a evolução temporal das pesquisas. Essa abordagem auxilia na tomada de decisão científica, na definição de estratégias de pesquisa e na compreensão da dinâmica do conhecimento em determinado campo Ankrah; Monteiro; Madureira, (2022); Saavedra-Cordova et al., (2025), bem como na análise de possíveis tendências tecnológicas.

2.2.1 Pesquisa e exportação no banco de dados SCOPUS

O levantamento bibliográfico e estado da arte foi realizado na base de dados Scopus (Elsevier) no intervalo de 10 a 12 de janeiro de 2026, tomando como base o estudo realizado por Oliveira, J. P. et al., (2024). Portanto, foram inseridos os termos de busca, ou seja, palavras-chave, “curauá” e “*Ananas erectifolius*”, como também, as combinações destas duas palavras por meio dos operadores booleanos “AND” e “OR”.

2.2.2 Resultados e discussão

Os resultados obtidos para o número de publicações científicas relacionadas às buscas realizadas estão disponíveis na Tabela 1. Nesta referida, constam o número total de documentos publicados para cada termo de busca, como também, os manuscritos publicados nos últimos 10 anos e o percentual dos artigos publicados nos últimos 10 anos, em relação ao total, o que indica o estado da arte da pesquisa desenvolvida (SA ratio).

Conforme apresentado, ao ser adotado o termo de busca “curauá”, nota-se claramente que o retorno do número de publicações científicas é expressivamente superior ao comparado com a palavra-chave “*Ananas erectifolius*”, como também, a combinação entre as duas palavras, realizado por meio dos operadores booleanos AND e OR. Neste caso, o número total de publicações foi de 368 documentos científicos, sendo o primeiro estudo, reportado na forma de artigo de conferência por Muenker; Holtmann; Michaeli, (1998), no evento International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings) com o título “Improvement of the fiber/matrix-adhesion of natural fiber reinforced polymers” no ano de 1998. Por outro lado, o último manuscrito publicado, ou seja, o manuscrito mais recente envolvendo o termo de busca curauá, possui o título “Evaluation of the weathering processes after natural exposure of polypropylene/curauá fiber composites” de autoria de DOS SANTOS et al., (2026), e que publicado na revista Polymer com fator de impacto 4.4, no ano de 2026.

Para todos os casos, o percentual de manuscritos publicados nos últimos 10 anos esteve superior a 50%, o que indica uma predominância das publicações nos últimos anos, como resultado da tendência por estudos que viabilizem tecnologias relacionadas a fontes naturais e renováveis de fibras para a fabricação de compósitos Kumar et al., (2025), biomateriais De Oliveira et al., (2024), reforço argamassa na construção civil Barbosa et al., (2025), desenvolvimento de arquiteturas em 3D, fabricação de revestimentos De Queiroz; Ciardiello; Banea, (2025), emborrachados Azevedo; Giacon; Bortoleto, (2025), fins balísticos Meliande et al., (2023) e redução da dependência de polímeros sintéticos, sobretudo os derivados fósseis Ganesan et al., (2025).

A redução observada para o número de publicações científicas relacionadas às demais palavras-chave utilizadas como termos de busca se deve a especificidades da busca adotada, principalmente com a adição dos operadores booleanos, que limitam por meio de combinação

ou exclusão de termos de busca. Ou seja, mais publicações de cunho aplicado. Comportamento semelhante foi observado no estudo realizado por Ankrah; Monteiro; Madureira; (2022), o qual relata a redução de 2516 documentos científicos para 1453 documentos, ou seja, redução de aproximadamente 42.3% após o uso dos operadores booleanos, resultado da combinação ou exclusão dos termos de busca na pesquisa realizada.

Tabela 03: Total de documentos, documentos publicados nos últimos 10 anos e proporção de estado da arte (SA) da base de dados Scopus correspondentes às palavras-chave: curauá, *Ananas erectifolius*, curauá e *Ananas erectifolius* e curauá ou *Ananas erectifolius*.

Palavra-Chave	Total de Documentos	Últimos 10 anos	Taxa SA (%)
Curauá	368	221	60.0
<i>Ananas erectifolius</i>	80	45	56.3
Curauá and <i>Ananas erectifolius</i>	55	33	60.0
Curauá or <i>Ananas erectifolius</i>	81	49	60.5

Legenda: SA = Estado da arte.

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos dados obtidos dos 368 documentos relacionadas a palavra-chave curauá, realizou-se a análise da ocorrência das palavras-chave, o qual resultou no total de 144 documentos contendo a palavra-chave “fibers”, enquanto as palavras chave “natural fiber”, “curauá fibers”, “reinforcement”, “reinforced plastic”, “tensile stretching” “mechanical Properties”, “composites”, “curauá fiber” e “composite materials”, resultaram no total de 135, 116, 98, 82, 81, 81, 76, 51 e 51, documentos, respectivamente. Esses resultados confirmam o interesse nas pesquisas relacionadas as fibras do curauá, principalmente como reforço estrutural de compósitos, com o interesse em melhorias das propriedades mecânicas, térmicas e aumento do caráter biodegradável. Na Figura 07 a seguir está apresentada uma nuvem de palavras, criada a partir do número de palavras-chave relacionadas, onde as palavras com maior destaque indicam as que tiveram maior recorrência, ou seja, “natural fibers” “fibers”, “curauá fibers” e “reinforcement”.

Figura 07. Principais palavras-chave relacionadas aos termos de pesquisa usados na busca na base de dados Scopus.

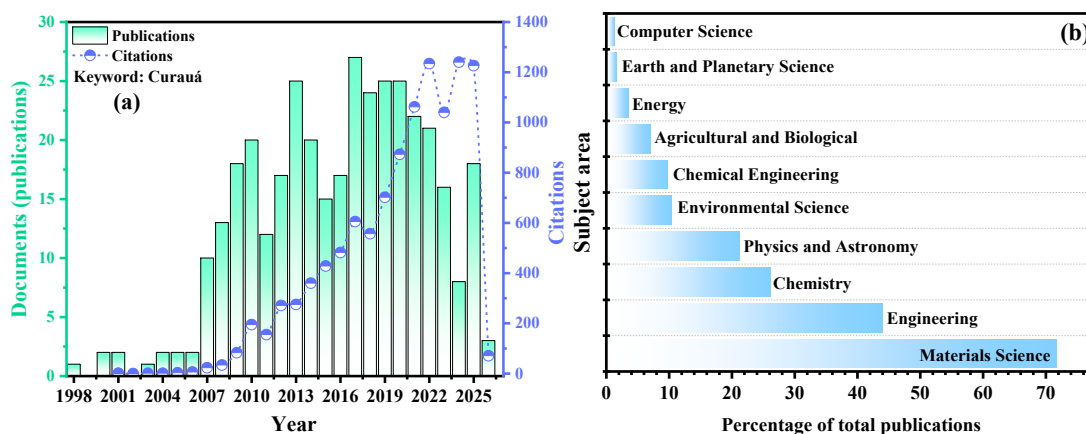


Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 08 estão apresentadas em partes, a evolução do número de publicações científicas e citações em função do ano de publicação, como também, o percentual de publicações em função da área de conhecimento. Partindo dos dados graficamente dispostos (Fig. 08a), é possível notar que no intervalo entre 1998 e 2006 não resultou em uma evolução significativa do número de publicações científicas, tendo somente dois manuscritos científicos por ano, seguindo um perfil quase constante para o número de publicações e citações. Por outro lado, tanto o número de publicações quanto as citações exibem um perfil crescente; contudo, não linearmente dependente, para o intervalo entre os anos de 2007 e 2026, alcançando o ápice de publicações no ano de 2016, totalizando 27 publicações científicas. Por outro lado, o número de citações para o mesmo intervalo mostrou-se expressivamente crescente, exibindo um perfil quase exponencial, sendo nos anos de 2021, 2023 e 2025, o número de citações de 1,235, 1,243 e 1,225, respectivamente.

No estudo realizado por ROJAS-FLORES et al., (2025) os autores apresentam o estado da arte e levantamento bibliométrico sobre os tópicos relacionados a biopolímeros associados com células combustíveis e membranas, no intervalo entre 2012 e 2025. Dentre as informações contidas no estudo realizado, observa uma tendência crescente do número de publicações científicas e citações, principalmente após o ano de 2016, o qual se deve, segundo os autores, ao interesse no desenvolvimento de rotas ecologicamente e economicamente viáveis de novos materiais. Além disso, é possível destacar a evolução do campo dos materiais biobaseados, que apresentam como vantagens o fortalecimento da bioeconomia local e regional, a manutenção de áreas preservadas, a redução de desigualdades regionais e a redução de insumos de origem fóssil Favarini; Maranduba, (2025).

Figura 08. (a) Evolução das publicações e citações ao longo do tempo (ano) e (b) percentual de publicações por área temática.



Fonte: Elaborado pelo autor

O percentual de publicações por área de conhecimento está apresentado na Figura 6(b), onde é possível destacar o top10 das áreas da ciência em que se concentram as publicações contendo a palavra-chave “curauá”. Neste caso: computer Science, Earth and Planetary Science, Energy, Agricultural and Biological, Chemical engineering, Environmental Science, Physics and Astronomy, Chemistry, Engineering e Materials Science. Portanto, com base na análise gráfica, a principal área de pesquisa é a Materials Science, concentrando aproximadamente 72% das publicações. Em segundo e terceiro lugar, estão a Engenharia e Química, com 44% e 26%, respectivamente. Como esperado, a indústria de plásticos, revestimentos e fibras, encontra-se diretamente relacionadas às áreas descritas, o que reforça a importância das biofibras para o desenvolvimento de tecnologias sob menor dependência de insumos derivados de fontes não renováveis Ganesan et al., (2025).

No Estado do Amazonas, projetos relacionados à valorização do curauá tem sido foco de investimentos no setor primário, e que tem se mostrado promissor para diversas finalidades. No ano de 2010, a Agência de Fomento do Estado do Amazonas S.A (AFEAM) ressaltou o protagonismo da região na produção de curauá, o qual possui características químicas, biológicas e fisiológicas que são consideradas de grande importância para a econômica regional, tornando-se uma oportunidade para atender os interesses industriais locais relacionadas à biofibras (<https://www.afeam.am.gov.br/material-extraído-de-planta-amazonica-substitui-a-fibra-de-vidro-com-vantagens/>). Por outro lado, em 2017, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), tornou público os investimentos em projetos relacionadas a potencialização do uso da fibra do curauá, sobretudo para fins de substituir a fibra de vidro, material amplamente utilizado em diferentes fins industriais no Polo Industrial de Manaus (<https://www.fapeam.am.gov.br/pesquisas-pretendem-potencializar-uso-da-fibra-de-curauá-no-amazonas/>).

Em janeiro de 2024, a Secretaria de Estado de Produção Rural (SEPROR), em conjunto com a Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação (Sedecti), Instituto de Desenvolvimento Agropecuário e Florestal Sustentável (Idam), Centro de Bionegócios da Amazônia (CBA) e a Superintendência da Zona Franca de Manaus (Suframa) em parceria com as empresas Unifruti, Compol e Tutiplast, realizaram a implantação do projeto piloto de produção de fibras de curauá na comunidade de Novo Remanso, no município de Itacoatiara no Amazonas.

O projeto se voltou a produção de fibras naturais, para o uso como reforço de materiais plásticos, reduzindo a carga de derivados fósseis, acrescentando melhorias nas propriedades mecânicas e biodegradáveis de materiais híbridos (<https://www.sepror.am.gov.br/governo-do-amazonas-lanca-projeto-piloto-da-producao-de-fibra-do-curaua-em-itacoatiara/>). Até o momento o volume atual de produção de fibras inviabiliza a implementação em escala industrial, entretanto a TUTIPLAST captou recursos através de editais da FINEP com foco no desenvolvimento da bioeconomia, para ampliar os estudos com foco no uso do curauá como carga, misturada com os polímeros, para desenvolvimento de produtos do segmento de termoplásticos.

Com o intuito em destacar o top10 artigos com maior número de citações relacionados ao termo de busca curauá na base de dados Scopus, optou-se por apresentar os dados disponíveis na Tabela 3, onde encontram-se sumarizados o título dos manuscritos, o ano de publicação, o jornal, fator de impacto e número total de citações. Suportado nos resultados apresentados, o manuscrito com maior número de citações foi publicado por Alves Fidelis et al., (2013) com o título “The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers” no Journal of Materials Research and Technology (IF. 6.6), totalizando até o presente, 398 citações. O manuscrito relata as propriedades mecânicas de fibras naturais, dando ênfase as espécies jute (*Corchorus capsularis*), sisal (*Agave sisalana*), curauá (*Ananas erectifolius*) coir (*Pithecellobium dulce*) e piassava (*Attalea funifera Martius*), onde a fibra de curauá resultou nas melhores propriedades mecânicas, com tensão de tração e módulo de Young de 543 MPa e 63.7 GPa, respectivamente. Os demais manuscritos ocupando o top10 de citações incluem aplicações envolvendo a indústria automobilística, desenvolvimento de compósitos ecológicos, extração de celulose e diferentes processos de tratamento das fibras e técnicas caracterização. Entre os periódicos relatados destaca-se o Journal of Cleaner Production (IF. 10), Polymer Degradation and Stability (IF. 7.4), Metallurgical and Materials Transactions A: Physical metallurgy and materials science (2.5), Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (IF. 8.9), Carbohydrate Polymers (IF. 12.5), Cellulose (IF. 4.8), Polymer Degradation and Stability (IF. 7.4) e Composites Part B: Engineering (IF. 14.2).

O resumo gráfico dos tipos de documentos e os principais países (Top10), isto é, os países que mais publicaram documentos científicos relacionadas à palavra-chave curauá, encontram-se apresentado em partes da Figura 7(a-b). Portanto, concentrando cerca de 86% das publicações

científicas, o Brasil possui destaque entre os países do continente americano, seguido da Índia com 8% das publicações e Portugal com aproximadamente 5%. Por outro lado, o Japão, Canadá, Estados Unidos (US), Holanda, Itália, Reino Unido (UK) e França, tiveram percentuais próximos de 2%, com exceção da França que exibiu cerca de 3% do total de publicações.

Embora a predominância do curauá seja em território da Amazônia brasileira, a ocorrência desta bromeliácea na Venezuela e Guiana Francesa, amplia as possibilidades de estudos relativos a métodos de cultivo, melhoramentos genéticos e inovações tecnológicas relacionadas ao vegetal (Marques; Gutiérrez; Del Río, (2007).

Tentativas frustradas de cultivo no Japão, África do Sul e Malásia foram confirmadas, o que indica o interesse em investimentos e estudos por parte de outros países, entretanto, no estudo realizado por OLIVEIRA, E. C. P. et al., (2008) os aspectos morfológicos de mudas de curauá implantadas e cultivadas em diferentes condições, dentro do clima tropical amazônico, foram detalhadamente descritos. Os autores descrevem a dependência das características físico-químicas do solo e fatores como exposição a luz, temperatura, umidade e índices pluviométricos como sendo fundamentais para o desenvolvimento da planta.

Tabela 4. Título dos manuscritos, ano de publicação, título dos periódicos, fator de impacto (FI) e citações.

Título do Manuscrito	Ano	Título do Periódico	FI	Citações
O efeito da morfologia da fibra na resistência à tração de fibras naturais	2013	Journal of Materials Research and Technology	6,6	398
Fibras de curauá na indústria automobilística – uma avaliação de sustentabilidade	2007	Journal of Cleaner Production	10	356
Propriedades térmicas de compósitos de polietileno de alta densidade com fibras naturais: efeito do agente de acoplamento	2008	Polymer Degradation and Stability	7,4	329
Fibras lignocelulósicas naturais como materiais de engenharia – Uma visão geral	2011	Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science	2,5	299
Desenvolvimento e efeito do tratamento alcalino nas propriedades de tração de compósitos verdes de fibra de curauá	2007	Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	8,9	297
Caracterização de fibras lignocelulósicas de curauá	2009	Carbohydrate Polymers	12,5	281
Nanofibras de celulose a partir de fibras de curauá	2010	Cellulose	4,8	253
Bagaço de cana-de-açúcar e ligninas de curauá oxidadas por dióxido de cloro e reagidas com álcool furfurílico: caracterização e estabilidade	2004	Polymer Degradation and Stability	7,4	223
Preparação, morfologia e estrutura de nanocristais de celulose a partir de fibras de bambu	2012	Cellulose	4,8	217
Caracterização mecânica de compósitos híbridos reforçados com fibras naturais intralaminares	2019	Composites Part B: Engineering	14,2	207

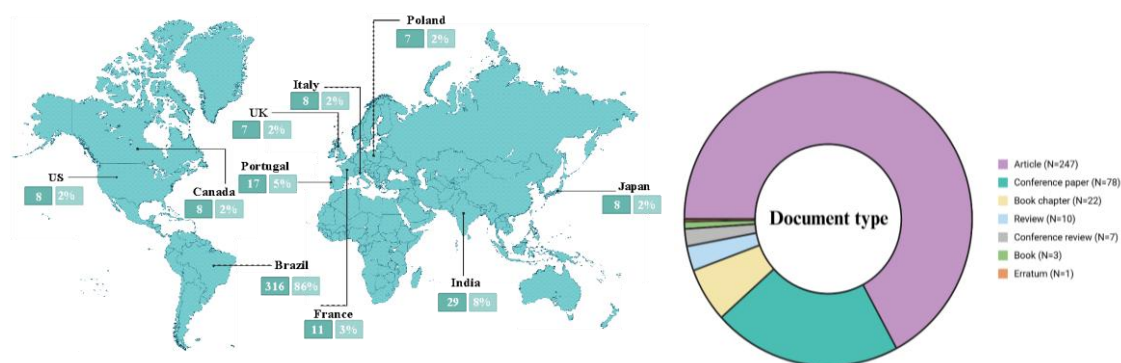
Legenda: FI = Fator de Impacto.

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a composição das publicações por tipo de documento fica claro a predominância de manuscritos científicos, resultando em 247 documentos, seguido por artigos de conferência com 78 manuscritos, em seguida 22 capítulos de livros, artigos de revisão com 10 unidades. Por fim, a composição minoritária do qual inclui livros, erratas e revisões de conferências totalizaram 11 documentos. Esse comportamento é comumente reportado em publicações que utilizam de análise bibliométrica ou revisão da literatura, pois os manuscritos científicos na estrutura de artigo original é o formato comumente adotado pelos periódicos científicos por área do conhecimento, como também, o formato mais tradicional de avaliação por pares e rapidez na comunicação científica.

Rosa Latapie; Abou-Chakra; Sabathier, (2023) relatam em seu estudo bibliométrico as tendências no desenvolvimento de materiais biobaseados e derivados de minerais, e observam que ao ser utilizado como critério o tipo de documento científico para o intervalo da pesquisa entre os anos de 1990 e 2022 utilizando a base de dados Web of Science, 68% dos documentos científicos foram do tipo “artigo original”, enquanto os artigos de revisão compuseram 15% do total, seguido de proceeding materials e capítulos de livros com 13% e 2%, respectivamente.

Figura 08. (a) número e porcentagem de documentos por país (à esquerda) e (b) tipo de documento (à direita) para curauá.



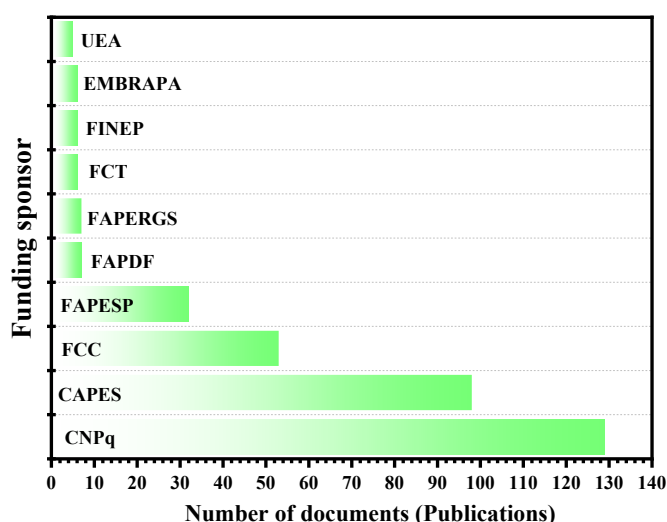
Fonte: Elaborado pelo autor

Corroborando as informações até aqui apresentadas, o Top10 das principais financiadoras de projetos envolvendo o curauá de acordo com a busca de manuscritos científicos na plataforma Scopus, está apresentado na Figura 5. Como pode ser visualizado, o principal financiador de projetos foi Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) com 128 manuscritos científicos, em segundo, está a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) com 98 publicações, Fundação Carlos Chagas (FCC) com 53 publicações, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) com 32

publicações, enquanto a Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) possuem até o momento 7 publicações relacionadas. Por fim, a Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária possuem 6 manuscritos científicos relacionados, enquanto a Universidade do Estado do Amazonas (UEA), está presente em 5 documentos científicos.

Os dados apresentados confirmam o envolvimento das fundações de pesquisa do governo brasileiro no desenvolvimento de pesquisas relacionadas as matrizes biológicas e recursos naturais, mostrando-se atuante no financiamento e acompanhamento de projetos com dispersão em diferentes regiões do Brasil. Tornando-se atrativas às conexões com diferentes grupos de pesquisas e tentativa de maturação de protótipos, viabilidade econômica, desenvolvimento de tecnologias e processo e estruturação regional para redução de assimetrias nas diferentes regiões do país. Dentre os estudos, destaca-se ainda a Universidade do Estado do Amazonas, o que reflete o protagonismo regional na valorização da pesquisa local e incentivo ao desenvolvimento tecnológico e científico, papel fundamental para o fortalecimento da bioeconomia na região Norte.

Figura 09. Principais financiadores de recursos para o desenvolvimento de projetos e pesquisas relacionadas às buscas realizadas.



Legenda: CNPq = Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; CAPES = Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior; FCC = Fundação Carlos Chagas; FAPESP = Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo; FAPDF = Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal; FAPERGS = Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS); FCT = Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT); FINEP = Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP); EMBRAPA = Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; and UEA = Universidade do Estado do Amazonas.

A relação dos primeiros autores, número de publicações, fator H, número de citações total na base de dados Scopus e filiação estão sumariamente apresentados na Tabela 05. Com base nesses dados, o Prof. Dr. Sérgio Monteiro, graduado em engenharia metalúrgica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro com mestrado e doutorado em Materials Science pela Universidade da Flórida (EUA) é o principal autor relacionado às publicações envolvendo a palavra-chave curauá.

O Prof. Dr. Sérgio Monteiro é bolsista produtividade CNPq 1A e professor Titular do Instituto Militar de Engenharia (IME), onde concentra 60 publicações envolvendo o termo de busca de estudo deste trabalho, fator H = 64 e 16,485 citações na base de dados Scopus. A predominância de pesquisadores brasileiros, ou afiliados as instituições brasileiras, revela o protagonismo dos pesquisadores em um tema com fundamental para o desenvolvimento tecnológico nacional, revelando sobretudo, a qualidade dos trabalhos desenvolvidos, os quais são acompanhados de um volume expressivo de citações, e que põem o Brasil entre os principais países relacionados ao desenvolvimento de compósitos baseados em fibras naturais.

Como pode ser conferido, dentre as instituições relacionadas ao Top10 de pesquisadores está o Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Instituto de Materiais de Aveiro, Portugal, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes, [Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro](#), Rio de Janeiro, [Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow Da Fonseca](#), Rio de Janeiro e [Universidade de Caxias do Sul](#), Caxias do Sul, Brazil.

Tabela 05. Autor, publicações, índice H, citações e filiação.

Autor	Publicações	Índice – H	Citação*	Filiação
Monteiro, S.N.	60	64	16,485	Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brazil.
De Paoli, M.A.	22	58	11,122	Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil.
Amico, S.C.	19	49	9,556	Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.
Banea, M.D.	17	48	8,708	CICECO – Instituto de Materiais de Aveiro, Aveiro, Portugal.
Zattera, A.J.	16	42	8,141	Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, Brazil.
Lopes, F.P.D.	15	17	1,596	Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes, Brazil.
Frollini, E.	15	45	6,119	Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.
Margem, F.M.	13	20	1,417	Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes, Brazil.
de Andrade Silva, F.	12	46	7,723	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.
Neto, J.S.S.	11	21	1,779	Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow Da Fonseca, Rio de Janeiro, Brazil.

Legenda: * = Base de Dados Scopus; IF = Fator de Impacto.

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.3 Conclusões

A análise bibliométrica realizada na base de dados Scopus utilizando a palavra-chave curauá, possibilitou uma visão ampla das possibilidades de aplicação e tendências que poderão ser úteis na prospecção de novas tecnologias, financiamentos e parcerias interinstitucionais, sobretudo no que tange os fins econômicos e tecnológicos.

A análise dos manuscritos identificados nas buscas adotadas revelou um total de 368 artigos científicos, sendo o Brasil, Índia e Portugal o Top3 de países que mais publicaram sobre o tema principal. Além disso, o formato de artigo original lidera entre os formatos de publicações, seguido de artigos de conferências e capítulos de livros.

No contexto de instituições filiadas com maior recorrência entre os manuscritos publicados, destacam-se as instituições públicas brasileiras, principalmente o Instituto Militar de Engenharia (IME - Rio de Janeiro), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP, São Paulo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow Da Fonseca (CFETCSF).

Portanto, o estudo revelou detalhes da riqueza oriunda da biodiversidade amazônica e o potencial do curauá no desenvolvimento de tecnologias de base renovável, para atender as demandas do mercado global com ênfase na redução de insumos de base petrolífera. Os resultados também demonstraram a ausência de estudos liderados/conduzidos na região Norte, área de origem do Curaua, o que demonstra a importância deste trabalho, relativo à originalidade e relevância para a sociobioeconomia, assim como a estruturação de cadeias produtivas para produção de matéria prima para comunidades isoladas e para os povos originários.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Etapas detalhadas do processo

- I. Coleta de óleo residual:
 - Descrição: recolher óleo usado de restaurantes e cozinhas industriais; armazenar em tambores rotulados.
 - Ações: registrar origem e data; verificar presença de sólidos e contaminação; amostrar para análise de AGL e água.
- II. Pré-tratamento do óleo
 - Filtração: remover partículas por peneiras e filtros (100–200 μm). Secagem: aquecer a 100–120 °C até teor de água < 0,05% (Karl Fischer ou titulação).
 - Esterificação (se necessário): para AGL > 2–3% realizar esterificação ácida (H_2SO_4 + metanol) para reduzir acidez antes da transesterificação.
- III. Preparação da cinza de curauá (catalisador)
 - Coleta da biomassa: obter resíduos de curauá (fibras/casca).
 - Lavagem e secagem: remover impurezas orgânicas e umidade.
 - Calcinação: 600–900 °C por 1–8 h para formar óxidos ativos (CaO , K_2O).
 - Moagem e peneiramento: obter fração granulométrica adequada (ex.: <100 μm).
 - Ativação final: secagem em estufa e armazenamento em ambiente seco.
- IV. Caracterização do catalisador
 - Parâmetros essenciais: área específica (BET), basicidade (TPD- CO_2), composição química (XRF), estrutura (XRD), morfologia (SEM).
 - Critério de aceitação: boa basicidade e baixa lixiviação de metais alcalinos.
- V. Transesterificação (reação)
 - Montagem: reator com agitação, controle de temperatura e entrada de metanol. Parâmetros recomendados iniciais: metanol: óleo 6:1 (testar até 12:1); T 50–70 °C; tempo 60–480 min; carga catalítica 1–10% m/m; agitação 300–800 rpm.
 - Procedimento: misturar óleo pré-tratado, metanol e cinza de curauá; manter agitação e temperatura; amostrar periodicamente para GC.
- VI. Separação e purificação
 - Filtração: separar catalisador sólido por filtração a vácuo ou prensa.

- Decantação: separar biodiesel (fase superior) e glicerol (fase inferior).
 - Lavagem: lavar biodiesel com água morna ou solução salina até remoção de impurezas; secar até teor de água aceitável.
- VII. Regeneração do catalisador
- Procedimento: lavar catalisador filtrado para remover resíduos orgânicos; secar e, se necessário, recalcinamento para reativação.
 - Monitoramento: avaliar perda de atividade por lixiviação e número de ciclos viáveis.
- VIII. Controle de qualidade e armazenamento
- Ensaios: conversão por GC; viscosidade; densidade; ponto de fulgor; teor de metanol; teor de água; acidez.
 - Armazenamento: tanques escuros, secos e ventilados; evitar contaminação por água.

3.2 Síntese do catalisador de cinzas de curauá

As folhas de curauá (*Ananas comosus* var. *erectifolius*) foram coletadas no Centro de Biotecnologia da Amazônia (CBA⁴) e trituradas com um moinho de facas. As fibras foram secas em um forno de esterilização a 80 °C por oito horas e armazenadas em tubos Falcon para manter suas características físicas e mitigar os de contaminação cruzada no Laboratório de Processos Químicos do riscos Centro IFAM-Manaus. As cinzas foram então colocadas num cadinho de porcelana (figura 9 a seguir) e processadas num forno de mufla a temperaturas de 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C. Essas cinzas serviram como catalisador para o processo de biodigestão.

⁴ O Centro de Bioeconomia da Amazônia (CBA) é uma instituição voltada para ciência, inovação e negócios sustentáveis, que busca transformar a biodiversidade amazônica em motor de desenvolvimento econômico e social. Ele atua como polo de pesquisa, tecnologia e empreendedorismo, promovendo parcerias entre governo, universidades, empresas e comunidades locais.

Figura 10: Preparação das cinzas de curauá



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em seguida, as variáveis de controle para a produção de biodiesel foram selecionadas utilizando a ferramenta para determinar o ponto mais eficaz no processo de transesterificação. A catálise foi então realizada conforme mostrado na Figura 10 a seguir. A Figura 11 mostra um modelo esquemático para a produção de biodiesel utilizando um catalisador à base de fibra de curauá.

3.3 Procedência do material vegetal

O material vegetal utilizado para o estudo foi adquirido do Centro de Biotecnologia da Amazônia – CBA, por meio de doação. O CBA localiza-se na Av. Gov. Danilo de Matos Areosa, 690 - Distrito Industrial.

3.4 Descrição da área experimental

O ensaio de cultivo em ambiente controlado foi conduzido na área experimental da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, situada na Av. General Rodrigo Octávio Jordão Ramos, n1200, Coroado 1, Manaus, no período de julho de 2021 a fevereiro de 2022. Foram utilizados dois tipos de solos, um latossolo amarelo e um podzólico, coletados na Estação Experimental de Hortaliças Alejo Van der Pahlen, da Coordenação de Sociedade Ambiente e

Saúde do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia– EEH-Csas-Inpa; e outro na Universidade Federal do Amazonas – UFAM, na área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias – FCA. Dos solos coletados, foi homogeneizado 1kg de cada tipo de solo para análise física e química no laboratório temático de solos e plantas do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA. Foram utilizadas duas variedades de curauá, o branco e o roxo, de variedade não especificada pelo Centro de Biotecnologia da Amazônia – CBA.

3.5 Delineamento experimental

O delineamento experimental seguiu um esquema fatorial 2x2x7 com cinco repetições e uma planta por parcela. Os tratamentos foram compostos pela interação de quatro doses de nitrogênio (0; 50; 100 e 200 kg ha⁻¹, na fonte ureia - 45% de N), quatro doses de P₂O₅ (0; 25, 50 e 100 kg ha⁻¹, na fonte de superfosfato triplo - 45% de P₂O₅) e quatro doses de K₂O (0; 40; 80 e 160 kg ha⁻¹, na fonte cloreto de potássio - 60% K₂O). Além das plantas dentro do tratamento controle, foram aplicadas outras três doses de N, P e K com neutralização de acidez prévia mediante análise de solo, com uma dose de calcário dolomítico (14% de MgO, 32% de CaO e PRNT=90%), visando elevar a saturação por bases (V) a 60%, conforme planilha a seguir que apresenta o detalhando dos tratamentos:

Tabela 06: Tratamentos do solo

Tratamentos	Variedade	Solo	Adubação
T1	Branco	Latossolo	Controle
T2	Branco	Latossolo	½ A.B.
T3	Branco	Latossolo	A.B.
T4	Branco	Latossolo	D.A.B
T5	Branco	Latossolo	½ A.B. + Calcário
T6	Branco	Latossolo	A.B. + Calcário
T7	Branco	Latossolo	D.A.B. +Calcário
T8	Roxo	Latossolo	Controle
T9	Roxo	Latossolo	½ A.B.
T10	Roxo	Latossolo	A.B.
T11	Roxo	Latossolo	D.A.B
T12	Roxo	Latossolo	½ A.B. + Calcário
T13	Roxo	Latossolo	A.B. + Calcário
T14	Roxo	Latossolo	D.A.B. +Calcário

T15	Branco	Podzólico	Controle
T16	Branco	Podzólico	½ A.B.
T17	Branco	Podzólico	A.B.
T18	Branco	Podzólico	D.A.B
T19	Branco	Podzólico	½ A.B. + Calcário
T20	Branco	Podzólico	A.B. + Calcário
T21	Branco	Podzólico	D.A.B. + Calcário
T22	Roxo	Podzólico	Controle
T23	Roxo	Podzólico	½ A.B.
T24	Roxo	Podzólico	A.B.
T25	Roxo	Podzólico	D.A.B
T26	Roxo	Podzólico	½ A.B. + Calcário
T27	Roxo	Podzólico	A.B. + Calcário
T28	Roxo	Podzólico	D.A.B. + Calcário

Legenda: ½ A.B.: metade da adubação básica, A.B.: Adubação básica, D.A.B.: Dobro da adubação básica.

Fonte: Elaborado pelo autor

As plantas foram cultivadas em sacos de muda tipo “*bag*” com volume de 5 litros de solo por um período de 6 meses. Após a conclusão do experimento foram extraídas amostras de folhas e encaminhadas para processamento em laboratório, onde as folhas do curauá foram inicialmente lavadas em água corrente e secas em estufa sob temperatura de 80 °C durante 48 h. Posteriormente, foram cortadas em tamanhos médio de 10 cm e submetidas a moagem utilizando um moinho de facas da marca, Fortinox, modelo STAR FT-60 Macro, velocidade de 1200 rpm. O material obtido foi peneirado até atingir partículas com dimensões próximas de 30 mesh, o qual armazenado para realização de caracterizações iniciais, como também, obtenção das cinzas.

As cinzas obtidas a partir da biomassa moída, proveniente das folhas do curauá, foi submetida a um programa de temperatura sob taxa de aquecimento de 10 °C/min⁻¹, partindo da temperatura ambiente até as temperaturas de 600 °C, 700 °C, 800 °C, e 900 °C, o qual permaneceu durante 1h em cada patamar. O resfriamento do sistema após atingir as temperaturas desejadas ocorreu de forma natural até alcançar a temperatura ambiente. O pó obtido foi coletado e armazenado para as caracterizações e futuros ensaios catalíticos na conversão de biodiesel.

3.6 Caracterizações

O padrão de difração da biomassa moída e as cinzas derivadas das folhas do curauá foram coletados utilizando um difratômetro da marca Shimadzu, modelo XRD 7000, utilizando obtendo as informações cristalográficas no intervalo 2θ entre 5 e 100 °C. Para tanto, foi adotado velocidade de 2 °min⁻¹ e intervalo de 0.02°, usando a radiação K α proveniente de um ânodo de cobre (CuK α = 0.15406 nm), disponível na Central Analítica do Instituto Federal do Amazonas, Campus Manaus Centro (CMC).

A caracterização elementar da biomassa moída e cinzas do curauá foi realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), utilizando um equipamento da marca Shimadzu, modelo EDX 7200, disponível no Instituto Conecthus. As amostras foram analisadas sem necessidade de qualquer tratamento prévio, além disso, foram acomodadas em um suporte plástico contendo um filme fino de polipropileno e submetidas a análise utilizando varreduras sob ausência de filtro ou qualquer mecanismo inicial de exclusão elementar.

Análise do teor de umidade das fibras foi estimado utilizando o método de desidratação, seguindo os passos descritos por Rosa, C. C., Moreira, D. D. C., Bilcati, G. K. (2015). Neste caso, sob temperatura próxima de 100 °C. Neste estudo, a determinação foi realizada em triplicata utilizando a massa de 5 g da biomassa derivada das folhas do curauá inseridas em cadinhos de porcelana e submetidas a desidratação durante 48 h em estufa sob temperatura de 100 °C. O teor de umidade (U%) foi calculado utilizando a seguinte equação:

$$U\% = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad (01)$$

Onde m_i e m são a massa da fibra úmida e massa da fibra após o processo de desidratação em estufa até a obtenção da massa constante da amostra. Inicialmente foram obtidos o teor de umidade e o teor de cinzas da biomassa do curauá, resultando, portanto, nos percentuais de 20,62%. O teor de cinzas (TC) foi determinado utilizando o método gravimétrico, neste caso, submetendo a amostra a pirólise em atmosfera de ar oxidante sob temperatura de 800 °C, no intervalo de 3h. Portanto, 3 g de amostra foram adicionadas em um cadinho de porcelana e submetidas a pirólise em triplicata, usando um forno com atmosfera oxidante com taxa de

aquecimento de 10 °Cmin⁻¹, da temperatura ambiente até 800 °C. O teor de cinzas foi, portanto, calculado usando a Equação 02, como segue:

$$TC = \frac{m_{final} - m_{cadinho}}{m_{amostra}} \times 100 \quad (02)$$

Onde, m_{final} e $m_{amostra}$ são as massas do cadinho com a amostra após o tratamento térmico e a massa da amostra, respectivamente. Enquanto $m_{cadinho}$ é a massa do cadinho utilizado no tratamento térmico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise morfológica: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das fibras

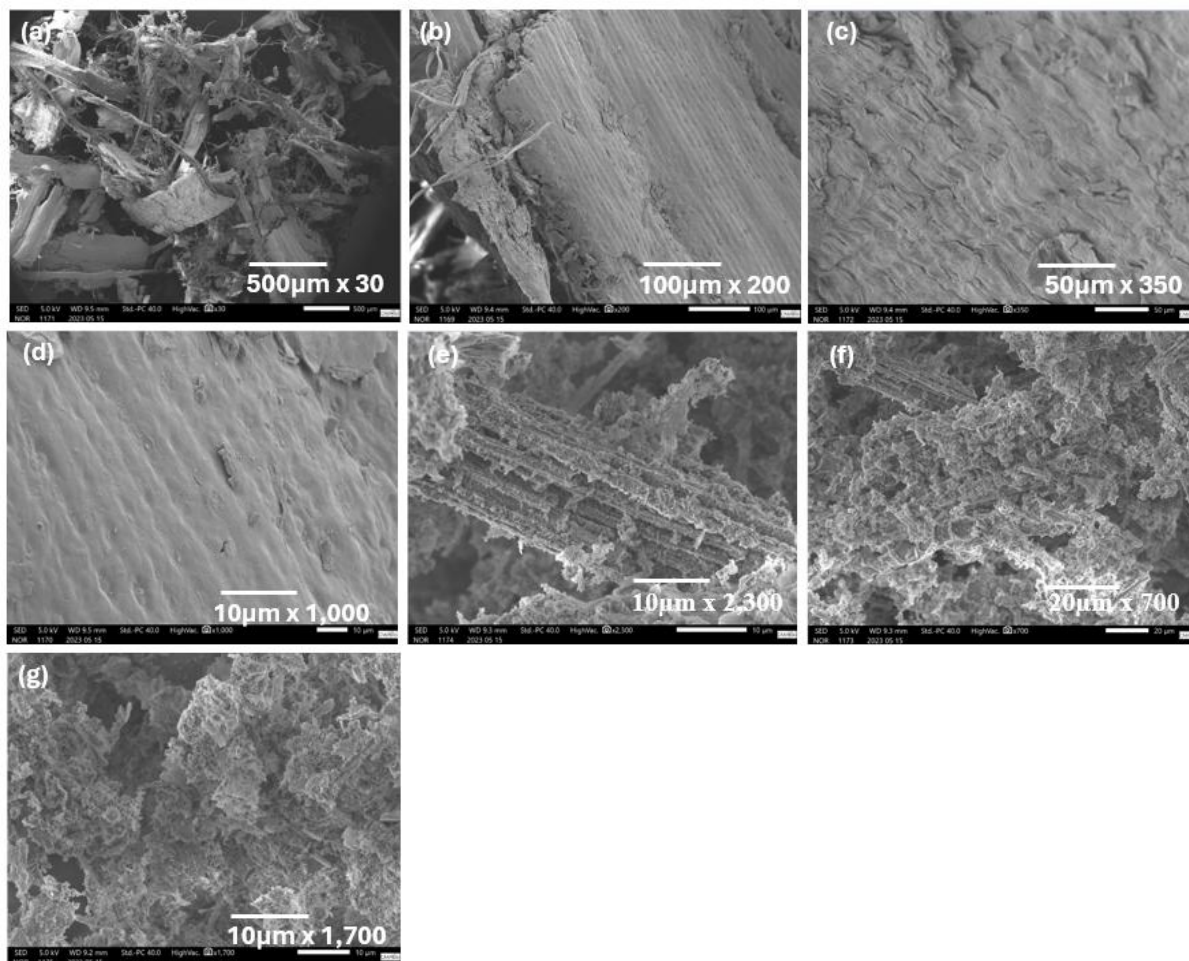
Os testes de MEV foram realizados no Laboratório CMA da Universidade do Estado do Amazonas – UEA. Para observar as características morfológicas das fibras de curauá, foi utilizada uma tensão de aceleração de 5 kV. A distância entre a câmara MEV e as amostras foi de 9,5 mm. O objetivo da utilização da micrografia MEV foi medir as características das amostras, comparando as amostras de fibra e cinza. Algumas imagens foram registradas utilizando microscopia eletrônica e óptica de varredura das fibras de curauá, conforme mostrado nas figuras a seguir, com diferentes resoluções variando de 500 µm a 10 µ, para facilitar a análise. A micrografia mostra a morfologia da fibra como um arranjo compacto, no qual a matriz de lignina e hemicelulose liga um grande número de fibrilas interconectadas.

4.1.1 Funções principais dos principais componentes de parede celular de fibras vegetais:

- a) Celulose (O Componente Estrutural): A celulose é o componente mais abundante e forma a "armadura" da parede. Organiza-se em longas cadeias que se agrupam em microfibrilas.
 - Resistência à Tração: Fornece a força necessária para suportar a pressão interna da célula (pressão de turgor).
 - Forma Celular: Determina a orientação do crescimento da célula.
 - Suporte Mecânico: Permite que a planta se mantenha vertical, mesmo sem um esqueleto ósseo.

- b) Hemicelulose (O Conector): Ao contrário da celulose, a hemicelulose é composta por cadeias ramificadas que se ligam às microfibrilas de celulose.
- Ligação: Atua como uma "cola" ou ponte, ligando as fibras de celulose umas às outras.
 - Estabilidade: Aumenta a coesão da rede de polímeros, impedindo que as fibras de celulose deslizem desordenadamente.
- c) Pectina (A Matriz Flexível): A pectina forma uma substância gelatinosa que preenche os espaços entre a celulose e a hemicelulose.
- Hidratação: Retém água, mantendo a parede hidratada e flexível.
 - Adesão Celular: É o principal componente da lamela média, a camada que "cola" duas células vizinhas.
 - Porosidade: Controla a passagem de moléculas através da parede.
- d) Lignina (O Reforço de Impermeabilização): Encontrada principalmente em tecidos lenhosos (madeira) e na parede secundária de células maduras.
- Rigidez Extrema: Confere dureza adicional, permitindo que as árvores atinjam grandes alturas.
 - Impermeabilização: Torna a parede hidrofóbica, o que é essencial para o transporte de água no xilema (vasos condutores).
 - Proteção: Dificulta o ataque de patógenos e a digestão por herbívoros.
- e) Proteínas Estruturais (Os Moduladores): Embora presentes em menor quantidade (como as extensinas), desempenham papéis cruciais.
- Expansão: Ajudam a controlar o relaxamento e o crescimento da parede durante o desenvolvimento da célula.
 - Sinalização: Participam na defesa contra doenças, detectando ataques de fungos ou bactérias.

Figura 11: Imagens MEV das fibras de curauá



Fonte: Elaborado pelo Autor

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (figura 11a a 11g) revelam a morfologia característica das fibras de curauá em diferentes escalas. Em baixas ampliações, observa-se a estrutura alongada e a presença de feixes fibrilares, enquanto ampliações maiores evidenciam superfícies irregulares, microfissuras longitudinais e a exposição de microfibrilas. Essa morfologia é típica de fibras lignocelulósicas e está associada à organização hierárquica da celulose, hemicelulose e lignina, conforme amplamente descrito para fibras como sisal, juta e abacaxi Faruk et al., (2012); Mohanty et al., (2005); Bledzki & Gassan, (1999). A presença de lumens internos e rugosidade superficial, frequentemente observada em fibras amazônicas, contribui para a baixa densidade e favorece a adesão interfacial em compósitos Satyanarayana et al., (2007).

As micrografias das cinzas mostram uma morfologia distinta daquela observada na fibra in natura, caracterizada por partículas irregulares, aglomerados e superfícies porosas. Esse comportamento é típico de materiais inorgânicos resultantes da pirólise de biomassas, nos quais a degradação térmica da fração orgânica promove a formação de estruturas sinterizadas e heterogêneas Matos et al., 2018; Vassilev et al., (2013). A presença de aglomerados e partículas de diferentes tamanhos é compatível com cinzas de fibras vegetais ricas em sílica, fosfatos e sulfatos Nunes et al., (2020), indicando que a pirólise concentrou os elementos inorgânicos originalmente presentes na biomassa.

4.2 Espectroscopia de Fluorescência de raios X (FRX)

A análise realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X revelou a composição semiquantitativa dos elementos presentes na matriz da biomassa moída do curauá, como também, nas cinzas obtidas após o tratamento térmico. Na Tabela 07 estão dispostos os respectivos percentuais para o teor elementar na biomassa moída e cinzas do curauá, como também, os reportados pela literatura consultada. É importante ressaltar que a espectroscopia de FRX possibilitou a identificação e quantificação elementar partindo do elemento químico potássio (K), ou seja, número atômico (Z) igual ou maior que 11. Como pode ser conferido na Tabela 6, os principais elementos presentes na matriz são o cálcio (Ca), potássio (K), silício (Si), ferro (Fe), enxofre (S) e fósforo. Além disso, é perceptível a variação da composição elementar antes e depois do processamento por pirólise da biomassa, onde esse efeito decorre da combustão da matéria orgânica presente, enriquecendo a matriz com compostos inorgânicos na forma de seus respectivos óxidos, obtendo, conseqüentemente, o acréscimo do teor elementar. Contudo, houve uma exceção para o teor de ferro, observando o decréscimo de 4,08(7) % na biomassa para 0,76(7) % na matriz das cinzas obtidas, efeito possivelmente associado com a lixiviação e impregnação deste elemento na forma de óxido nas paredes e parte inferior do cadinho o qual foi utilizado no procedimento de pirólise.

Tabela 07: Resultado da análise elementar semiquantitativa para os elementos presentes na biomassa moída e cinzas do curauá, como também, os teores reportados pela literatura consultada.

Elementos	Biomassa (%)	Cinzas (%)
Ca	42,18(4)	40,12(3)
K	37,91(1)	33,01(0)
Si	10,41(4)	11,65(8)
Fe	4,08(7)	0,76(7)

S	2,37(2)	8,19(8)
P	1,30(2)	4,50(9)
Outros	1,75	1,77

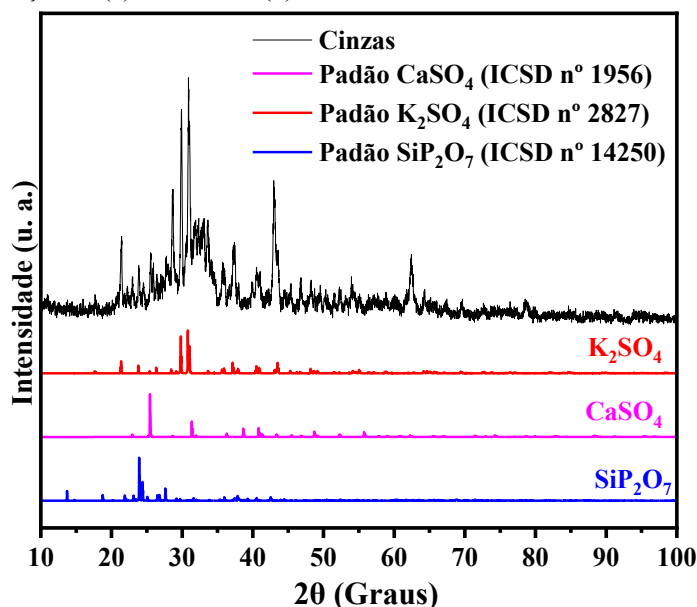
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Difração de raios X (DRX)

Os padrões de difração coletados para a biomassa e cinzas do curauá estão apresentados em partes da Figura 12 é possível notar a ocorrência de um perfil característico de materiais com baixo grau de cristalinidade, perfil este também reportado para outras biomassas tais como as derivadas do abacaxi, sisal e juta. Os picos com base alargada e pouca intensidade relativa, estão associadas com a organização das cadeias de celulose, hemicelulose e lignina, as quais compõem as fibras da fibra do curauá.

Na Figura 12 está apresentado o padrão de difração da cinza do curauá, como também, o padrão de difração do sulfato de cálcio (CaSO_4), sulfato de potássio (K_2SO_4) e silicato de fosfato (SiP_2O_7), obtidos a partir dos cartões disponíveis na base de dados Inorganic Crystal Structure Database (ICSD), com códigos nº. 1956, 2827 e 14250, respectivamente.

Figura 12: Padrão de difração da (a) biomassa e (b) cinzas das fibras do curauá.



Fonte: Elaborado pelo autor

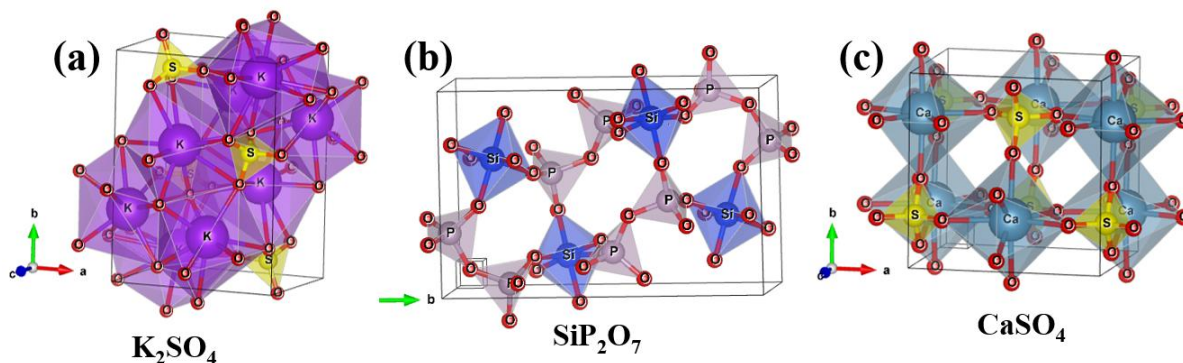
A indexação do padrão de difração das cinzas obtidas a partir da biomassa do curauá revelou a presença dos picos associados majoritariamente a estrutura do sulfato de potássio, o qual possui sistema ortorrômbico, grupo espacial $Pnam$, com parâmetros de rede $a = 7,4760 \text{ \AA}$, $b = 10,0710$

$\text{\AA}$ e $c = 5,7630 \text{ \AA}$ e quatro fórmulas por célula unitária. Por outro lado, foram indexados planos cristalográficos pertinentes a estrutura cristalina do sulfato de cálcio, que exibe sistema ortorrômbico de grupo espacial $Bmmb$, e parâmetros de rede $a = b = 6,9920 \text{ \AA}$ e $c = 6,2400 \text{ \AA}$, além disso, quatro fórmulas por célula unitária. Por fim, houve ainda picos associados com o silicato de fosfato que possui estrutura monoclinica de grupo espacial $P21/n$, $a = 4,7330 \text{ \AA}$, $b = 12,0190 \text{ \AA}$ e $c = 7,6540 \text{ \AA}$.

As estruturas cristalinas dos óxidos mencionados acima estão dispostas em partes da Figura 13, Model, utilizando o Software Visualization of Electronic Structure for Analysis (VESTA), versão 2023, como também, os respectivos cartões contendo as informações cristalográficas 1956 (CaSO_4), 2827(K_2SO_4) e 14250 (SiP_2O_7). Para todos os casos, é possível notar a ocorrência de clusters, ou seja, aglomerados de átomos de oxigênio coordenados a um centro metálico ou ametálico, em que para o sulfato de potássio, os átomos de potássio estão coordenados a oito átomos de oxigênio, compondo clusters $[\text{KO}_8]$, enquanto os átomos de enxofre encontram-se coordenados a quatro átomos de oxigênio, compondo clusters de geometria tetraédrica $[\text{SO}_4]$.

Como pode ser notado na Figura 13(b), os átomos de silício estão geometricamente organizados em clusters do tipo octaédrico $[\text{SiO}_6]$, ou seja, coordenados com seis átomos de oxigênio. Por outro lado, os átomos de fósforo estão ligados a quatro átomos de oxigênios $[\text{PO}_4]$, resultando na geometria tetragonal. Por fim, o sulfato de cálcio exibe dois tipos de clusters, onde o cálcio compõe clusters octaédricos $[\text{CaO}_6]$, enquanto os átomos de enxofre, os clusters tetraédricos $[\text{SO}_4]$.

Figura 13: Representação esquemática da célula unitária do (a) K_2SO_4 , (b) SiP_2O_7 e (c) CaSO_4 .



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Composição elementar por FRX

A Tabela 07 apresenta os teores elementares obtidos por espectroscopia de fluorescência de raios X para a biomassa moída e para as cinzas. Os principais elementos identificados foram Ca, K, Si, Fe, S e P, em concordância com estudos prévios sobre fibras amazônicas e outras biomassas lignocelulósicas Santos et al., (2021); Oliveira et al., (2019). Após a pirólise, observa-se um aumento relativo nos teores de Si, S e P, fenômeno associado ao enriquecimento inorgânico decorrente da remoção da fração orgânica Vassilev et al., (2010). A redução significativa do teor de Fe (de 4,08% para 0,76%) sugere processos de lixiviação térmica ou impregnação do óxido nas paredes do cadinho durante o tratamento térmico, comportamento já relatado em pirólise de materiais ricos em minerais Jenkins et al., (1998). Esse efeito reforça a natureza dinâmica das transformações termoquímicas que ocorrem durante a decomposição da biomassa.

4.4.1 Difração de raios X da biomassa e das cinzas

Os padrões de difração apresentados na Figura 12 evidenciam diferenças marcantes entre a biomassa e as cinzas. O difratograma da biomassa (Figura 12a) apresenta picos largos e de baixa intensidade, característicos de materiais semicristalinos. Esse comportamento é típico de fibras lignocelulósicas, nas quais a cristalinidade é atribuída à celulose I, enquanto hemicelulose e lignina contribuem para o halo amorfo French & Santiago Cintrón, (2013).

Após a pirólise, o difratograma das cinzas (Figura 12b) apresenta picos bem definidos, indicando a formação de fases cristalinas estáveis. A indexação revelou a presença predominante de sulfato de potássio (K_2SO_4 , ICSD 2827), acompanhado de sulfato de cálcio ($CaSO_4$, ICSD 1956) e silicato de fosfato (SiP_2O_7 , ICSD 14250). A formação dessas fases é coerente com a composição elementar identificada por FRX e com estudos que descrevem a cristalização de sulfatos e silicatos em cinzas de biomassa submetidas a altas temperaturas Vassilev et al., (2013). A presença simultânea dessas fases sugere interações termoquímicas entre K, Ca, Si e P durante a pirólise, resultando em uma matriz inorgânica complexa e termicamente estável. Esses resultados reforçam o potencial das cinzas de curauá como precursoras de materiais cerâmicos ou como aditivos minerais em formulações cimentícias.

As estruturas cristalinas apresentadas na Figura 13(a–c), modeladas no software VESTA (versão 2023), evidenciam unidades estruturais típicas de compostos oxigenados, cujas propriedades físico-químicas derivam diretamente da geometria e da conectividade dos clusters de coordenação. No caso do sulfato de potássio (K_2SO_4 , ICSD 2827), observa-se que os cátions K^+ , devido ao seu grande raio iônico, apresentam coordenação elevada, formando clusters $[\text{KO}_8]$, enquanto o ânion sulfato mantém sua geometria tetraédrica $[\text{SO}_4]$, altamente estável e recorrente em compostos contendo enxofre hexavalente Greenwood & Earnshaw, (1997); Wells, (2012). Essa combinação estrutural confere ao material elevada estabilidade térmica e solubilidade moderada, características típicas de sulfatos alcalinos West, (2014). Para o pirofosfato de silício (SiP_2O_7 , ICSD 14250), verifica-se a presença simultânea de octaedros $[\text{SiO}_6]$ — uma coordenação menos comum para o silício, mas observada em estruturas mais densas — e tetraedros $[\text{PO}_4]$, que se conectam formando grupos pirofosfato ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$), resultando em uma rede anisotrópica com elevada estabilidade térmica e baixa solubilidade (O’Keeffe e Hyde, (1996); Mackenzie e Smith, (2002); West, (2014). Já o sulfato de cálcio (CaSO_4 , ICSD 1956) apresenta clusters octaédricos $[\text{CaO}_6]$, típicos de cátions alcalino-terrosos, combinados com tetraedros $[\text{SO}_4]$, formando uma rede cristalina rígida responsável por sua baixa solubilidade, estabilidade térmica e propriedades mecânicas adequadas para aplicações cerâmicas e cimentícias Deer, Howie & Zussman, (2013); Kingery, Bowen & Uhlmann, (1976). De modo geral, a presença de unidades tetraédricas rígidas, como $[\text{SO}_4]$ e $[\text{PO}_4]$, e de octaedros densamente coordenados, como $[\text{SiO}_6]$ e $[\text{CaO}_6]$, influencia diretamente propriedades térmicas, mecânicas e vibracionais desses materiais, conforme amplamente discutido na literatura de química do estado sólido e cristalografia Ashcroft & Mermin, (1976); Nakamoto, (2009).

4.5 Purificação do biodiesel

a) Centrifugação: Após as amostras passarem pelo biodigestor na placa aquecedora, conforme descrito nas tabelas anteriores, as amostras foram centrifugadas em tubos Eppendorf numa microcentrífuga por aproximadamente 10 minutos cada, a uma velocidade de aproximadamente 10.000 rpm, para separar a fase sólida (cinza de curauá) da fase líquida (biodiesel). As amostras foram numeradas de acordo com a experiência e, em seguida, passamos para a fase de evaporação rotativa, com foco na eliminação de impurezas e humidade.

b) Evaporador rotativo: Para purificação antes da etapa de quantificação do biodiesel, as amostras foram submetidas a uma temperatura de 70°C, com velocidade de rotação de 30 rpm, por aproximadamente 20 minutos por amostra, para evaporar o metanol e a água. As amostras foram então identificadas novamente de acordo com o experimento em tubos Eppendorf.

4.6 Ressonância Magnética Nuclear

Os espectros de RMN dos extratos foram obtidos no Laboratório de Ressonância Magnética Nuclear (NMRLab) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), utilizando um espectrômetro de RMN Bruker Avance IIIHD operando a 11,7 T, equipado com uma sonda BBFO Plus SmartProbe™ de 5 mm com gradiente no eixo z. Os espectros de RMN 1H para quantificação foram obtidos utilizando a sequência de pulsos zg com os seguintes parâmetros de aquisição: pontos de dados no domínio do tempo (TD) de 65k, largura espectral (SW) de 10 kHz, tempo de aquisição (AQ) de 3,28 s, número de repetições (NS) igual a 8, resolução FID de 0,30 Hz, ganho do receptor (RG) constante em 10 e frequência central (O1) definida para 3088,30 Hz. A duração do pulso de 90° (P1) foi determinada individualmente para cada amostra, e o tempo de relação (D1) foi estimado através da experiência de inversão-recuperação utilizando a sequência de pulsos t1ir1d (12,88 s). Os desvios químicos foram expressos em ppm (d) e as constantes de acoplamento (J) foram registradas em (Hz). O software TopSpin 3.6.3 foi utilizado para processar os espectros de RMN.

Os testes BET e EDS também foram analisados com o apoio da Divisão de Materiais do Inmetro – DIMAT, no município de Xerém-RJ, uma vez que não havia disponibilidade na região para realizá-los. Assim, para complementar as informações e dar maior robustez às conclusões relacionadas ao trabalho, o Inmetro foi de importância essencial para a realização do nosso trabalho.

4.7 Otimização da conversão de FAME utilizando a metodologia de superfície de resposta (RSM)

De acordo com Buasri, A. et al, (ChemEngineering /2023), a metodologia de superfície de resposta (RSM) utilizando o desenho Box-Behnken (BBD) foi utilizada para otimizar a conversão do éster metílico de ácido gordo (FAME) na reação de transesterificação, utilizando

o Minitab Statistical Software® (versão 22/Demo). Os parâmetros operacionais, ou seja, temperatura de catálise (A), tempo de reação (B) e razão molar metanol: óleo (C) foram variados para maximizar a conversão de FAME. A Tabela 08 mostra os níveis codificados e não codificados das variáveis independentes Box-Behnken utilizadas para otimizar os parâmetros de reação na transesterificação de resíduos de óleo de cozinha.

Tabela 08 - Variáveis independentes de Box-Behnken (codificadas e não codificadas) para a otimização das variáveis de reação no processo de transesterificação.

Fator	Níveis		
	-1	0	+1
a) Temperatura de catálise (°C)	80	100	120
b) Tempo da reação (h)	1	3	5
c) Relação molar metanol: óleo (%)	15	20	25

Fonte: Elaborado pelo Autor

O desenho experimental baseou-se na metodologia de otimização Box-Behnken (BBD), desenvolvida no Minitab® 22, onde foram definidos oito pontos (duas réplicas para cada ponto), constituindo assim 16 experiências, conforme descrito na Tabela 8. Essas experiências permitiram estudar a influência de cada variável independente e as relações entre essas variáveis na conversão do FAME⁵ na variável dependente.

Tabela 09 - Desenho experimental para a otimização de várias variáveis de reação na reação de transesterificação.

Realização de experiências n.º	A-Temperatura de catálise (°C)	B-Tempo de reação (h)	C-Relação molar entre metanol e óleo (%)
1	120	1	15%
2	80	1	25%
3	80	1	25%
4	80	5	15%
5	80	5	25%
6	80	1	15%
7	120	1	15%
8	80	5	15%
9	80	5	25%
10	120	1	25%
11	120	5	25%
12	120	5	25%
13	120	5	15%
14	120	1	25%
15	80	1	15%
16	120	5	15%

Fonte: Elaborado pelo autor

⁵ O FAME é produzido a partir de óleos vegetais, gorduras animais ou óleos de cozinha usados através da transesterificação. No processo de transesterificação, um glicerídeo reage com um álcool na presença de um catalisador, formando uma mistura de ésteres de ácidos gordos e um álcool. A utilização de triglicéridos resulta na produção de glicerol.

A equação polinomial (4) foi utilizada para analisar os dados experimentais através da regressão da superfície de resposta. Na equação, temos: Y é o fator de resposta, b₀ é a interseção, b_i é o coeficiente de primeira ordem, X_i é o fator independente, b_{ii} é o coeficiente quadrático do i-ésimo fator, b_{ij} é o coeficiente linear do modelo para a interação entre o i-ésimo e o j-ésimo fatores, k é o número de fatores estudados e otimizados, e é o erro experimental atribuído a Y.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} X_i X_j + e \quad (04)$$

A Tabela 10 corresponde à análise dos resultados da taxa de conversão em relação às variáveis do estudo para o processo de transesterificação, conforme mencionado anteriormente na Tabela 09.

Tabela 10: Relação entre as variáveis do estudo e a taxa média de conversão do biodiesel.

	Temperatura °C	Tempo (h)	Razão Metanol (%)	Taxa media de conversão
1	-1	1	-1	94,72
2	1	-1	1	92,63
3	-1	1	1	89,50
4	1	1	-1	89,74
5	-1	-1	-1	87,06
6	1	1	1	90,32
7	-1	-1	-1	80,34
8	-1	-1	1	71,09

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11: Coeficientes de regressão estimados para a taxa de conversão em %

Term.	Efeito	Std.Err.	t	p	Coeficiente	Std.Err.
Medida/Interc.	87,530	0,906	96,647	0,000	87,530	0,906
Temperatura (°C)	2,820	1,917	1,471	0,175	1,410	0,958
Tempo (h)	8,102	1,904	4,255	0,002	4,051	0,952
Razão Metanol (%)	-2,266	1,904	-1,190	0,264	-1,133	0,952
Temperatura x Tempo	-5,926	1,904	-3,113	0,012	-2,963	0,952
Temperatura x Razão Metanol	7,332	1,904	3,851	0,004	3,666	0,952
Tempo x Razão Metanol	-1,760	1,882	-0,935	0,374	-0,880	0,941

R²=0,80

Fonte: Elaborado pelo autor

Quando o coeficiente de regressão (R²) é superior a 80%, o modelo de regressão apresenta um bom ajuste. Neste caso, os coeficientes de regressão estimados para a conversão de FAME são apresentados na Tabela 11. Observou-se que, neste estudo, o valor R² foi de 94,7% e o R² (ajustado) foi de 98,8 %, para compensar efeitos indesejáveis, pois indica o ajuste do modelo pelos dados experimentais, além do número de variáveis preditoras. O R² ajustado tenderá a aumentar as variáveis preditoras expeditas forem adicionadas ao modelo e diminuirá devido à adição de variáveis preditoras ineficazes. Esses valores R² sugerem que o modelo quadrático é

aceitável para as respostas do sistema com mudanças na temperatura, tempo de reação e razão molar (metanol: óleo). O valor R^2 ajustado e os valores R^2 previstos mostram uma estreita correlação entre os valores previstos e observados. Portanto, os valores R^2 ajustado e R^2 previsto estão em boa concordância.

Os valores previstos e experimentais da conversão de FAME (%) são mostrados na Fig. 15. As diferenças médias entre os valores previstos e experimentais são $<0,15$, o que mostra que o modelo está de acordo com os dados experimentais. Valores de probabilidade $>0,05$ são considerados irrelevantes. A temperatura, o tempo, a razão molar (metanol: óleo) e os seus quadrados têm $p < 0,05$. Portanto, a temperatura, o tempo e a razão molar foram considerados fatores substanciais que afetam a conversão de FAME.

Os coeficientes da razão molar, temperatura e tempo, conforme mostrado na tabela, têm sinal positivo e indicam um aumento na conversão de FAME com essas variáveis. A razão molar metanol: óleo variou entre 15:1 e 25:1 para estudar a influência da razão molar do óleo na conversão de FAME. A Figura 17 mostra os gráficos de contorno e a Figura 20 mostra os gráficos de superfície do efeito combinado das variáveis do estudo e da conversão de FAME, respetivamente. Observou-se que o aumento da quantidade de metanol acima de uma razão de 25:1M reduziu a conversão de FAME, revelando a dificuldade de separar os ésteres metílicos e o glicerol devido à formação de emulsões.

A conversão de FAME foi obtida no máximo para uma proporção de 15:1M (metanol: óleo), 120 °C e 300 min de tempo de reação, conforme mostrado na Tabela 10, confirmando que esses são os parâmetros de reação ideais para a reação de transesterificação. Estes dados mostram que a proporção excessiva de metanol: óleo na reação de transesterificação não resulta necessariamente num aumento da conversão, enquanto o excesso de metanol ajuda a aumentar a solubilidade do glicerol, o que resulta numa conversão mais baixa.

A experiência começou com uma análise de variância (ANOVA) do processo de conversão, onde utilizámos 95% como nível de significância, e o desenho utilizado foi um modelo fatorial com três fatores e dois níveis. Para isso, utilizámos a mesma lógica presente no artigo de

exemplo, mas utilizamos o software Statistica (versão 10, Statsoft, 2021), que nos permite maior versatilidade para esta etapa de avaliação estatística.

Como pode ver no Excel, adicionamos tabelas com os efeitos estimados, os valores ANOVA e a equação de regressão do modelo. Além disso, os seguintes gráficos estão anexados:

- Valores observados vs. valores previstos.
- Gráfico de Pareto (que mostra a relevância de cada parâmetro)
- Curvas de contorno (ou seja, gráficos 2D)
- Superfície de resposta (ou seja, gráficos 3D)
- Hipercubo

As curvas e superfícies são equivalentes, portanto, pode usar a figura que preferir. Aqui, usamos a biblioteca Shapely para os planos de contorno e o código para interpolar e sobrepor os planos para montar um cubo. Observe que a taxa de conversão é plotada em cores neste caso (já que as variáveis preditoras são os três eixos).

Tabela 12: Análise de variância (ANOVA) para % de taxa de conversão

Fonte	SS	df	MS	F	p
Temperatura (°C)	25,559	1	25,559	2,164	0,175
Tempo (h)	213,849	1	213,849	18,106	0,002
Razão Metanol (%)	16,735	1	16,735	1,417	0,264
Temperatura x Tempo	114,428	1	114,428	9,688	0,012
Temperatura x Razão Metanol	175,163	1	175,163	14,830	0,004
Tempo x Razão Metanol	10,321	1	10,321	0,874	0,374
Erro	106,301	9	11,811		
Total SS	521,438	15			

Fonte: Elaborado pelo autor

A ANOVA, conforme mostrado na Tabela 12, é usada para confirmar a adequação do modelo aplicado e os resultados comparáveis propostos usando o modelo de regressão. Como pode ser visto, o Tempo (h) tem a maior soma sequencial de quadrados (213,849) do que a Temperatura (114,428) e a Proporção de Metanol (175,163) e, portanto, o tempo de reação prova ser um fator dominante.

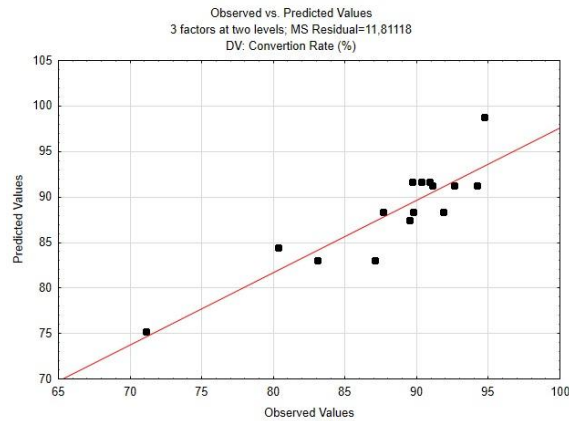
Tabela 13: Valores observados versus valores previstos da taxa de conversão óleo/metanol para a produção de biodiesel.

Amostra	Observado	Previsto
1	94,72	98,81
2	92,63	91,26
3	89,50	87,45
4	89,74	88,37
5	87,06	83,03
6	90,32	91,68
7	80,34	84,44
8	71,09	75,19
9	89,50	87,45
10	91,07	91,26
11	90,92	91,68
12	89,71	91,68
13	91,85	88,37

14	94,19	91,26
15	83,09	83,03
16	87,63	88,37

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14: Valores observados versus valores previstos para 3 fatores e 2 níveis



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15: Gráfico de Pareto analisando o grau de influência das variáveis na conversão do biodiesel.

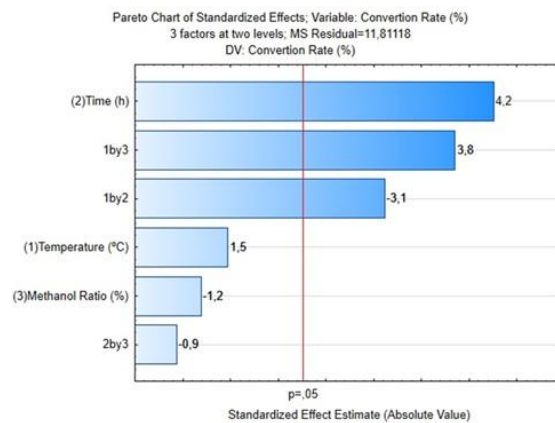
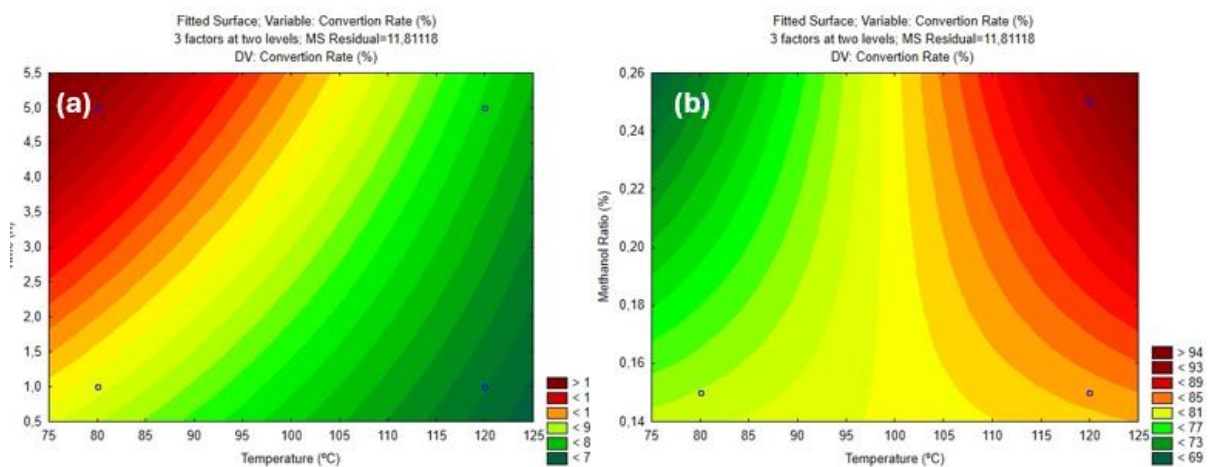


Figura 16: Gráfico de contorno do efeito do tempo de reação e da relação temperatura sobre a conversão de FAME (%) (a) e da temperatura de reação e da relação molar metanol: óleo sobre a conversão de FAME (%) (b).



A Figura 16 mostra os gráficos de contorno e superfície, respectivamente, dos efeitos combinados da temperatura, tempo de reação e relação metanol: óleo na conversão de FAME. A concentração do catalisador foi fixada em 20% para isolar o seu efeito na conversão de FAME.

Conforme mostrado na Figura 16, o aumento do tempo e da temperatura para uma concentração fixa de catalisador resulta em maior conversão de FAME. A conversão máxima de FAME ocorreu nas condições de reação ideais de 300 minutos e 120 °C. Além disso, um aumento catalítico excessivo do éster metílico induz a formação de gel.

A Figura 17 mostra os gráficos de contorno e superfície do efeito combinado do tempo de reação e da razão molar (metanol: óleo). Os tempos de reação variaram de 1 a 5 horas para estudar a sua influência na conversão de FAME. A Figura 18 mostra que o aumento do tempo de reação aumenta a conversão de FAME para uma razão molar fixa. A Tabela 15 mostra que a conversão máxima de FAME foi observada para uma razão molar de 20:1 (metanol: óleo), uma concentração de catalisador de 20% e um tempo de reação de 300 minutos a 120 °C. Assim, essas condições foram as condições ideais observadas para a reação de transesterificação.

Figura 17: Hipercubo para demonstrar a previsão da correlação entre as variáveis medidas para o processo de conversão metanol: óleo realizado em Phytion.

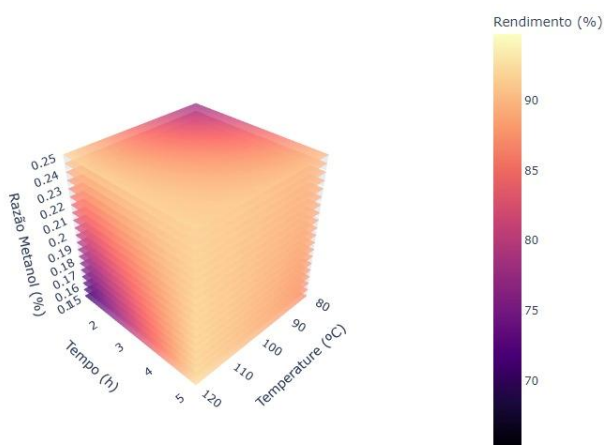


Figura 18: Hipercubo para demonstrar a previsão da correlação entre as variáveis medidas para o processo de conversão de metanol em óleo.

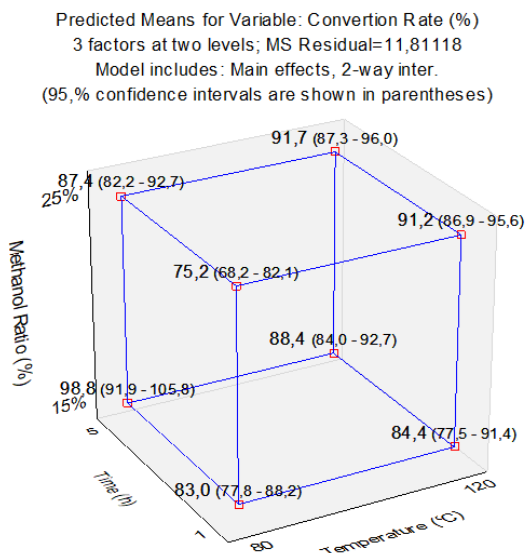
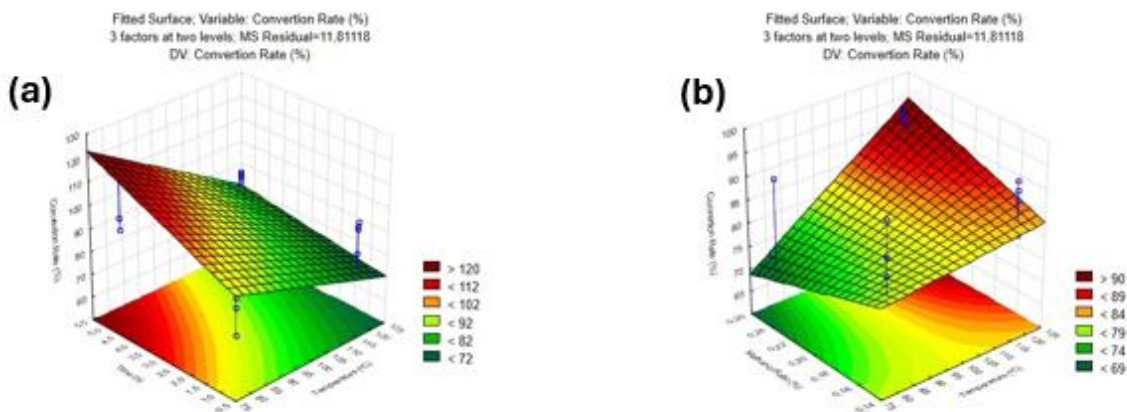


Figura 19: Superfície ajustada – Variável: Taxa de conversão (%) para 3 fatores e 2 níveis.



A equação de regressão para a conversão de FAME (%) obtida pela análise de regressão em termos codificados foi observada a partir da equação (05) como:

$$\text{Equação da taxa de conversão (\%)} = 87,52 + 4,05[\text{Tempo}] - 2,96[\text{Temperatura} \times \text{Tempo}] - 3,67[\text{Temperatura} \times \text{Relação metanol}] \quad (05)$$

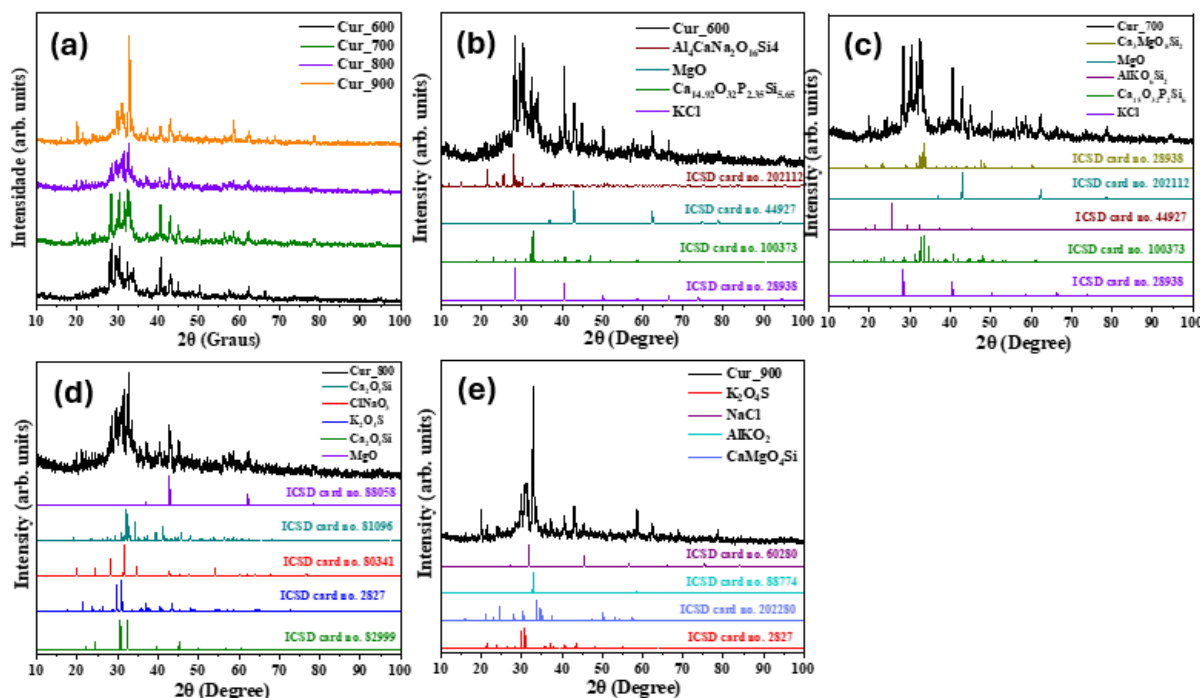
Preocupações relativas à atividade catalítica e reutilização: Os catalisadores heterogêneos podem ser separados, reciclados e reutilizados, ao contrário dos catalisadores homogêneos. A

atividade catalítica diminui quando a superfície é completamente coberta pelo produto, o que reduz o contacto do catalisador com o produto.

4.8 Resultados de XRD (MEV/EDS):

A espectroscopia de raios X de energia dispersiva (EDS) integrada à microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma análise semiquantitativa que permite a identificação de elementos químicos presentes nas amostras.

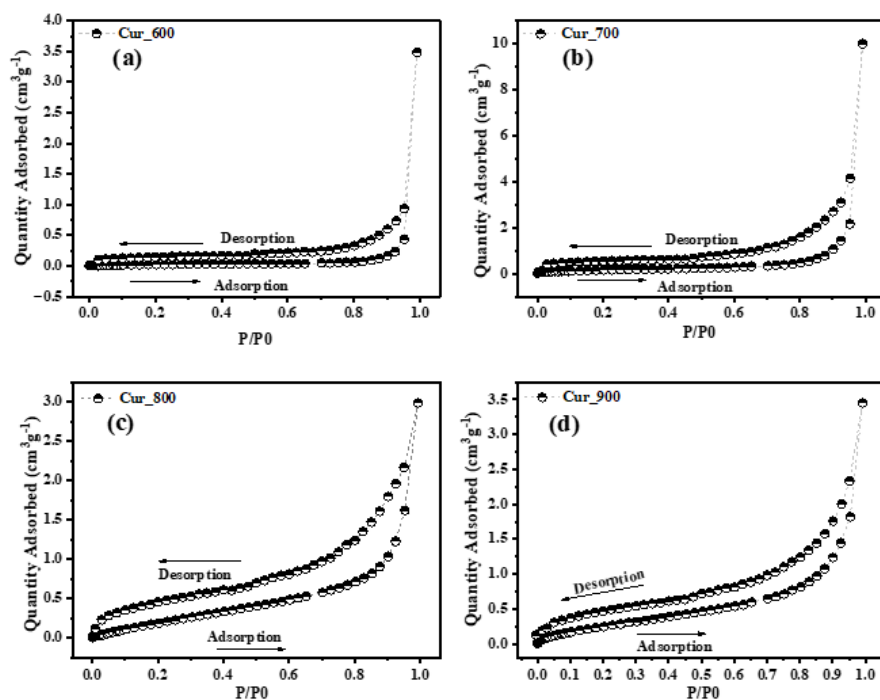
Figura 20 – Curvas de caracterização dos elementos presentes nas amostras.



4.9 Resultados do BET:

O teste de área superficial BET (Brunauer, Emmett, Teller) é uma técnica utilizada para medir a área superficial específica de materiais, especialmente cerâmicas. Este método baseia-se na adsorção de gases, geralmente nitrogênio, e é importante para avaliar propriedades como a porosidade e a uniformidade dos materiais.

Figura 21 – Curva de adsorção x temperatura das amostras



4.10 Análise dos resultados

Entre todos os fatores, o tempo de reação foi identificado como o fator dominante. Os gráficos de superfície de resposta e os gráficos de contorno indicam as interações entre as variáveis e a conversão de FAME. Com base nesses resultados, foi prevista uma conversão máxima de FAME de 98,81% (conforme mostrado na Tabela 14) usando o software, o que é próximo dos resultados obtidos experimentalmente. As condições de reação otimizadas obtidas foram uma razão molar de 20:1 (metanol: óleo), 20% de catalisador, temperatura de 120 °C e tempo de reação de 300 min.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos até o momento, de acordo com a proposta de desenvolver um processo sustentável para a produção de biodiesel com o uso de um catalisador heterogêneo,

verde, oriundo da uma biomassa residual das cinzas de curauá (*Ananas erectifolius*). Por meio do planejamento experimental D-Optimal para a obtenção do biodiesel de óleo de soja, os parâmetros do processo como: razão molar metanol/óleo, concentração do catalisador, temperatura e tempo de reação foram otimizados. O uso de cinzas de *Ananas cosmosus* var. *erectifolius*, ou curauá, mostrou-se altamente eficaz no processo de catálise da produção de biodiesel, alcançando taxas de conversão de aproximadamente 98,5%. Essa taxa é superior às obtidas com catalisadores produzidos a partir de outras plantas. Assim, os objetivos do estudo foram plenamente alcançados.

A conversão de resíduos de óleo de cozinha em biodiesel cria uma alternativa viável para eliminar os impactos ambientais do descarte e das emissões de GEE. Esse processo pode gerar créditos de carbono, proporcionando uma fonte adicional de receita. Ele alinha as organizações com empresas comprometidas com a preservação ambiental, melhorando sua imagem institucional e agregando valor a indicadores intangíveis, como a marca.

O uso de ferramenta informatizada para otimização da conversão de FAME utilizando a metodologia de superfície de resposta (RSM) foi essencial para acelerar o tempo obtenção dos resultados, uma vez que diminui a necessidade de realizar uma grande quantidade de repetições das amostras para diversas variáveis, relacionando a razão molar óleo x metanol, além do tempo e temperatura, até chegar ao valor ótimo de eficiência. Com o uso da tecnologia inovadora os resultados previstos mostraram-se altamente eficazes.

Os impactos gerados pelo trabalho podem ser elencados em diversas dimensões, tais como: CONTRIBUIÇÃO ORIGINAL, uma vez que se refere ao primeiro trabalho conhecido para o uso do curauá como catalisador heterogêneo para conversão de resíduo de óleo de cozinha para produção de biodiesel; Demonstração de taxa de conversão superior a 98% frente a outros resíduos vegetais e Integração inédita entre caracterização mineralógica e otimização estatística. IMPACTOS CIENTÍFICOS, relativos à possibilidade de registro de patente; publicação de artigo científico em revista de alto impacto e Possibilidade de desenvolvimento de novos materiais a partir das fibras de curauá, novos produtos e processos em diferentes cadeias produtivas, acelerando assim a bioeconomia na Amazônia. Podemos citar ainda os impactos econômicos, resultado do alto valor agregado da produção, em comparação com a

grande maioria das culturas produzidas na região norte, e finalmente dos aspectos estratégicos e sociais para as empresas da região, associados a política de implantação de um programa para institucionalização do ESG⁶ como ferramenta para promover a imagem das organizações com a finalidade de associá-las a imagem de empresas ambientalmente responsáveis.

Uma sugestão para trabalhos futuros é desenvolver equipamentos de baixo custo escaláveis, de acordo com a geração de resíduos de óleo de fritura, sendo que a estimativa do mercado é de uma demanda por biodiesel acima de trinta milhões de litros/ano, devido a legislação da Agência Nacional de Petróleo – ANP, que exige a mistura dos combustíveis fósseis com biodiesel, para mitigar a emissão dos GEE. Esta solução poderia ser desenvolvida como startups para projetos de eficiência energética ou como uma alternativa para mitigar os custos de descarte de resíduos urbanos para as administrações públicas.

Além disso, estamos desenvolvendo projetos para o uso das fibras de curauá na produção de compósitos, para substituição de matérias primas oriundas de outras regiões, e que apresentam processos onerosos e de alto impacto ambiental, ou ainda consomem grandes quantidades de energia, e no final do ciclo de vida do produto, transformam-se em resíduos perigosos.

⁶ ESG: É a sigla para *Environmental, Social and Governance* (Ambiental, Social e Governança), e representa um conjunto de práticas que avaliam como empresas e organizações lidam com sustentabilidade, responsabilidade social e transparência na gestão. É hoje um dos principais critérios usados por investidores e consumidores para medir o compromisso de uma empresa com o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBARELLI, J. et al. Effects of supercritical carbon dioxide on waste banana peels for heavy metal removal. *Journal of Supercritical Fluids*, v. 58, p. 343–351, 2011.
- BALAJI. Biomaterials based nano-applications of Aloe vera and its perspective: A review. *Royal Society of Chemistry*, 2015.
- BARNOSSI, W. et al. Tangerine, banana, and pomegranate peels valorisation for sustainable environment: A review. *Biotechnology Reports*, 2021.
- BELTRÃO, N. *Oleaginosas e seus óleos: Vantagens e Desvantagens para produção de Biodiesel*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2008.
- BERGAMO, R. et al. The Amazon bioeconomy: Beyond the use of forest products. *Ecological Economics*, v. 199, 107448, 2022.
- BIOFUTURE PLATFORM. *Cenário atual da bioeconomia avançada entre os países membros da bioplataforma e além*. APEX, 2018.
- BUGGE, M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A.; VIVIEN, F. D. What is Bioeconomy? A Review of Literature. *Sustainability*, v. 8, n. 691, 2016. DOI: 10.3390/su8070691.
- CAMPELO, A. P. et al. Uso de fibras vegetais na produção de compósitos elastoméricos sustentáveis. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 10, n. 2, p. 45-60, 2021.
- CARASCHI, A.; LEÃO, A. L. Fibra de Curauá: uma alternativa na produção de termoplásticos reforçados. *Plástico Industrial*, v. 3, n. 31, p. 214-229, 2001.
- CNPE. *Resoluções do Conselho Nacional de Política Energética*. Brasília, 2018.
- CORDEIRO, I. M. C. C. et al. *Cultivo e produção agroambiental sustentável de curauá (Ananas comosus var. erectifolius) no Nordeste paraense-PA*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2011.
- CORRÊA, A. C. et al. Nanofibras de celulose de fibras de curauá. *Cellulose*, v. 17, p. 1183–1192, 2010. DOI: 10.1007/s10570-010-9453-3.
- COSTA, F. A. et al. Bioeconomy for the Amazon: Concepts, limits, and trends for a proper definition of the tropical forest biome. 2022.

- COSTA, J. B. M. et al. Papel das microalgas na bioeconomia circular: do tratamento de resíduos à produção de biocombustíveis. *Clean Techn Environ Policy*, v. 25, p. 427–437, 2023. DOI: 10.1007/s10098-021-02149-1.
- CUTLER, D. F.; BOTHA, C. E. J.; STEVENSON, D. W. *Plant Anatomy: An Applied Approach*. Oxford: Blackwell Publishing, 2011.
- DEFOIRDT, S. et al. Assessment of the tensile properties of coir, bamboo, and jute fibre composites. *Composites Part A*, v. 41, p. 588–595, 2010.
- ELIAS, R. et al. Bifunctional heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste vegetable oil. *Applied Sciences*, v. 10, n. 3153, 2020. DOI: 10.3390/app10093153.
- EPE. *Balanco Energético Nacional*. Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>.
- FAN, M. et al. Enhancement of biodiesel synthesis from soybean oil by potassium fluoride modification of a calcium magnesium oxides catalyst. *Bioresource Technology*, v. 104, p. 447–450, 2012.
- FAROOQ, M. et al. Biodiesel production from date seed oil via eggshell-derived heterogeneous catalyst. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 132, p. 644–651, 2018.
- GARCIA, J. et al. Prediction of normalized biodiesel properties by simulation of multiple feedstock blends. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 4431–4439, 2010.
- GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 114, p. 11–32, 2016.
- GOLLAKOTA, A. R. K.; VOLLI, V.; SHU, C. M. Transesterification of waste cooking oil using pyrolysis residue supported eggshell catalyst. *Science of the Total Environment*, v. 661, p. 316–325, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.165.
- IACOVIDOU, E.; MILLWARD-HOPKINS, J. et al. A pathway to circular economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 168, p. 1279–1288, 2017.
- IWAKIRI, S.; PRATA, J. Influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados. *Floresta*, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 515–523, 2008.
- KRAHL, A. H. et al. Anatomia foliar de *Ananas lucidus* Mill. (Bromeliaceae). *Natureza online*, v. 11, n. 4, p. 161-165, 2013.

LEÃO, A. L. et al. O uso de fibras de curauá como reforço em compósitos. In: *Reforços de Biofibras em Materiais Compósitos*. p. 700-720, 2015. DOI: 10.1533/9781782421276.5.700.

IEDER, M.; RASHID, A. Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 115, p. 36–51, 2016.

LOUREIRO, V. R. Amazônia: modelos econômicos e paradigmas tecnológicos. *Revista de Estudos Amazônicos*, v. 14, n. 2, p. 45–68, 2022.

MACHADO, M. P. et al. Micropropagação de plantas: avanços e aplicações. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 7, n. 2, p. 205–214, 2009.

SANTOS, A. F. et al. Cultura de tecidos vegetais: fundamentos e aplicações. *Ciência Rural*, v. 35, n. 4, p. 1029–1036, 2005.

MADEN, B.; GAMSTEDT, K. Composite materials from natural fibers: sustainability and performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 44, n. 5, p. 1–10, 2013.

MATOSKI, A. et al. Wood cellulose fiber-reinforced composites for construction applications. *Materials Research*, v. 16, n. 3, p. 635–642, 2013. DOI: 10.1590/S1516-14392013005000045.

MCTIC; CGEE. *Relatório de Ciência, Tecnologia e Inovação no Brasil: indicadores 2021*. Brasília: CGEE, 2021.

MESQUITA, R.; BARRETO, P. Políticas públicas e desenvolvimento sustentável na Amazônia. *Revista de Estudos Amazônicos*, v. 11, n. 2, p. 55–72, 2015.

MONTEIRO, S. N.; ALMEIDA, J. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. v. 11, n. 3, p. 197–203, 2006.

MOREIRA, R. S. et al. Obtenção e caracterização de compósitos elastoméricos reforçados com fibras vegetais. *UNIFESP*, 2014.

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water system. *Wood and Fiber Science*, v. 15, n. 2, p. 164–176, 1983.

NOBRE, C. A. et al. Amazonia in peril: tipping points, bioeconomy, and sustainable pathways. *Environmental Research Letters*, v. 18, n. 4, p. 045001, 2023. DOI: 10.1088/1748-9326/acbf3f.

OLIVEIRA, E. C. P.; VIEIRA, J. Influência de fatores climáticos e edáficos no rendimento da fibra por hectare. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 3, 2008.

PAM/IBGE. *Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes 2018*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>.

PAULA, L. E. de et al. Produção e caracterização de painéis de partículas aglomeradas com resíduos de processamento de madeira. *Revista Árvore*, v. 33, n. 3, p. 531–540, 2009.

RAMAMOORTHY, S. K.; SKRIFVARS, M.; PERSSON, A. Uma revisão das fibras naturais usadas em biocompósitos: fibras de plantas, animais e células regeneradas. *Polymer Reviews*, v. 55, n. 1, p. 107–162, 2015. DOI: 10.1080/15583724.2014.971124.

REIS, M. C. et al. Produção de biodiesel a partir de ácidos graxos de óleos vegetais refinados por catálise ácida heterogênea e irradiação por micro-ondas. *Química Nova*, 2015. DOI: 10.5935/0100-4042.20150163.

ROMEIRO, A. R. *Economia e meio ambiente: teoria e prática*. Campinas: Editora da Unicamp, 1998.

COSTA, F. A.; FERNANDES, A. C. Bioeconomia e sustentabilidade na Amazônia: desafios e perspectivas. *Revista de Desenvolvimento Regional*, v. 12, n. 1, p. 45–62, 2016.

SÁ, M. C. et al. Natural fiber polymer composites: use of wood residues and other lignocellulosic materials. *Materials Research*, v. 13, n. 2, p. 201–206, 2010. DOI: 10.1590/S1516-14392010000200015.

SEYDIBEYOGLU, M. O.; OKSMAN, K. Novel nanocomposites based on polyurethane and cellulose whiskers. *Composites Science and Technology*, v. 68, n. 3–4, p. 908–914, 2008. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.08.005.

HABIBI, Y.; LUCIA, L. A.; ROJAS, O. J. Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, v. 110, n. 6, p. 3479–3500, 2010. DOI: 10.1021/cr900339w.

SHEEHAN, J. et al. *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus*. Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy, 1998. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24089.pdf> ([nrel.gov](https://www.nrel.gov) in Bing).

SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F.; RODRIGUES, L. P. S.; BARROS, A. R. F. Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. *Matéria*, v. 13, n. 1, p. 154–161, 2008.

TRINDADE, W.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T. H. D. *Characterization of lignocellulosic fibers from Brazil and their potential as reinforcement in polymer composites*. *Materia*, v. 13, n. 2, p. 385–393, 2008.

VAKROS, J. *Natural fibers, and their applications in polymer composites: a review*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 37, n. 18, p. 1125–1138, 2018. DOI: 10.1177/0731684418781234.

VELA, J.; MARTÍNEZ, A.; GARCÍA, P.; LÓPEZ, R. *Natural fibre biocomposites: properties, applications, and future perspectives*. Fibers, v. 8, n. 4, p. 45–60, 2020.

ZAH, R.; HILTY, L. M.; LEHMANN, M.; WEGMANN, A. *Life cycle assessment of energy products: environmental assessment of biofuels*. Environmental Science & Technology, v. 41, n. 19, p. 6745–6752, 2007. DOI: 10.1021/es070318d.