



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
ESCOLA DE AGRONOMIA (EA)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
(PPGCTA)

GRACIELI DE MIRANDA MONTEIRO

Valorização de resíduos de frutos de *Dipteryx Alata Vogel* para aplicação tecnológica em alimentos: estudo de extratos bioativos e filmes nanoestruturados

GOIÂNIA
2024

Processo: 23070.062565/2024-38 Documento: 5023986



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES
E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Gracieli de Miranda Monteiro

3. Título do trabalho

Valorização de resíduos de frutos de *Dipteryx alata* Vogel para aplicação tecnológica em alimentos: estudo de extratos bioativos e filmes nanoestruturados

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por Gracieli De Miranda Monteiro, Discente, em 12/12/2024, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Eduardo Valério de Barros Vilas Boas, Usuário Externo, em 27/12/2024, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 5023986 e o código CRC 12E2ADA5.

GRACIELI DE MIRANDA MONTEIRO

Valorização de resíduos de frutos de *Dipteryx Alata* Vogel para aplicação tecnológica em alimentos: estudo de extratos bioativos e filmes nanoestruturados

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para a obtenção do título de Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Linha de Pesquisa: Caracterização, aproveitamento e/ou tratamento de resíduos e/ou co-produtos agroindustriais.

Orientador(a): Professor(a) Doutor(a) Eduardo Valério de Barros Vilas Boas.

Coorientador(a): Professor(a) Doutor(a) Elisângela Elena Nunes Carvalho.

Coorientador(a): Professor(a) Doutor(a) Rafael Carvalho do Lago.

GOIÂNIA
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Monteiro, Gracieli de Miranda

Valorização de Resíduos de Frutos de *Dipteryx Alata* Vogel para aplicação tecnológica em alimentos: [manuscrito] : estudo de extratos bioativos e filmes nanoestruturados / Gracieli de Miranda Monteiro. - 2024.

CLXVII, 167 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Valério de Barros Vilas Boas; co orientadora Dra. Elisângela Elena Nunes Carvalho; co-orientador Dr. Rafael Carvalho do Lago.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Goiânia, 2024.

Apêndice.

Inclui gráfico, tabelas.

1. Subprodutos Agroindustriais. 2. Compostos bioativos. 3. Nanofibrilas. 4. Embalagens Biodegradáveis. 5. Sustentabilidade. I. Vilas Boas, Eduardo Valério de Barros, orient. II. Título.

CDU 664



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 212 da sessão de Defesa de Tese de **Gracieli de Miranda Monteiro** que confere o título de **Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos**, na área de concentração em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Aos nove dias do mês de dezembro de dois mil e vinte e quatro, a partir das oito horas, via videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada "REAPROVEITAMENTO DA POLPA E ENDOCARPO DO BARU PARA APLICAÇÃO TECNOLÓGICA EM ALIMENTOS". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Doutor Eduardo Valério de Barros Vilas Boas (PPGCTA/UFG), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Doutor Gustavo Henrique Dezin Tonoli (UFLA/DCF), membro titular externo; Doutor Adriano Reis Prazeres Mascarenhas (UNIR/DAEF), membro titular externo; Doutor Josemar Gonçalves de Oliveira Filho (EMBRAPA), membro titular externo e Doutora Hanna Elisia Araújo de Barros (EA/FAM), membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido a candidata aprovada pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Valorização de resíduos de frutos de *Dipteryx alata* Vogel para aplicação tecnológica em alimentos: estudo de extratos bioativos e filmes nanoestruturados



Documento assinado eletronicamente por **Hanna Elisia Araújo de Barros, Usuário Externo**, em 10/12/2024, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Valério de Barros Vilas Boas, Usuário Externo**, em 10/12/2024, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **gustavo henrique denzin tonoli, Usuário Externo**, em 10/12/2024, às 13:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 5029708 e o código CRC 48C5FA59.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, o doador da vida, por me conceder a oportunidade de realizar este sonho e poder chegar ao título de “Doutora”

Esse sonho começou em meu coração e, com minha aprovação no processo seletivo do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás (UFG) em 2021, ganhou vida. Minha querida família — meu marido, Wanderson, e meus filhos, Sara e Arthur, que à época tinham apenas 3 e 2 anos, respectivamente — abraçaram este sonho comigo. Foram compreensivos e resilientes diante de minhas ausências e da intensa dedicação ao doutorado.

Minha gratidão se estende especialmente a minha mãe, Ivani Miranda, que em 2022 decidiu, sem hesitar, mudar-se de Campo Grande (MS) para Lavras (MG) junto comigo e minha família, possibilitando que eu realizasse o doutorado sanduíche na Universidade Federal de Lavras (UFLA). Seu apoio constante, e presença ao longo dessa jornada foram fundamentais até o término, em 2024. Ao meu pai pela compreensão e por nos visitar durante esse período.

Às instituições de ensino que estiveram comigo, meu sincero agradecimento: ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais (IFNMG), no qual atuo como servidora, por permitir minha qualificação profissional; à UFG, pela oportunidade que confiou em meu potencial, mesmo quando meu currículo não parecia ideal para uma dedicação acadêmica em tempo integral; e à UFLA, que me acolheu como uma “filha adotiva”, com muito carinho e apoio técnico de vários servidores, departamentos, inclusive alunos.

Agradeço especialmente à equipe de Pós-Colheita de Frutas e Hortaliças da UFLA, liderada pelo professor Dr. Eduardo Valério de Barros Vilas Boas, que generosamente orientou esta tese. Ao professor Dr. Rafael Lago, meu coorientador, que me apresentou à equipe de Nanotecnologia, do qual é coordenada pelo professor Dr. Gustavo Henrique Tonoli, cuja expertise e suporte técnico foram essenciais para a realização das análises e para que eu pudesse desbravar este tema desafiador.

Sou também grata aos amigos de longa data, aos novos amigos que encontrei nesta jornada, aos professores que permitiram o uso de seus laboratórios, aos servidores, laboratoristas, pós-doutorandos e à dedicada equipe de limpeza da UFLA, sempre tão atenciosa e prestativa.

A cada um, meu muito obrigada!

Encerro esta trajetória com o coração cheio de gratidão por tudo o que vivi e aprendi. Sou grata pela nova Gracieli que surgiu ao longo desse processo, transformada por uma imersão profunda em desafios que apenas quem percorreu uma jornada tão provocadora e intensa pode entender.

RESUMO

A crescente preocupação ambiental e a busca por materiais sustentáveis motivaram este estudo, cujo objetivo foi explorar o potencial dos resíduos do baru na produção de filmes biodegradáveis ativos à base de amido, reforçados com nanocelulose e extrato vegetal do próprio fruto. A pesquisa avaliou as propriedades bioativas e químicas da polpa e endocarpo do baru, destacando suas aplicações em embalagens sustentáveis. A polpa de baru apresentou elevada concentração de compostos bioativos, com destaque para a trigonelina (139,10 mg 100 g⁻¹), taninos (429,16 mg TE 100 g⁻¹) e os ácidos fenólicos *trans*-cinâmico (5,91 mg 100 g⁻¹) e quercetina (5,98 mg 100 g⁻¹). Sesquiterpenos industrialmente relevantes, amplamente utilizados em óleos essenciais, compuseram 82,05% do perfil volátil da polpa, sendo α -copaeno e biciclogermacreno os principais. Este perfil volátil confere à polpa um aroma predominantemente amadeirado com nuances herbais, o que amplia suas possibilidades de aplicação em fragrâncias. Paralelamente, o endocarpo foi aproveitado para a obtenção de micro e nanofibrilas lignocelulósicas (LCMNF) por pré-tratamento alcalino e refino mecânico, que foram incorporadas na formulação dos filmes. Os filmes foram preparados utilizando amido de milho como matriz polimérica, reforçada com LCMNF e extrato hidroalcoólico da polpa de baru como fonte de compostos bioativos e antioxidantes. Os filmes ACE6, como maior concentração de extrato, exibiram alto teor de fenólicos totais (521,78 mg GAE/g) e maior capacidade antioxidante nos ensaios fosfomolibdênio (81,7 mg AAE/g) e DPPH (24%). Esse aumento na concentração de extrato reduziu a hidrofobicidade dos filmes (ângulo de contato de 79,58° no ACE6), além de comprometer a resistência à tração (26,34 MPa) e a barreira ao vapor d'água (TPVA de 178,61 g/m²·dia). A combinação das micro/nanofibrilas lignocelulósicas e extrato de baru na matriz de amido promoveu melhorias na termoestabilidade e na funcionalidade estrutural dos filmes, confirmado por termogravimetria (TGA) e espectroscopia Raman. Os resultados indicam que os filmes desenvolvidos possuem potencial como revestimentos antioxidantes para embalagens alimentícias. A valorização dos subprodutos do baru é uma abordagem sustentável e inovadora, promovendo a utilização integral dos resíduos do fruto. Essa pesquisa reforça a viabilidade comercial e ecológica do baru, contribuindo para tecnologias ecoeficientes no setor alimentício.

Palavras Chave: Subprodutos Agroindustriais, Compostos Bioativos, Nanotecnologia, Micro/Nanofibrilas lignocelulósicas, Embalagens Biodegradáveis, Sustentabilidade.

VALORIZATION OF DIPTERYX ALATA VOGEL FRUIT RESIDUES FOR TECHNOLOGICAL APPLICATIONS IN FOOD: A STUDY OF BIOACTIVE EXTRACTS AND NANOSTRUCTURED FILMS

ABSTRACT

The growing environmental concerns and the pursuit of sustainable materials motivated this study, which aimed to explore the potential of *baru* residues in the production of active biodegradable starch-based films reinforced with nanocellulose and plant extract derived from the fruit itself. The research evaluated the bioactive and chemical properties of the *baru* pulp and endocarp, highlighting their applications in sustainable packaging. The *baru* pulp exhibited a high concentration of bioactive compounds, notably trigonelline (139.10 mg 100 g⁻¹), tannins (429.16 mg TE 100 g⁻¹), and the phenolic acids trans-cinnamic (5.91 mg 100 g⁻¹) and quercetin (5.98 mg 100 g⁻¹). Industrially relevant sesquiterpenes, widely used in essential oils, composed 82.05% of the pulp's volatile profile, with α -copaene and bicyclogermacrene as the main components. This volatile profile gives the pulp a predominantly woody aroma with herbal nuances, broadening its potential applications in fragrances. In parallel, the *baru* endocarp was utilized to obtain lignocellulosic micro- and nanofibrils (LCMNF) through alkaline pretreatment and mechanical refining, which were incorporated into the film formulations. The films were prepared using corn starch as the polymeric matrix, reinforced with LCMNF and hydroalcoholic extract of *baru* pulp as a source of bioactive and antioxidant compounds. The ACE6 films, with the highest extract concentration, exhibited a high total phenolic content (521.78 mg GAE/g) and enhanced antioxidant capacity in the phosphomolybdenum (81.7 mg AAE/g) and DPPH (24%) assays. This increase in extract concentration reduced the films' hydrophilicity (contact angle of 79.58° in ACE6), but compromised tensile strength (26.34 MPa) and water vapor permeability (WVP of 178.61 g/m²·day). The combination of lignocellulosic micro-/nanofibrils and *baru* extract in the starch matrix improved the films' thermal stability and structural functionality, as confirmed by thermogravimetric analysis (TGA) and Raman spectroscopy. The results indicate that the developed films have potential as antioxidant coatings for food packaging. The valorization of *baru* byproducts represents a sustainable and innovative approach, promoting the integral use of fruit residues. This research reinforces the commercial and ecological viability of *baru*, contributing to eco-efficient technologies in the food sector.

Keywords: Agro-industrial Byproducts, Bioactive Compounds, Nanotechnology, Lignocellulosic Micro/Nanofibrils, Biodegradable Packaging, Sustainability.

SUMÁRIO

	RESUMO	VIII
	ABSTRACT	IX
	SUMÁRIO	X
	CAPÍTULO 1	01
1	INTRODUÇÃO	01
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	02
2.1	Características e panorama de pesquisas com o Baru (<i>Dipteryx alata</i> Vogel)	02
2.2	Polissacarídeos	03
2.2.1	Amido	04
2.2.2	Celulose	07
2.2.2 .1	Nanocelulose	10
2.3	Embalagens Biodegradáveis	14
2,4	Definições e conceitos relacionados à resíduos agroindústrias, sustentabilidade e economia circular.....	17
2.5	Compostos Bioativos	19
2.5.1	Compostos Fenólicos	21
2.5.2	Alcaloides	23
2.5.3	Terpenos	26
3	OBJETIVO GERAL	28
3.1	Objetivos Específicos	28
	REFERÊNCIAS	29
4	CAPÍTULO 2	47
4.1	Artigo 1 - Baru (<i>Dipteryx alata</i> Vogel): Fruto ou Amêndoa? Uma Revisão da Aplicabilidade para Ciência e Tecnologia de Alimentos.	47
5	CAPÍTULO 3	73
5.1	Artigo 2 – Análise composicional da polpa do baru (<i>Dipteryx Alata</i> Vogel) destacando seu potencial industrial.....	73
6	CAPÍTULO 4	101
6.1	Artigo 3 –Resíduos Agroindustriais de baru como matéria-prima para obtenção de filmes biodegradáveis ativos e nanoestruturados	101
6.2	APÊNDICES DO CAPÍTULO 4	146
7	CONCLUSÃO DA TESE.....	149
8	PERSPECTIVAS E SUGESTÃO PARA FUTURAS PESQUISAS	150

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de embalagens plásticas derivadas de polímeros sintéticos, especialmente aqueles oriundos de petróleo, tem gerado sérios impactos ambientais. Estes materiais, amplamente utilizados na indústria alimentícia e outras áreas, apresentam baixa biodegradabilidade e contribuem significativamente para o acúmulo de resíduos no ambiente, levando à contaminação de ecossistemas e agravamento das mudanças climáticas (KUMAR et al., 2023; RASHEED et al., 2024). Este cenário de crescente poluição exige a busca por alternativas sustentáveis, com destaque para as embalagens biodegradáveis que, além de contribuir para a redução de resíduos, apresentam uma oportunidade de utilização de fontes renováveis e de baixo impacto ambiental (MORCILLO-MARTÍN et al., 2023; BANGAR & WHITESIDE, 2021).

Entre as alternativas mais promissoras estão os biopolímeros, derivados de fontes naturais e renováveis, que apresentam características como biodegradabilidade, baixo custo e disponibilidade abundante. A celulose, por exemplo, tem sido amplamente estudada como matéria-prima para a produção de embalagens biodegradáveis, dada a sua resistência mecânica e biocompatibilidade, além de ser uma fonte abundante proveniente de resíduos agroindustriais, como os resíduos lignocelulósicos (GARRIDO-ROMERO et al., 2021; GELAW et al., 2024). A produção de nanocelulose a partir desses resíduos tem sido considerada uma solução eficaz para a criação de materiais de embalagem com propriedades aprimoradas, como maior resistência mecânica e capacidade de barreira (LI et al., 202; SEKI et al., 2022).

Neste contexto, o Cerrado brasileiro, um dos biomas mais ricos em biodiversidade e fontes naturais ainda subutilizadas, representa um espaço promissor para a exploração de resíduos agroindustriais, como os provenientes do fruto do baru (*Dipteryx alata* Vogel). O baru, fruto nativo do Cerrado, tem se destacado não apenas por seu valor nutricional e comercial, mas também pelo potencial de aproveitamento de seus resíduos, como o endocarpo, mesocarpo e epicarpo, para a produção de biopolímeros e compostos bioativos com aplicações na indústria alimentícia, farmacêutica e de embalagens (MONTEIRO et al., 2022, OLVEIRA et al., 2024).

O reaproveitamento desses resíduos para a produção de filmes biodegradáveis reforçados com nanocelulose representa uma alternativa sustentável, contribuindo para a economia circular e para a redução dos impactos ambientais (PATEIRO et al., 2023; PARRA-PACHECO et al., 2024). A utilização dos resíduos do baru na produção de materiais

sustentáveis pode agregar valor à cadeia produtiva da castanha, impulsionando o desenvolvimento econômico local e promovendo a preservação do Cerrado (ALVES-SANTOS et al., 2023; MONTEIRO et al., 2022).

A economia circular, conceito em expansão no cenário global, busca transformar resíduos em recursos valiosos, promovendo a reciclagem, a reutilização e a regeneração de materiais. No setor de embalagens, a economia circular oferece soluções inovadoras que podem transformar a indústria ao reduzir o uso de materiais não renováveis e a emissão de poluentes, ao mesmo tempo que promove a utilização eficiente dos recursos naturais (GEISSDOERFER et al., 2017; CUSTÓDIO et al., 2024). A implementação de práticas de economia circular, com foco na valorização de resíduos agroindustriais, representa uma oportunidade estratégica para a indústria de embalagens, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e promovendo uma produção mais limpa e eficiente.

Este estudo visa explorar o potencial dos resíduos do baru para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis ativas, com foco na produção de filmes de amido reforçados com nanocelulose incorporados com extrato vegetal do baru. A pesquisa investiga as propriedades bioativas dos resíduos do baru, sua composição química e as possíveis aplicações desses materiais na indústria de embalagens sustentáveis, contribuindo para a promoção de práticas industriais mais responsáveis e alinhadas aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Características e panorama de pesquisas com o Baru (*Diepteryx alata* Vogel)

O baruzeiro e seu fruto, o baru, *têm* maior probabilidade de serem conhecidos pelos residentes dos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Distrito Federal. No entanto, eles podem ser encontrados em estados como São Paulo, Tocantins, Maranhão, Pará, Rondônia, Bahia e Piauí, sob o nome científico de *Diepteryx alata* Vogel (MONTEIRO et al., 2022).

Para compreender melhor o contexto e a importância desse fruto, foi realizado um levantamento bibliográfico abrangendo cerca de 44 artigos no período de 2015 a 2021. Esse artigo foi publicado na revista *Food Chemistry Advance*, e teve como objetivo contribuir para

o referencial teórico sobre o fruto baru, sendo assim incluído como parte do Capítulo 2 dessa tese.

2.2 Polissacarídeos

Os polissacarídeos, macromoléculas formadas por uma cadeia de monossacarídeos, têm despertado grande interesse na comunidade científica devido ao seu potencial como biomateriais versáteis e promissores. Sua versatilidade e propriedades únicas têm despertado interesse em diversas áreas, incluindo biomateriais, medicina, indústria cosmética e inovações na indústria alimentícia, destacando-se como ferramenta indispensável nas práticas industriais contemporâneas. Além disso, a disponibilidade, a biodegradabilidade e a biodisponibilidade dos polissacarídeos têm contribuído para a sua crescente utilização e aceitação no meio científico (GAIKWAD; SUTAR; PATIL, 2024; LUO et al., 2021).

Essas macromoléculas são consideradas polímeros de monossacarídeos unidos por ligações glicosídicas. O grau de polimerização (DP) e, conseqüentemente, a massa molecular dos polissacarídeos pode variar com peso molecular, onde a celulose com DPs (10.000 -15.000) apresenta-se bem menor que DPs da amilopectina (> 60.000) (VELVIZHI et al., 2022). Estima-se que mais de 90% da massa de carboidratos na natureza esteja na forma de polissacarídeos (DAMODARAN & PARKIN, 2017).

Os polissacarídeos estão amplamente distribuídos em animais, plantas, fungos e microrganismos, apresentando função estrutural ou de armazenamento. Em relação a sua estrutura, eles podem ser lineares (celulose e amilose) ou altamente ramificado (amilopectina) (DAMODARAN & PARKIN, 2017).

A maioria dos polissacarídeos contém unidades glicosil que possuem em média três grupos hidroxila livres, permitindo a formação de ligações de hidrogênio com moléculas de água. Isso confere aos polissacarídeos uma alta afinidade pela água, levando uma capacidade de absorção, inchaço e dissolução em sistemas aquosos (DAMODARAN & PARKIN, 2017). No entanto, essa é uma das características limitantes de sua aplicação em diferentes áreas, o que tem despertado o interesse em estudos para aprimorar as estruturas e funções dos polissacarídeos (LUO et al., 2021).

A bioatividade e as propriedades físico-químicas dos polissacarídeos estão intimamente ligadas à sua estrutura molecular. A modificação química desses compostos pode levar a alterações em sua composição de monossacarídeos, peso molecular, estrutura espacial e tipos

de substituintes, resultando em um aumento da sua atividade. Portanto, a modificação estrutural dos polissacarídeos é essencial para superar eventuais limitações e melhorar suas propriedades (GAIKWAD; SUTAR; PATIL, 2024;; LUO et al., 2021).

As modificações cuidadosas nas estruturas dos polissacarídeos têm o potencial de adicionar grupos funcionais, alterar propriedades físico-químicas e expandir o uso desses biomateriais na medicina, alimentos, cosméticos e outras áreas (GAIKWAD; SUTAR; PATIL, 2024;., 2024; LUO et al., 2021). Assim, a pesquisa sobre modificações em polissacarídeos é fundamental para explorar todo o potencial desses compostos e ampliar suas aplicações em diversos setores.

2.2.1 Amido

O amido é o principal carboidrato de reserva da natureza, e em relação à abundância, é superado apenas pela celulose (TAIZ et al., 2017; . ZHU et al., 2021). Considerado como fonte primária de energia, o amido é responsável por aproximadamente 70 a 80% das calorias consumidas pelos humanos, desempenhando importante papel na alimentação humana (BANGAR et al., 2024; DAMODARAN & PARKIN, 2017)). Além das propriedades nutricionais, o amido é utilizado em diversas aplicações industriais (. ZHU et al., 2021).

Esse biopolímero complexo é formado a partir de monossacarídeos de glicose, sendo constituído por dois polissacarídeos distintos: a amilose conhecida por sua linearidade, enquanto a amilopectina é ramificada. Juntos constituem uma estrutura semicristalina, conhecida como grânulo de amido (. ZHU et al., 2021). As propriedades funcionais e a utilidade do amido variam de acordo com sua fonte e estrutura (BANGAR et al., 2024; TAIZ et al., 2017).

Os grânulos de amido são únicos no grupo dos carboidratos, apresentam-se em estruturas organizadas em camadas semicristalinas e amorfas, sendo que as unidades cristalinas estão inseridas em uma matriz amorfa. Tanto o grau de cristalinidade quanto o teor de água estrutural presente no amido desempenham papel fundamental em suas propriedades e possíveis modificações (DAMODARAN & PARKIN, 2017; TAIZ et al., 2017; . ZHU et al., 2021).

As fontes convencionais de amido, tais como milho e trigo, e tubérculos, como batata e mandioca, têm sido tradicionalmente exploradas comercialmente. Essas fontes possuem diversas aplicações na indústria alimentícia, atuando como aditivos alimentares com diferentes funções, tais como aglutinante, turvante, polvilhante, formador de filme, fortificante de espuma,

gelificante, vitrificante, retentor de umidade, estabilizante, texturizante e espessante (DAMODARAN & PARKIN, 2017).

No entanto, com os avanços na ciência e as mudanças no mercado, as propriedades do amido e suas aplicações têm passado por significativas transformações. O amido agora é utilizado não só na indústria alimentícia, mas também em outros setores, como o farmacêutico, têxtil e de papéis. Suas aplicações incluem a produção de produtos adesivos para madeira, papéis e medicamentos, a substituição de carne, a impressão tridimensional de alimentos, o uso como prebiótico, em encapsulamento, na produção de filmes biodegradáveis e comestíveis, entre outros (ADEWALE et al., 2022; NCBI, 2024a; RASHWAN et al., 2024).

O amido se destaca como material verde dentro das tendências de inovações impulsionada pela demanda por embalagens sustentáveis (BANGAR & WHITESIDE, 2021). De acordo com Rashwan et al. (2024), os atributos notáveis do amido como renovabilidade, biodegradabilidade e baixo custo, posicionam o amido como um recurso valioso em diversos estudos recentes. No entanto, apesar das vantagens do amido em relação aos plásticos não biodegradáveis, os filmes de amido ainda apresentam algumas limitações mecânicas, como baixa elasticidade e alta permeabilidade (GARUTI et al., 2024).

Os polímeros à base de amido apresentam características como segurança, transparência, são inodoros e apresentam permeabilidade à umidade, oxigênio, dióxido de carbono e aromatizantes. No entanto, as propriedades físico-químicas e funcionais do amido podem não ser completamente adequadas para diversas aplicações industriais, o que restringe seu uso (BANGAR et al., 2024; BANGAR & WHITESIDE, 2021). É necessário melhorar as propriedades mecânicas e funcionais desses materiais para ampliar sua aplicabilidade em diferentes setores industriais.

Diante das dificuldades no processamento dos filmes de amido e da necessidade de melhorar suas propriedades para aplicações industriais, pesquisadores têm se dedicado a modificar o amido e adicionar reforços à matriz desses filmes. Essas modificações visam aumentar a resistência mecânica e reduzir a fragilidade dos filmes de amido, tornando-os mais adequados para várias finalidades (ADEWALE et al., 2022; BANGAR et al., 2024; GARUTI et al., 2024).

O reforço com nano cargas de celulose para polímeros à base de amido tem se mostrado uma alternativa promissora, principalmente com os avanços nos nanocompósitos de polímeros. As nanofibras de celulose promovem a formação de pontes de hidrogênio entre os grupos hidroxila do polímero, aumentando a afinidade pelas moléculas de amido e reduzindo sua solubilidade. Isso tem contribuído para melhorar a resistência mecânica, permeabilidade aos

gases e propriedades de barreira à água dos filmes de amido, consolidando-os como uma opção viável para diversas aplicações industriais (BANGAR & WHITESIDE, 2021; GARUTI et al., 2024; Oliveira et al., 2023).

A busca por filmes biodegradáveis produzidos a partir de amido e nanocelulose emerge como uma tendência tanto na academia quanto na indústria, refletindo a preocupação com a sustentabilidade e a busca por alternativas mais eco-friendly.

Uma análise breve em uma das principais bases acadêmicas revela a vasta produção de pesquisas sobre o uso de amido e nanocelulose. A busca realizada na base de dados acadêmicos "Web of Science" - (<https://www.webofscience.com/wos/>) resultou em cerca de 9 mil artigos relacionados aos termos "starch" e "films". Esse levantamento abrange o período de 1946 a 2024.

No que diz respeito especificamente às publicações sobre filmes de amido, observa-se que até meados dos anos 90, o número de artigos indexados anualmente não ultrapassava 2. A partir de 2005, houve um significativo aumento nesse número, chegando a 89 publicações. Nos últimos cinco anos, a quantidade de artigos sobre a temática aumentou exponencialmente, totalizando mais de 4 mil publicações (Figura 1).

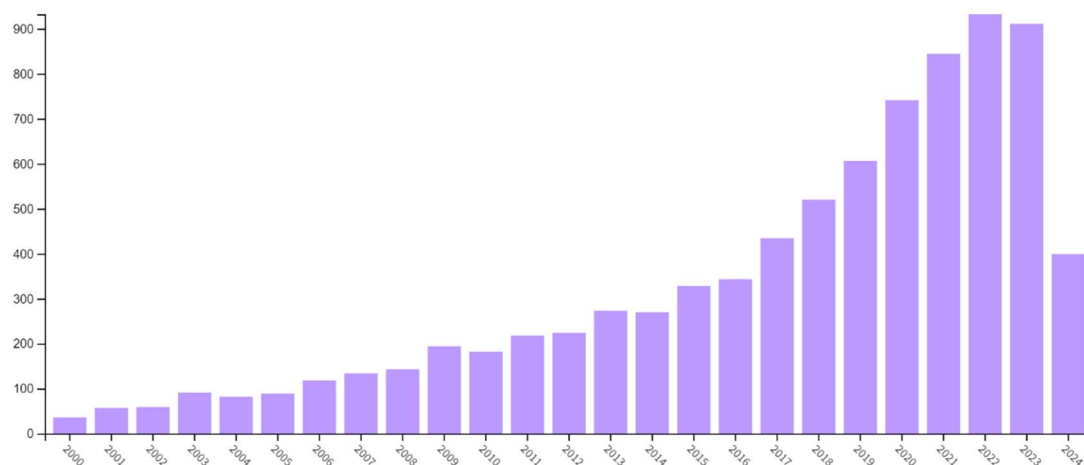


Figura.1. Gráfico de barras gerado no Web of Science sobre publicações com os termos “starch” and “films”

Ao incluir o termo "nanocellulose", na mesma pesquisa, notou-se um significativo aumento no número de artigos disponíveis. Em 2006, foram indexadas 119 publicações relacionadas ao tema. No entanto, foi a partir do ano de 2017 que um crescimento exponencial foi observado, com mais de 1 mil publicações sobre filmes de amido com nanocelulose. Nos

últimos cinco anos, o número de publicações sobre o assunto ultrapassou as 10,5 mil, conforme pode ser visualizado na Figura 2. Esses dados evidenciam o interesse crescente da comunidade científica em explorar as possibilidades e aplicações da nanocelulose.

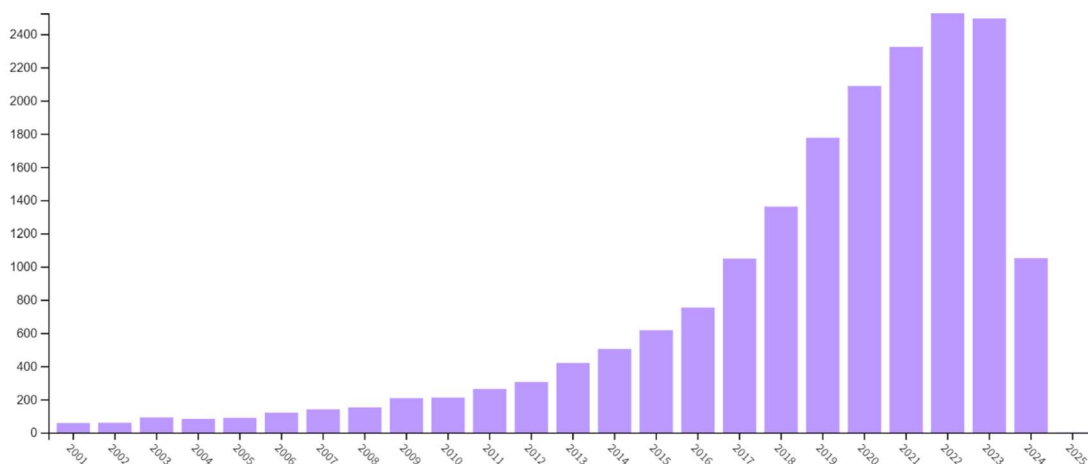


Figura.2. Gráfico de barras gerado no Web of Science sobre publicações com os termos “starch”, “films” and “nanocellulose”.

Portanto, é evidente o crescente interesse e relevância do tema, refletido na quantidade expressiva de pesquisas publicadas recentemente. Este panorama evidencia a importância crescente de estudos envolvendo a utilização de amido e nanocelulose em diversas aplicações, destacando a relevância de investigações nesse campo.

2.2.2 Celulose

A celulose é um polímero de carboidratos amplamente encontrado na natureza, sendo o principal composto estrutural das plantas. Ela constitui a parede celular de plantas, resíduos agrícolas e biomassas lignocelulósicas (ČOLÍĆ et al., 2020; SILVA et al., 2023a; VELVIZHI et al., 2022).

Polissacarídeo de longa ramificação linear, produzido a partir de monômeros repetidos de D-anidro glicose (AGU) ligados por ligações β - 1,4 (Figura. 3). Essas unidades formam uma cadeia linear, estereorregular e semicristalina resultando na formação de cristalitos separados por regiões amorfas. Esses cristalitos e demais características estruturais e químicas da celulose conferem a ela propriedades únicas, como resistência mecânica e biocompatibilidade, que a tornam um material de grande interesse em diversas áreas industriais

(BANGAR & WHITESIDE, 2021; GELAW et al., 2024; JIANG & NGAI, 2022; VELVIZHI et al., 2022).

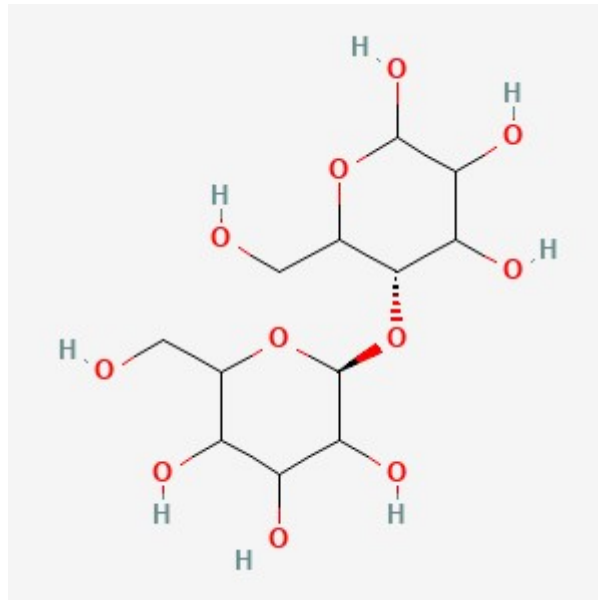


Figura 3. Estrutura química da celulose.

Fonte: [NCBI](#) (2024b).

Segundo a *National Center for Biotechnology Information* (NCBI), a celulose é a principal fibra encontrada nos tecidos vegetais da madeira, algodão, linho e gramíneas. A composição da parede celular pode variar de acordo com a planta de origem, influenciando diretamente nas propriedades da celulose. Suas propriedades técnicas são determinadas pela resistência e flexibilidade de suas fibras, sendo insolúvel em água e solúvel em ácido sulfúrico e cloreto de zinco concentrado por meio de degradação química (JIANG & NGAI, 2022; NCBI, 2024b).

As fibras de celulose nativas, da parede celular vegetal, possuem uma estrutura complexa, onde as camadas são compostas de microfibrilas, microfibrilas e fibrilas elementares mais finas, de fora para dentro. Todas as celulosas nativas estão organizadas em fibrilas elementares, que representam a associação de moléculas de celulose e contêm regiões cristalinas e amorfas (JIANG & NGAI, 2022; SEKI et al., 2022). As fibrilas elementares apresentam cerca de 3,6 nm de espessura e são compostas por 36 cadeias de glicose individuais unidas por fortes ligações de hidrogênio inter e intrafibrilares, além das forças de Van der Waals (GELAW et al., 2024; KHARE et al., 2020). Os grupos hidroxila e sua capacidade de formar ligações de hidrogênio desempenham um papel importante no direcionamento do

empacotamento cristalino e também governam as propriedades físicas da celulose (ZHAO et al., 2019).

As fibrilas elementares agregam-se em uma matriz que inclui hemiceluloses, lignina, pectina e minerais, em um padrão hierárquico, formando feixes de celulose ou microfibrilas, depositados como componente estrutural da parede celular, que variam em micrômetros de diâmetro (JIANG & NGAI, 2022; KHARE et al., 2020).

A celulose é um composto químico amplamente reconhecido na área química, com registro de CAS 9004-34-6 e PubChem CID (1611032), sendo um biopolímero constituído por fibras brancas e inodoras, com densidade de 1,5 g/cm³. Seu processo de obtenção padrão envolve o tratamento de algodão com solvente orgânico e remoção dos ácidos pécnicos por extração com solução de hidróxido de sódio (MNASRI et al., 2022; NCBI, 2024b).

Por suas propriedades intrínsecas, como fonte renovável, biocompatibilidade, atoxicidade, hidrofiliçidade e biodegradabilidade, a celulose tem sido amplamente estudada como matéria-prima para produção de materiais biodegradáveis (GARRIDO-ROMERO et al., 2022; SILVA et al., 2023b; VELVIZHI et al., 2022). Sua alta resistência e relação positiva com propriedades do módulo de Young fazem da celulose o material preferido em aplicações como compósitos, materiais de alto desempenho e aplicações funcionais (GELAW et al., 2024).

Em relação a aplicações, há variações desde compósitos de fibras poliméricas, filmes biodegradáveis, produtos químicos, embalagens como papéis, cartões e embalagens alimentícias (SEKI et al., 2022; SINGH et al., 2023). Também no setor alimentício pode ser utilizada como estabilizante, espessante e emulsificante (DAMODARAN & PARKIN, 2017; GAUTAM, 2024.). Na área biomédica já foi testada em comprimidos, curativos, cápsulas e géis de liberação controlada (SELVARAJ et al., 2024), além de testes em produtos de higiene, tintas e sensores (MISHRA et al., 2018; SEKI et al., 2022; VELVIZHI et al., 2022).

A origem sustentável da celulose impulsiona os esforços crescentes para sua comercialização em novas tecnologias de polímeros (BANGAR & WHITESIDE, 2021). Derivações da celulose, como micro e nanofibrilas de celulose (MCF/CNF), nanocristais de celulose, acetato de celulose, carboximetilcelulose, hidroxipropilcelulose e metilcelulose, têm sido amplamente exploradas em diversas áreas alimentícias, médicas e farmacêuticas (DAMODARAN & PARKIN, 2017; FDA, 2023; GARRIDO-ROMERO et al., 2022; GAUTAM, 2024.; SETTER et al., 2023; SILVA et al., 2023b).

Neste contexto, neste trabalho será dada maior ênfase às nanofibrilas de celulose (CNF), destacando seus potenciais benefícios e aplicações.

2.2.2.1 *Nanocelulose*

A demanda mundial pelos materiais de nanocelulose tem crescido significativamente devido às propriedades únicas e potencialmente úteis desse tipo de material. O interesse na utilização da nanocelulose tem se intensificado, impulsionado pela crescente necessidade de produtos sustentáveis no mercado global (GELAW et al., 2024; KIM & DOH, 2024).

A nanocelulose apresenta atributos como alta área superficial, proporção de aspecto adequada, comportamento reológico favorável, capacidade de absorção de água, cristalinidade e capacidade de modificação de superfície, além de apresentar baixo potencial citotóxico e genotóxico. Essas características fazem da nanocelulose um material versátil e adequado para diversas aplicações em setores como produção de alimentos, biomedicina, embalagens, entre outros (GELAW et al., 2024; KIM & DOH, 2024).

No entanto, sua produção envolve processos complexos e variados, que podem incluir desde o uso de equipamentos de alta tecnologia até métodos mais simples e de baixo custo. O controle preciso das condições de produção é fundamental para obter nanomateriais de celulose com propriedades específicas e desejadas para cada aplicação. Nesse sentido, a padronização das terminologias e conceitos relacionados aos nanomateriais de celulose, conforme definido pela ISO, é essencial para garantir a comunicação eficaz entre pesquisadores, desenvolvedores e indústrias que atuam nesse campo (ISO, 2017).

Nanomateriais de celulose (CNM), são materiais compostos predominantemente por celulose, com qualquer dimensão externa em nanoescala (faixa de comprimento aproximadamente de 1 nm a 100 nm), ou material com estrutura interna ou estrutura superficial em nanoescala, composta predominantemente por celulose. Os termos nanocelulose (NC) e nanomaterial celulósico (CNM) são sinônimos para se referir a esses materiais (ISO, 2017).

Muitas terminologias têm sido usadas para descrever a nanocelulose produzida por tratamento mecânico de materiais vegetais, muitas vezes combinado com etapas de pré-tratamento químico ou enzimático. Com base na aparência e nos métodos de preparação, a nanocelulose pode ser classificada em duas subcategorias principais, nomeadamente nanocristais de celulose (CNCs) e nanofibras de celulose (CNFs) (ISO, 2017; KARGARZADEH et al., 2018).

Os CNCs são curtos, em forma de agulha, caracterizados como “cristais rígidos”, com diâmetro em nanoescala variando de 5-50 nm, e comprimento geralmente na faixa de 100–500

nm (DESPRES et al., 2019; ISO, 2017; KARGARZADEH et al., 2018). Por outro lado, as CNFs são nanofibras longas e flexíveis com diâmetro em nanoescala (3-100 nm) e comprimento em escala de micron. As nanofibras são compostas por pelo menos uma fibrila elementar, contendo regiões cristalina, semicristalina e amorfa. Os termos celulose nanofibrilada/nanofibrila (NFC), celulose microfibrilada/microfibrilar (MFC), microfibrila de celulose (CMF) e nanofibrila de celulose (CNF), já foram utilizados para descrever essas estruturas (ISO, 2017; KARGARZADEH et al., 2018).

Um termo que vem ganhando destaque nas publicações sobre nanofibras de celulose (CNF) é a combinação com o termo celulose microfibrilada (MFC), representada como micro/nanofibrilas de celulose (MFC/CNF) (SETTER et al., 2023; SILVA et al., 2024; SILVA et al., 2023a). Essa denominação é adotada devido à complexidade de caracterizar com precisão as diversas formas de fibras celulósicas e os nanomateriais resultantes (HEWSON et al., 2024). Trabalhos como de Mascarenhas et al. (2024) propuseram o termo: micro/nanofibrilas lignocelulósicas (LCMF/LCNF) para designar nanomateriais que não são constituídos exclusivamente de celulose, apresentando lignina no material desenvolvido.

A produção de nanocelulose envolve a nanofibrilação da celulose, um processo complexo que separa e refina as microfibrilas presentes nas fibras vegetais. A eficiência da extração e as propriedades da nanocelulose resultante são afetadas pelo tipo de material de origem, os métodos de extração ou síntese e as condições de tratamento. Os diferentes tipos de material influenciam significativamente, com diferentes fontes de celulose apresentando conteúdos e estruturas distintas (KIM & DOH, 2024; SEKI et al., 2022)

As técnicas de produção de nanocelulose incluem extração de subprodutos alimentares, métodos químicos, mecânicos, enzimáticos e bacterianos, sendo que a síntese bacteriana utiliza bactérias para produzir celulose em nanoescala. A heterogeneidade das fibras vegetais deve ser considerada, pois afeta a biossíntese das microfibrilas de celulose e o processo de extração de partículas de celulose (GELAW et al., 2024; KIM & DOH, 2024; MISHRA et al., 2018).

Estudos recentes revelam que fatores críticos como tipo de material de origem da celulose, métodos de extração ou síntese e as condições ou processos pré-tratamento são fatores que podem ser ajustados, pois afetam diretamente na eficiência da extração e nas características resultantes da nanocelulose, como propriedades físico-químicas, rendimento e qualidade (HUANG et al., 2020; KARGARZADEH et al., 2018; KIM & DOH, 2024; Li et al., 2021a).

A extração e síntese da nanocelulose são procedimentos fundamentais realizados em vários processos verdes, como a homogeneização de alta pressão (HPH), a hidrólise enzimática e a sonicação (MASCARENHAS et al., 2022a). No entanto, a extração em duas etapas, com

pré-tratamento e tratamento mecânico, tem sido a abordagem mais comum adotada na maioria dos estudos (GELAW et al., 2024; KIM & DOH, 2024; SETTER et al., 2023).

O pré-tratamento é uma etapa crucial na extração de nanocelulose de subprodutos alimentares, pois as substâncias presentes na parede celular vegetal, como hemicelulose, lignina e pectina, dificultam a extração da celulose. Por isso, a remoção dessas substâncias é essencial (ABRAMSON et al., 2010; MOON et al., 2011). Essa despolimerização da parede celular é necessária para obtenção das fibras celulósicas individuais. Geralmente, são utilizadas soluções alcalinas, como hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio, para despolimerizar a estrutura da parede celular provocando seu afrouxamento. Bem como pode ser aplicado o uso do binômio tempo x temperatura elevada para otimização desse processo (KIM & DOH, 2024; XU et al., 2020).

A etapa subsequente no processo de obtenção de nanofibras de celulose consiste na extração ou segregação das fibras purificadas e homogeneizadas em constituintes microfibrilares e nanofibrilares, por meio do tratamento mecânico (KUMAR et al., 2020). Este processo mecânico envolve a fibrilação em equipamentos com discos ranhurados, resultando em mudanças irreversíveis nas fibras celulósicas (COSTA et al., 2022).

O processo mecânico é fundamental para a produção de CNF, no qual as fibrilas são isoladas pela delaminação da parede celular do resíduo sob sucessiva força mecânica. Devido ao alto consumo energético deste processo, o pré-tratamento da fibra é altamente recomendado (LIU et al., 2020; MASCARENHAS et al., 2024b).

A produção de nanocelulose envolve diversas variações, tais como fibrilação interna e externa, formação de finos e encurtamento da fibra. Esses processos resultam no aumento das capacidades de ligação devido à fibrilação interna e externa da celulose. A fibrilação interna remove camadas da parede da fibra, enquanto a fibrilação externa expõe fibrilas para melhorar a ligação entre elas. Esse processo também é responsável pelo enfraquecimento das ligações de hidrogênio intermoleculares nativas e pela formação de novas ligações de hidrogênio na região amorfa do material (COSTA et al., 2022; ZHAO et al., 2019).

A fibrilação da celulose altera algumas de suas características, resultando na formação das nanoceluloses, que apresentam uma face hidrofílica e um plano de borda hidrofóbica, tornando-as cadeias moleculares anfifílicas. Essa configuração difere da celulose nativa, que é composta por partículas hidrofílicas devido à presença de grupos hidroxila em grande quantidade (HUANG et al., 2020; LI et al., 2021).

Assim, a celulose é fibrilada para produzir nanomateriais conhecidos como nanocelulose, que possuem características distintas, como não toxicidade, alta relação superfície-volume, resistência e reciclabilidade (NADEEM et al., 2024).

As CNF, devido às suas propriedades únicas, têm sido amplamente estudadas para interagir com diversos materiais, tais como polímeros sintéticos e biopolímeros, visando o desenvolvimento de novos compósitos ou materiais capazes de substituir os convencionais. Nesse contexto, a nanocelulose pode desempenhar um papel fundamental como reforço em materiais poliméricos, contribuindo para o aumento da resistência mecânica e térmica desses materiais (DESPRES et al., 2019). O uso de CNF tem se mostrado especialmente promissor na melhoria de biocompósitos, conferindo-lhes características como alta rigidez, baixa densidade, biodegradabilidade, hidrofobicidade e afinidade com polímeros naturais (GARUTI et al., 2024).

Segundo Garuti et al. (2024), que reforçaram filmes de amido com nanocelulose, é possível observar que as propriedades dos filmes obtidos a partir da combinação de CNF com outros materiais dependem de interações específicas e técnicas de preparação adequadas. Portanto, a investigação e a otimização desses processos são essenciais para o desenvolvimento de novos materiais que possam atender às demandas atuais por soluções mais sustentáveis e eficientes.

A relevância do termo nanocelulose é amplamente discutida na literatura científica, destacando sua importância no cenário científico atual e suas aplicações promissoras no mercado global. Essa biomolécula renovável desperta interesse de pesquisadores e indústrias devido às suas propriedades únicas e potencial para contribuir com metas de desenvolvimento sustentável. A quantidade crescente de estudos publicados sobre a nanocelulose evidencia sua importância e papel fundamental nas tendências atuais da ciência e tecnologia.

Dentre as aplicações da nanocelulose na ciência e tecnologia de alimentos, as pesquisas sobre nanofibrilas de celulose (CNF) mostram diversas possibilidades, tais como estabilização de emulsões *pickering* para aplicação em alimentos (CHEVALIER et al., 2024; LI, et al., 2021a; TAN et al., 2024; ZHAO et al., 2024); preservação de frutas e hortaliças, seja in natura ou minimamente processada (GHOSH et al., 2021; VAN et al., 2023; ZHU et al., 2024); embalagens inteligentes (CHEN et al., 2021; ZHOU et al., 2023a; ZHOU et al., 2023b); embalagens ativas (BALASUBRAMANIAM et al., 2021; BALASUBRAMANIAM et al., 2022, 2023; ULLAH et al., 2023); compósito para preservação de carnes e peixes (ALI et al., 2024; BARKHORDARI et al., 2024; DAI et al., 2024; PIRVEISI et al., 2023; SUL et al., 2024); e filmes comestíveis (MORCILLO-MARTÍN et al., 2023).

Sua alta área superficial, proporção de aspecto, resistência, estabilidade térmica, propriedades reológicas e mecânicas tornam a nanocelulose um candidato ideal para novos materiais de embalagem. Além disso, a nanocelulose pode ser utilizada como ingrediente alimentar funcional, como mimético ou substituto de gordura em alimentos de baixa caloria (LI, et al., 2021).

Apesar dos avanços na nanotecnologia da celulose e de sua ampla acessibilidade como material *a priori* atóxico, estudos recentes têm questionado os possíveis efeitos adversos da celulose, especialmente na escala nano. De acordo com Ventura et al. (2020), as características físico-químicas da nanocelulose, como tamanho, carga de superfície e funcionalizações específicas, podem afetar significativamente sua concentração celular e interação biológica, potencialmente desencadeando respostas inflamatórias, imunotóxicas e genotóxicas. Embora os efeitos observados sejam geralmente menos graves que os de outras nanofibras, como os nanotubos de carbono, os resultados apontam para a necessidade de estudos adicionais, especialmente no que tange à toxicidade *in vivo* e ao impacto da exposição prolongada em seres humanos.

O próximo tópico abordará o tema embalagens biodegradáveis com uma revisão sobre o tema, abordando aspectos relacionados à sustentabilidade ambiental e suas implicações no cenário atual. A relevância das embalagens biodegradáveis no contexto da preservação do meio ambiente será explorada, destacando-se os benefícios e desafios associados a essa tecnologia.

2.3 Embalagens biodegradáveis

O uso de embalagens biodegradáveis tem se destacado nas políticas governamentais e ações de sustentabilidade das indústrias, que acompanham as mudanças no comportamento do consumidor (DO VAL SIQUEIRA et al., 2021). Isso tem se refletido no aumento do número de publicações científicas relacionadas ao tema nos últimos anos (COMBRZYŃSKI & ÖZMEN, 2021).

Existe um notável esforço acadêmico-comercial registrado desde a última década para substituir os polímeros sintéticos convencionais por biopolímeros no setor de embalagens (KUMAR et al., 2023; LAGO et al., 2021). O desenvolvimento de soluções à base de polímeros biodegradáveis para embalagens de ciclo de vida curto faz parte de uma estratégia visando

produtos mais sustentáveis e com menos desperdício (DEDIEU et al., 2022; POPA et al., 2022). A maioria das embalagens de alimentos é produzida a partir de materiais sintéticos de fontes não renováveis, como embalagens plásticas provenientes de polímeros à base de petróleo (DEDIEU et al., 2022; NOGUEIRA et al., 2020).

Os plásticos convencionais demoram dezenas de anos para serem degradados, o que os torna inadequados para aplicações com um curto período de serviço, como embalagens. A reciclagem, apesar de uma opção plausível para lidar com resíduos plásticos, não é viável devido à contaminação, presença de aditivos, co-misturas e deterioração das propriedades (GUPTA et al., 2022). Isso impulsionou esforços acadêmicos e industriais na busca de polímeros biodegradáveis alternativos, de fontes renováveis, para o desenvolvimento de materiais de embalagem (DEDIEU et al., 2022; WU et al., 2021).

As embalagens produzidas a partir de matérias-primas provenientes de fontes renováveis continuam sendo objeto de interesse devido à sua viabilidade comercial, apelo ambiental e capacidade de controle de resíduos industriais (MARYAM ADILAH, et al., 2018).

Para um material ser considerado biodegradável, é necessário satisfazer parâmetros específicos de degradação, independentemente da sua origem. Destaca-se que a origem renovável de um polímero não garante a sua biodegradabilidade, já que existem polímeros biodegradáveis derivados de fontes não renováveis, como os biopolímeros obtidos a partir de biomassa e petróleo (DEL NOBILE et al., 2009). Por exemplo, o biopolietileno derivado da cana-de-açúcar, conhecido como "polietileno verde", não é biodegradável, mas é classificado como biopolímero por emitir menos gases de efeito estufa que o polietileno comum (BARBALHO et al., 2023). No entanto, grande parte dos biopolímeros, como o amido, são biodegradáveis e podem ser decompostos por microrganismos, gerando subprodutos inofensivos como água e dióxido de carbono em condições ambientais apropriadas (OLAYIL et al., 2022).

Os biopolímeros naturais possuem características únicas, como atoxicidade, abundância na natureza, biodegradabilidade e possibilidade de se tornarem comestíveis, sendo uma alternativa atraente aos plásticos convencionais (HERNANDEZ-IZQUIERDO & KROCHTA, 2008; JAYAN, 2021; NOGUEIRA et al., 2020). No entanto, apresentam desafios como baixo desempenho em propriedades de barreira à umidade (OLAYIL et al., 2022; WU et al., 2021) e propriedades mecânicas fracas (ANDRADE et al., 2022; OLAYIL et al., 2022), além do alto custo em comparação com produtos sintéticos derivados (NIAOUNAKIS, 2015; WU et al., 2021).

Os desafios dos biopolímeros têm impulsionado a pesquisa em novos materiais de origem biológica, como nanocristais de celulose (ANDRADE et al., 2022), nanofibrilas de celulose derivadas de palha de aveia e trigo (LAGO et al., 2020; LAGO et al., 2021), pó de cânhamo (GUPTA et al., 2022), subprodutos de própolis (BERTOTTO et al., 2022) e resíduos alimentares à base de plantas (BARLETTA et al., 2020), como agentes de reforço para melhorar as propriedades das embalagens biodegradáveis.

As embalagens biodegradáveis estão impulsionando a inovação no setor de embalagens, com foco na sustentabilidade, na segurança do alimento pela eficácia na preservação dos alimentos (ABATAN et al., 2024; OLIVEIRA FILHO et al., 2023). Destacam-se as embalagens ativas e embalagens comestíveis (EPs).

As embalagens comestíveis, como filmes e revestimentos, têm potencial para melhorar a preservação dos alimentos. Os filmes comestíveis são embalagens primárias feitas de ingredientes comestíveis (KUMAR et al., 2023; RIBEIRO et al., 2024). Já os revestimentos comestíveis são camadas finas aplicadas na superfície dos alimentos, geralmente frutas e vegetais. A principal diferença entre filme e revestimento está na técnica de aplicação ao alimento. O filme é moldado primeiramente, em camadas finas utilizando técnicas específicas como casting ou extrusão, e depois de seco pode ser aplicado no alimento (OTONI et al., 2017). Ele pode também ser usado na fabricação de embalagens diversas. Já o revestimento é formado diretamente na superfície do alimento por técnicas como imersão, pulverização ou revestimento manual (MORCILLO-MARTÍN et al., 2023; OLIVEIRA FILHO et al., 2021).

A embalagem ativa consiste na incorporação de componentes ativos no sistema de embalagem, visando prolongar a vida útil dos alimentos embalados e melhorar a segurança do alimento (OLIVEIRA FILHO et al., 2020). As embalagens comestíveis são passíveis dessa tecnologia, proporcionando uma forma inovadora de adicionar compostos bioativos e antioxidantes aos alimentos, melhorando sua qualidade nutricional e funcional (KUMAR et al., 2023; RIBEIRO et al., 2024). A incorporação de compostos bioativos de interesse industrial, como antioxidantes e antimicrobianos, pode otimizar a proteção e manutenção da qualidade dos alimentos (MORCILLO-MARTÍN et al., 2023; OLIVEIRA FILHO et al., 2023; RIBEIRO et al., 2024).

A combinação de materiais sustentáveis e compostos bioativos em embalagens, garantindo uma funcionalidade adequada, é um desafio (OLIVEIRA FILHO et al., 2020), visto que a embalagem ativa de biopolímero é reconhecida por sua fragilidade, ou seja uma fraca resistência mecânica. Apesar das suas desvantagens, os polímeros de origem natural ganharam reconhecimento considerável (DUTTA & SIT, 2024). O uso desses polímeros

representa uma tendência promissora na indústria de embalagens, promovendo a sustentabilidade e a preservação dos alimentos de forma mais eficaz.

As embalagens ativas têm apresentado bom desempenho na preservação dos alimentos, além de cumprir os objetivos ambientais da indústria (PALANISAMY et al., 2024). A utilização de tecnologias de embalagens ativas, tais como agentes antimicrobianos e absorvedores de oxigênio, tem se mostrado eficaz na extensão da vida útil de produtos perecíveis, resultando em maior segurança do alimento (LI et al., 2021a; PALANISAMY et al., 2024). A pesquisa atual está focada em encontrar materiais eficazes de preservação e embalagem que minimizem o uso de polímeros sintéticos derivados de fósseis (MORCILLO-MARTÍN et al., 2023).

Os esforços contínuos para aprimorar as embalagens biodegradáveis com CNF envolvem a utilização de fontes alternativas de biopolímeros, modificação de superfícies dos materiais e a incorporação de tecnologias de embalagens ativas (MORCILLO-MARTÍN et al., 2023; PALANISAMY et al., 2024). Apesar dos desafios que ainda precisam ser enfrentados, essas inovações contribuem para uma indústria de embalagens mais sustentável e ecologicamente correta (DO VAL SIQUEIRA et al., 2021; GUNAWARDENE et al., 2021).

2.4 Definições e conceitos relacionados à resíduos agroindustriais, sustentabilidade e economia circular

No contexto atual de inovações industriais e ambientais, é fundamental compreender as diferenças entre termos frequentemente utilizados, como resíduos, subprodutos e coprodutos, além de conceitos mais amplos como sustentabilidade e economia circular. A definição e aplicação corretas desses conceitos são essenciais para o desenvolvimento de práticas industriais mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

Resíduos são materiais descartados ao final de um processo produtivo, que não têm mais valor para o processo em questão e são destinados ao descarte ou tratamento (CUSTÓDIO et al., 2024). Subprodutos, por sua vez, são gerados como parte secundária de um processo de produção primário, mas podem ter algum valor ou utilidade para outros processos ou como matéria-prima adicional. Diferentemente dos resíduos, os subprodutos possuem potencial de reutilização ou reaproveitamento. Já os coprodutos são produtos que surgem simultaneamente a partir do mesmo processo produtivo do produto principal, com valor econômico semelhante

ou até superior à parte mais comercial do produto (GEISSDOERFER et al., 2017; VUČUROVIĆ et al., 2024). Ao contrário dos subprodutos, os coprodutos são criados intencionalmente e podem ser comercializados ou utilizados de forma independente. Um exemplo de coproduto seria a produção simultânea do óleo vegetal da castanha do baru e a torta gerada, ambos com valor comercial em diferentes setores, como a indústria farmacêutica ou alimentícia.

Com o avanço da sustentabilidade, muitos resíduos têm sido reaproveitados como recursos, como é o caso de resíduos agrícolas e alimentares, que podem ser usados para a produção de biopolímeros, biocombustíveis e outros materiais inovadores. Os resíduos agroalimentares possuem uma estrutura e composição complexas, que incluem polissacarídeos, proteínas, carboidratos e compostos bioativos, entre outras moléculas de interesse industrial, que podem ser exploradas. Esses resíduos são recursos naturais econômicos, ecologicamente corretos e renováveis (VUČUROVIĆ et al., 2024). Eles podem ser classificados em diferentes categorias para identificar seu potencial de valorização (PARRA-PACHECO et al., 2024).

Dentro do contexto do fruto baru, existem dois tipos distintos de resíduos, conforme a classificação definida por PARRA-PACHECO et al. (2024). As frações endocarpo, mesocarpo e epicarpo do baru podem ser consideradas resíduos de frutas e hortaliças. O endocarpo, rico em celulose, hemicelulose, pectina e lignina, também pode ser classificado como resíduo lignocelulósico (GOMATHI & RAMESHPATHY, 2023; TRAMONTINA et al., 2023). O destaque industrial desses resíduos está na capacidade de extração de diferentes compostos bioativos, extraídos principalmente dos resíduos de frutas e hortaliças, que podem ser amplamente utilizados como aditivos alimentares, como corantes naturais, intensificadores de cor e agentes aromatizantes (CHOO & SAIK, 2021), além de sua utilização na produção de alimentos funcionais (ZAKY et al., 2024).

Além disso, esses resíduos podem ser explorados para a produção de polímeros como amido de milho, casca de banana, quitosana, amido de mandioca, celulose, entre outros, oferecendo alternativas ecológicas no desenvolvimento de materiais mais sustentáveis (FRONZA et al., 2024).

O termo sustentabilidade tem ganhado cada vez mais força na academia, na indústria e entre formuladores de políticas, principalmente devido às emergências ambientais que impactam diretamente a sociedade (CUSTÓDIO et al., 2024; GEISSDOERFER et al., 2017). A sustentabilidade refere-se à capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender às suas próprias necessidades (GEISSDOERFER et al., 2017). No contexto industrial, a sustentabilidade envolve práticas que

minimizam os impactos ambientais, economizam recursos naturais e promovem a inclusão social e econômica.

A economia circular surge como uma aliada à sustentabilidade. Com o crescente aumento da produção de resíduos na sociedade brasileira, devido à urbanização, novas tecnologias e industrialização, a pressão sobre os recursos naturais tem se intensificado, tornando necessário repensar formas de poupar a natureza e reduzir a poluição, ao mesmo tempo em que se reaproveitam os recursos renováveis. A economia circular surge, assim, como uma alternativa para lidar com esse cenário (BECCCHETTI; BOVA; RAFFAELE, 2024; GEISSDOERFER et al., 2017).

A economia circular é um modelo de produção e consumo que visa estender o ciclo de vida dos produtos, mantendo os recursos em uso o maior tempo possível. Seu objetivo central é minimizar o desperdício e a poluição, promovendo a reutilização, reciclagem e regeneração de materiais e produtos (BECCCHETTI; BOVA; RAFFAELE, 2024; GEISSDOERFER et al., 2017). No setor de embalagens, por exemplo, esse modelo pode ser aplicado através da criação de materiais biodegradáveis ou recicláveis que podem ser reaproveitados após o uso. A economia circular é um processo essencial para promover a transição de um modelo econômico linear para um mais sustentável e eficiente (CUSTÓDIO et al., 2024).

Esses conceitos estão interligados, especialmente em processos de produção mais sustentáveis, onde resíduos e subprodutos podem ser reaproveitados para gerar valor, ao mesmo tempo que a economia circular propõe soluções que promovem o uso eficiente e responsável dos recursos naturais. Incorporar esses conceitos nas práticas industriais não só contribui para a preservação ambiental, mas também pode trazer vantagens econômicas e sociais significativas.

2.5 Compostos bioativos

Segundo definição de Walia et al. (2019), um composto bioativo atua diretamente nos processos fisiológicos ou celulares de um organismo vivo. O termo "bioativo" é derivado do grego "*bios*", que significa vida, e do latim "*activus*", que significa dinâmico ou cheio de energia. É importante ressaltar que compostos bioativos se distinguem daqueles necessários apenas para suprir as necessidades básicas do organismo.

Não há um consenso na literatura para definição de “compostos bioativos” (SINDHU et al., 2021). No entanto, sabe-se que as substâncias bioativas à base de plantas apresentam perspectivas significativas para uso como suplementos dietéticos e alimentos funcionais devido às suas vantagens potenciais para saúde humana como agentes antimicrobianos, anticancerígenos, anti-inflamatórios e antioxidantes (WALIA et al., 2019; ZAKY et al., 2024).

Os compostos bioativos das plantas desempenham um papel crítico no metabolismo secundário das plantas, sendo essenciais para sua sobrevivência e adaptação a diferentes ambientes (AYSELI & IPEK AYSELI, 2016; TAIZ et al., 2017). Entre os compostos bioativos, um campo de investigação crescente tem destacado três grupos promissores: compostos fenólicos, terpenoides e alcaloides. Glucosinolatos, vitaminas, saponinas, fibras e esteróis vegetais, também estão entre as substâncias bioativas presentes em plantas, apresentando essa classificação conforme estrutura e função bioquímica (OLIVEIRA & BRUM, 2018; SINDHU et al., 2021; TAIZ et al., 2017; WALIA et al., 2019).

Esses compostos são produzidos em pequenas quantidades, no entanto apresentam relevância significativa para saúde e nutrição. A diversidade química desses compostos amplia suas aplicações, seja terapêutica ou como substitutos naturais aos aditivos químicos na indústria alimentar, atendendo à demanda dos consumidores por produtos mais saudáveis e funcionais (PATEIRO et al., 2023; SIMÕES, 2020; SINDHU et al., 2021; WASEEM et al., 2023).

Estudos recentes têm elevado o papel desses compostos, bem como seu potencial no desenvolvimento de novos produtos, como biopesticidas, agroquímicos, aditivos alimentares e fragrâncias. A pesquisa sobre a composição química e os efeitos terapêuticos desses compostos, sejam extraídos de espécies nativas brasileiras negligenciadas e subutilizadas, ou resíduos agroindustriais têm demonstrado resultados promissores (ANJALI et al., 2023; AYSELI & IPEK AYSELI, 2016; SCHULZ et al., 2020; ZAKY et al., 2024).

Compostos bioativos extraídos de resíduos agrícolas estão sendo estudados pela sua capacidade de manter e aumentar a qualidade dos alimentos e os benefícios à saúde (PARRA-PACHECO et al., 2024; PATEIRO et al., 2023). A sua incorporação nos alimentos melhoraria sua qualidade e prolongaria o prazo de validade, reduzindo os processos oxidativos e inibindo ou retardando o crescimento microbiano que ocorre durante o processamento e armazenamento, sem comprometer as características sensoriais do produto (PATEIRO et al., 2023). Todas essas vantagens, alinhadas à utilização de subprodutos vegetais como matéria-prima desses compostos, com alto valor agregado, pode reduzir os custos de produção, além de diminuir impactos ambientais (ZAKY et al., 2024)

No contexto nutracêutico e terapêutico, os compostos bioativos se destacam por apresentarem comprovada atividade antioxidante, anti-inflamatória, antienvhecimento, antimicrobiana e coadjuvante na fotoproteção solar (CHERUBIM et al., 2020). Os compostos bioativos apresentam efeitos biológicos na saúde, podendo atuar na redução do risco de desenvolvimento de câncer, doenças cardiovasculares, síndrome metabólica e doenças neurodegenerativas, entre outras doenças não transmissíveis e distúrbios neurodegenerativos (WASEEM et al., 2023)

É amplamente reconhecido que esses compostos têm uma natureza protetora contra certas patologias correlacionadas com o sistema imunológico, estresse oxidativo e inflamação, atuando na redução da oxidação do colesterol LDL. Esses compostos podem contribuir significativamente para minimizar o aparecimento de doenças crônicas relacionadas à idade e para controlar a taxa metabólica da glicose (SINDHU et al., 2021)

Esses efeitos benéficos ressaltam a capacidade dos compostos bioativos como potenciais candidatos para o desenvolvimento de novos alimentos funcionais com propriedades protetoras e conservantes (WALIA et al., 2019).

2.5.1 Compostos fenólicos

Compostos fenólicos são uma ampla classe de substâncias químicas naturais que possuem pelo menos um grupo fenol em sua estrutura molecular. Entre esses, os fenóis simples, com apenas um grupo fenol, se distinguem dos polifenóis, que apresentam múltiplos grupos fenólicos em sua estrutura. Os polifenóis específicos são um grupo extenso, com pelo menos 10.000 componentes químicos identificados, incluindo subgrupos importantes como flavonoides, ácidos fenólicos e taninos (DEBIŃSKA & SOZAŃSKA, 2023; PRZYBYLSKA-BALCEREK et al., 2019).

Os fenólicos vegetais são altamente valorizados devido à ampla gama de ações biológicas benéficas que apresentam (WASEEM et al., 2023). Eles são considerados antioxidantes naturais com aplicações potenciais nas indústrias alimentícia, farmacêutica e de cosmético, associadas a benefícios como propriedades anticarcinogênicas, anti-inflamatórias, antivirais, antiglicêmicas, antienvhecimento, antimicrobianas e antibacterianas (PARRA-PACHECO et al., 2024; ZAKY et al., 2024).

A atividade antioxidante desses compostos está relacionada à capacidade de neutralizar espécies reativas de oxigênio (ROS) oferecendo uma alternativa aos compostos sintéticos com eficácia comprovada e menor propensão a reações adversas (PATEIRO et al., 2023).

Em geral sabe-se que a atividade antioxidante dos extratos vegetais está relacionada ao seu conteúdo fenólico (SAMARADIVAKARA et al., 2017), inerente a qualquer um de seus fitoquímicos, sejam ácidos fenólicos (ácidos hidroxibenzóicos e ácidos hidroxicinâmicos), flavonoides, taninos ou outros polifenóis. Todos são reconhecidamente potentes antioxidantes atuando diretamente na promoção e prevenção à saúde, destacando-se nas pesquisas atuais (HELENA & MANOEL, 2024).

Os flavonoides são compostos fenólicos com estrutura C6-C3-C6 que desempenham importante papel na pigmentação vegetal, além de atuarem como antioxidantes. A catequina, bem como diversas antocianidinas e antoxantinas são exemplos de flavonoides, que podem correlacionar-se positivamente com atividade antioxidante (Jun et al., 2024). Esse grupo de compostos fenólicos tem se destacado pela versatilidade de aplicação em diversos produtos industrializados, como nutracêuticos, farmacêuticos e cosméticos. Isso se deve às suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimutagênicas, anticancerígenas e antivirais (HELENA & MANOEL, 2024; JUN et al., 2024).

Entre os compostos fenólicos, os taninos também se apresentam como compostos bioativos promissores para diversas aplicações industriais e potencial terapêutico. Quanto a sua classificação, eles são hidrolisáveis e condensados (poliflavonoides), formados a partir da polimerização de flavonóides. Enquanto os hidrolisáveis são menores e contêm ácidos fenólicos, os condensados representam a maioria dos taninos industriais (DAS et al., 2020; PIZZI, 2021).

A indústria tem explorado os taninos em diversas aplicações tecnológicas, como em suplementos alimentares, medicamentos, estabilização de cerveja e produção de enzimas. Fontes naturais como casca de acácia e pinheiro são amplamente exploradas comercialmente para extração de taninos (DAS et al., 2020; MELO et al., 2023; PIZZI, 2021).

A adstringência é uma propriedade marcante dos taninos que pode ser considerada um diferencial na tecnologia de alimentos (DAMODARAN & PARKIN, 2017). Em geral, os seres humanos apresentam preferência por alimentos que contenham taninos, como maçãs, amoras-pretas, chá e uvas, devido ao seu nível de adstringência (TAIZ et al., 2017).

O ácido tânico, um tipo de tanino hidrolisável disponível comercialmente, tem sido relacionado a diversas funções biológicas, como agente anticancerígeno e geroprotetor. Além disso, é classificado pelo *Food and Drug Administration* (FDA) como aditivo alimentar

aromatizante, flavorizante, bem como um medicamento aprovado para uso humano conforme informado pelo National Center for Biotechnology Information (NCBI, 2024c). O ácido tânico comercial é aplicado topicamente para diversos fins terapêuticos, como tratamento de herpes labial, assaduras e bolhas decorrentes de febre, além de ser utilizado oralmente para tratar condições como sangramento, diarreia crônica e tosse persistente (NCBI, 2024c).

Os taninos são considerados fitoquímicos pelo seu potencial terapêutico relacionado a diversidade de ação biológica como atividade anti-inflamatória, bactericida e antimicrobiana (PIZZI, 2021). Diversas espécies vegetais contêm taninos com atividades farmacológicas, que podem ser potencializadas na presença de alcaloides (SIMÕES, 2020).

Dessa forma, os taninos apresentam um amplo espectro de ação terapêutica, destacando-se por suas propriedades anti-inflamatórias, bactericidas e antimicrobianas (PIZZI, 2021). A presença de alcaloides em conjunto com os taninos em diversas espécies vegetais pode potencializar ainda mais suas atividades farmacológicas (SIMÕES, 2020). Portanto, os taninos representam uma importante classe de compostos com potencial para o desenvolvimento de novos produtos.

2.5.2 Alcaloides

O termo alcaloide foi utilizado pela primeira vez pelo farmacêutico W. Meissner no século XIX, derivado da junção dos termos alcali, que significa "básico", e oide, que significa "semelhante a", referindo-se a substâncias semelhantes a bases. Inicialmente, os alcaloides foram definidos como moléculas básicas que continham nitrogênio e eram obtidas de plantas, porém atualmente sabe-se que podem ser obtidos de outras fontes, como organismos marinhos e fungos. Apesar de não apresentarem necessariamente características básicas, os alcaloides são metabólitos secundários caracterizados por compostos farmacologicamente ativos, compostos principalmente por nitrogênio (OLIVEIRA & BRUM, 2018; PATIL et al., 2023; SIMÕES, 2020; TAIZ et al., 2017).

Os alcaloides têm despertado interesse contínuo em todo o mundo devido aos seus notáveis efeitos terapêuticos, tais como propriedades analgésicas, anti-inflamatórias e antitumorais, tornando-se uma rica fonte para o desenvolvimento de compostos bioativos na descoberta de novos medicamentos. No entanto, é importante ressaltar que alguns desses

compostos possuem toxicidade intrínseca. O consumo de alimentos ricos em compostos bioativos, como os alcaloides, tem sido associado à redução de doenças degenerativas e proteção contra danos oxidativos (KOTKAR et al., 2023; SHAN et al., 2024), relacionados às diversas propriedades e funções benéficas para a saúde humana, tais como relaxantes musculares, neuroprotetoras, anti-hipertensivas, antioxidantes, diuréticas, antivirais, antimicrobianas, entre outras (KOTKAR et al., 2023).

Os alcaloides são sintetizados principalmente a partir dos aminoácidos lisina, tirosina e triptofano, dando origem a mais de 12.000 compostos identificados até o momento. Alguns desses compostos podem derivar de terpenos e esteróis. Eles contêm átomos básicos de nitrogênio em anéis heterocíclicos e são classificados de acordo com o tipo de heterociclo presente em sua estrutura. Sua diversidade resulta em uma complexidade estrutural que os diferencia em termos de atividade química e farmacológica. Alguns dos alcaloides mais conhecidos com aplicações farmacológicas incluem berberina, morfina, piperina, quinidina, psilocina, cocaína, nicotina, cafeína e ciprofloxacina (KOTKAR et al., 2023; OLIVEIRA & BRUM, 2018; SIMÕES, 2020; SINGH et al., 2020).

As variações estruturais observadas entre os alcaloides estão diretamente relacionadas às unidades precursoras e à via biossintética. Na via metabólica do ácido chiquímico, os aminoácidos precursores triptofano, fenilalanina e tirosina contribuem para a formação de diferentes tipos de alcaloides. Na via do acetil CoA, os aminoácidos precursores não aromáticos ornitina e lisina desempenham um papel importante. Esses aminoácidos são formados a partir da via acetato no ciclo de Krebs, resultando na produção de compostos como o glutamato, ornitina e lisina (OLIVEIRA & BRUM, 2018; SIMÕES, 2020).

Alcaloides são compostos químicos que apresentam uma grande diversidade, sendo classificados de acordo com seus núcleos formadores. Por exemplo, a trigonelina, cujo precursor é a lisina, possui como núcleo formador a piridina (Figura 4). A lisina, por sua vez, pode formar outros grupos de alcaloides como os piperidínicos e quinolizidínicos. Além disso, alcaloides que têm a ornitina como precursor são classificados como pirrolidínicos, pirrolizidínicos e tropâmicos. Essas classificações são fundamentais para compreender a diversidade e as características dos alcaloides. (OLIVEIRA & BRUM, 2018; SIMÕES, 2020).

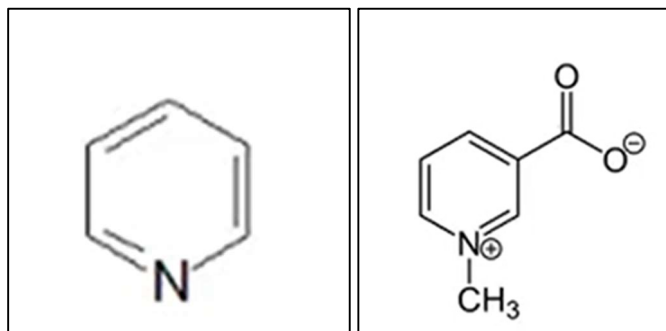


Figura 4. Núcleo formador da piridina e trigonelina.
Fonte: SIMÕES (2020).

A trigonelina (PubChem CID 5570), também conhecida como ácido N-metilnicotínico e niacina metilada, é um composto presente nos grãos de café que está associado indiretamente à formação de compostos de sabor. Durante o processo de torra do café, a trigonelina pode ser parcialmente convertida em ácido nicotínico, uma forma de vitamina B3 essencial na alimentação humana (LU et al., 2022; NUGRAHINI et al., 2020). Esse alcaloide está catalogado no banco de dados fitoquímicos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos tendo como principais fontes os grãos de café e *Trigonella foenum-graecum* (KONSTANTINIDIS et al., 2023; NGUYEN et al., 2024; OCH et al., 2012; TAGUCHI et al., 1985) Diversas patentes relacionadas a atividades antineoplásicas, hepatoprotetoras e de controle glicêmico no Diabetes Mellitus foram registradas, evidenciando a versatilidade da trigonelina (NCBI, 2024d).

Estudos extensivos destacam as propriedades da trigonelina, que incluem atividades anti-inflamatórias, antitumorais, e efeitos benéficos para a saúde oral e doenças do sistema nervoso central (AKTAR et al., 2024; DAGLIA et al., 2002; DEY & MUKHERJEE, 2018; KAMBLE & BODHANKAR, 2014; NGUYEN et al., 2024; NUGRAHINI et al., 2020).

Os alcaloides são metabólitos secundários que se destacam pelo papel fisiológico relevante nas plantas, o que os torna alvos de pesquisas fitoquímicas e desenvolvimento de produtos com alto valor econômico e social. Por isso, estudos sobre alcaloides são importantes, com perspectivas promissoras de aplicabilidade (OLIVEIRA & BRUM, 2018; SIMÕES, 2020).

2.5.3 Terpenos

Os terpenos constituem a maior classe de metabólitos secundários encontrados na natureza. Eles são compostos orgânicos que são sintetizados pelas plantas e têm uma grande diversidade de estruturas e funções. Nas plantas, desempenham diversos papéis como atração de polinizadores, defesa contra herbívoros e patógenos, regulação do crescimento e desenvolvimento, entre outros. Na indústria são amplamente utilizados devido às suas propriedades aromáticas e medicinais (TAIZ et al., 2017)

Terpenos são hidrocarbonetos derivados da união de unidades pentacarbonadas conhecidas como isopreno. Quando uma molécula de terpeno é modificada, ela é chamada de terpenoide, formando uma família de mais de 50.000 compostos estruturalmente diversos. Sua classificação ocorre de acordo com o número de unidades de isopreno (C5), podendo variar desde hemiterpenoides (uma unidade C5) até tetraterpenoides (oito unidades C5), e acima de oito unidades, esses compostos passam a ser chamados de politerpenoides (FALLEH et al., 2020; TAIZ et al., 2017)

Em relação à via biossintética, os terpenoides possuem três precursores distintos, o que possibilita a enorme diversidade desses metabólitos secundários deste grupo. Os precursores são: a acetil-CoA, piruvato e gliceraldeído-3-fosfato. Ao entrar na via do mevalonato (MVA) no citosol e na via do metileritritol fosfato (MEP) nos plastídios há produção do precursor de 5 carbonos isopentenil difosfato (IPP). Este pode ser isomerizado pela isopentenil pirofosfato isomerase (IDI) para gerar seu isômero alílico dimetilalil difosfato (DMAPP). Tanto o precursor IPP, como o DMAPP são substratos para isopentenil difosfato sintase (IDSs). As terpeno sintases geranyl difosfato sintase (GPPS), farnesil difosfato sintase (FPPS) e geranylgeranyl difosfato sintase (GGPPSA) convertem geranyl difosfato (GPP) na maioria dos monoterpenos (C10), sesquiterpenos (C15) e diterpenos (C20) (LI et al., 2024).

Os terpenoides desempenham um papel fundamental no aroma e sabor de hortaliças, juntamente com outros compostos como os glucosinolatos e compostos fenólicos. Além disso, esses compostos também estão envolvidos na sinalização e resposta a estresses das plantas (BALDWIN, 2002; DAMODARAN & PARKIN, 2017; LI et al., 2024). O potencial medicinal e farmacológico de plantas que produzem sesquiterpenos tem sido tema de investigações nos últimos anos (HOU et al., 2022; NGUYEN et al., 2023; RIGOTTI et al., 2023; ZHANG et al., 2022).

Além de suas propriedades sensoriais, os terpenoides também apresentam atividades biológicas como antibacterianas, antifúngicas, anti-helmínticas, melhoramento da permeação de membrana e antioxidantes. No entanto, a volatilidade dos terpenoides de baixa massa molecular pode ser um desafio em sua aplicação comercial, sendo necessária a utilização de surfactantes ou álcoois para garantir a estabilidade dos produtos (SOTO et al., 2021)

Dessa forma, os terpenoides desempenham um papel crucial em diversas áreas, sendo essenciais não apenas para o aroma e sabor dos alimentos, mas também na saúde e indústria. Sua diversidade e potencialidades tornam esses compostos alvos de constantes pesquisas e no desenvolvimento de novos produtos.

3 OBJETIVO GERAL

Considerando a importância crescente da sustentabilidade e do aproveitamento de subprodutos agrícolas, esse estudo teve por objetivo avaliar a composição físico-química e caracterização do potencial tecnológico da polpa e endocarpo do baru, buscando desenvolver filmes biodegradáveis ativos de micro/nanofibrilas lignocelulósicas para aplicação no setor alimentício.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre o estado da arte em relação aos resíduos e subprodutos do fruto baru (*Dipteryx alata* Vogel).
- Caracterizar e investigar a composição e propriedades bioativas da polpa do baru, com o objetivo de identificar os componentes responsáveis pela alta atividade antioxidante reportada na revisão bibliográfica sobre o fruto.
- Realizar a extração de compostos bioativos da polpa do baru de maneira ambientalmente sustentável.
- Aprimorar a extração e obtenção de micro e nanofibrilas lignocelulósicas (LCMNF) a partir do endocarpo do baru.
- Desenvolver um filme biodegradável ativo utilizando LCMNF, extrato ativo da polpa e uma matriz de amido.
- Caracterizar os filmes do estudo por meio de análises das propriedades físicas, químicas, mecânicas e morfológicas.
- Realizar a avaliação da atividade antioxidante e teste de biodegradabilidade dos filmes para comprovar sua eficácia e bioatividade, visando um potencial aplicação como filme biodegradável ativo.

REFERÊNCIAS

- ABRAMSON, M.; SHOSEYOV, O.; SHANI, Z. Plant cell wall reconstruction toward improved lignocellulosic production and processability. *Plant Science*, v. 178, n. 2, p. 61–72, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.11.003>.
- ADEWALE, P.; YANCHESHMEH, M. S.; LAM, E. Starch modification for non-food, industrial applications: Market intelligence and critical review. *Carbohydrate Polymers*, v. 291, p. 119590, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119590>.
- AKTAR, S.; FERDOUSI, F.; KONDO, S.; KAGAWA, T.; ISODA, H. Transcriptomics and biochemical evidence of trigonelline ameliorating learning and memory decline in the senescence-accelerated mouse prone 8 (SAMP8) model by suppressing proinflammatory cytokines and elevating neurotransmitter release. *GeroScience*, v. 46, n. 2, p. 1671–1691, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11357-023-00919-x>.
- ALI, M. S. et al. Fabrication of smart film based on fish gelatin incorporating phycoerythrin and cellulose nanofibrils to monitor fish freshness. *Food Bioscience*, v. 59, p. 104111, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104111>.
- ALVES-SANTOS, A. M. et al. Chemical composition and prebiotic activity of baru (*Dipteryx alata* Vog.) pulp on probiotic strains and human colonic microbiota. *Food Research International*, v. 164, p. 112366, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112366>.
- ANDRADE, M. S. et al. Development of sustainable food packaging material based on biodegradable polymer reinforced with cellulose nanocrystals. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 31, jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100807>.
- ANJALI, KUMAR, S., KORRA, T., THAKUR, R., ARUTSELVAN, R., KASHYAP, A. S., NEHELA, Y., CHAPLYGIN, V., MINKINA, T., & KESWANI, C. Role of plant secondary metabolites in defence and transcriptional regulation in response to biotic stress. *Plant Stress*, v. 8, mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100154>.
- ABATAN, A., O.A. L, UGWUANYI, E. D, JACKS, B S., SODIYA, O.A., DARAOJIMBA, A. I., OBAIGBENA. A., Sustainable packaging innovations and their impact on HSE practices in the FMCG industry. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*, v. 10, n. 1, p. 379–391, 2024. DOI: <https://doi.org/10.30574/msarr.2024.10.1.0029>.
- AYSELI, M. T.; AYPEK AYSELI, Y. Flavors of the future: Health benefits of flavor precursors and volatile compounds in plant foods. *Trends in Food Science and Technology*, v. 48, p. 69–77, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.005>.

BALASUBRAMANIAM, S. L.; SINGH PATEL, A.; NAYAK, B. Fabrication of antioxidative food packaging films using cellulose nanofibers, kappa-carrageenan, and gallic acid. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 45, n. 5, p. e15480, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.15480>.

BALASUBRAMANIAM, S. L. et al. Characterization of novel cellulose nanofibril and phenolic acid-based active and hydrophobic packaging films. *Food Chemistry*, v. 374, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131773>.

BALASUBRAMANIAM, S. L. et al. Biodegradable cellulose nanofibril films with active functionality for food packaging applications. *ACS Food Science & Technology*, v. 3, n. 8, p. 1323–1333, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00101>.
BALDWIN, E. A. Fruit flavor, volatile metabolism and consumer perceptions. *In Fruit Qual. Its Biol. Basis*, Issue 4, 2002.

BANGAR, S. P., BALAKRISHNAN, G., NAVAF, M., & SUNOOJ, K. V. Recent Advancements on Barnyard Millet Starch: A Sustainable Alternative to Conventional Starch. *Starch - Stärke*, n/a(n/a), 2300232. (2024).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/star.202300232>

BANGAR, S. P.; WHITESIDE, W. S. Nano-cellulose reinforced starch bio composite films - A review on green composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 185, maio 2021, p. 849–860. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.017>.

BARBALHO, G. H., NASCIMENTO, J. J., SILVA, L. B., GOMEZ, R. S., FARIAS, D. O., DINIZ, D. D., SANTOS, R. S., FIGUEIREDO, M. J., & LIMA, A. G. Bio-Polyethylene Composites Based on Sugar Cane and Curauá Fiber: An Experimental Study. *In Polymers* (Vol. 15, Issue 6). 2023 <https://doi.org/10.3390/polym15061369>

BARKHORDARI, M.; MOHSENI-SHAHRI, F. S.; MOEINPOUR, F. Bio-based gelatin–TiO₂–purple basil extract nanocomposite films for monitoring fish freshness. *Journal of Food Measurement and Characterization*, v. 18, n. 4, p. 2965–2976, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02377-1>.

BARLETTA, M.; AVERSA, C.; PUOPOLO, M. Recycling of PLA-based bioplastics: The role of chain-extenders in twin-screw extrusion compounding and cast extrusion of sheets. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 137, n. 42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.49292>.

BECCHETTI, L.; BOVA, D.; RAFFAELE, L. Win together or lose alone: circular economy and hybrid governance for natural resource commons. *Journal of Cleaner Production*, v. 144520, 2024. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624039696>>. Acesso em: 23 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144>

BERTOTTO, C., BILCK, A. P., YAMASHITA, F., ANJOS, O., BAKAR SIDDIQUE, M. A., HARRISON, S. M., BRUNTON, N. P., & CARPES, S. T. Development of a biodegradable plastic film extruded with the addition of a Brazilian propolis by-product. *Lwt*, 157(January), 2022. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113124>

CHEN, H.; ZHANG, M.; RAO, Z. Development of cellulose nanofibrils reinforced polyvinyl alcohol films incorporated with alizarin for intelligent food packaging. *International Journal of Food Science & Technology* v. 56, n. 9, p. 4248–4257, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15192>.

CHERUBIM, D. DE L. J., BUZANELLO MARTINS, C. V., OLIVEIRA FARIÑA, L., & DA SILVA DE LUCCA, R. A. Polyphenols as natural antioxidants in cosmetics applications. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 19(1), 33–37. 2020. <https://doi.org/10.1111/jocd.13093>

CHEVALIER, R. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, F. D.; CUNHA, R. L. Modulating digestibility and stability of Pickering emulsions based on cellulose nanofibers. *Food Research International*, v. 178, p. 113963, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.113963>.

CHOO, W. S.; SAIK, A. Y. H. Valorization of fruit and vegetable waste for bioactive pigments: extraction and utilization. In: BHAT, R. B. T. (Ed.). *Valorization of Agro-Food Waste and By-Products*. Academic Press, 2021, p. 61–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824044-1.00048-9>.

ČOLIĆ, M.; TOMIĆ, S.; BEKIĆ, M. Immunological aspects of nanocellulose. *Immunology Letters*, v. 222, p. 80–89, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imlet.2020.04.004>.

COMBRZYŃSKI, M.; ÖZMEN, Ö. Foamed bioplastics: a review. *International Agrophysics*, v. 35, n. 4, p. 375–388, 2021. DOI: <https://doi.org/10.31545/INTAGR/145289>.

COSTA, L. R., SILVA, L. E., MATOS, L. C., TONOLI, G. H. D., & HEIN, P. R. G. Cellulose nanofibrils as reinforcement in the process manufacture of paper handsheets. *Journal of Natural Fibers*, v. 19, n. 14, p. 7818–7833, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1958415>.

CUSTÓDIO, M. M., JUNQUEIRA, J. C., & MANRIQUE, J. I. T. Resíduo zero para a economia circular: a importância dos municípios e de suas políticas públicas de economia circular. *Veredas Do Direito*, 21, e212656, 2024. <https://doi.org/10.18623/rvd.v21.2656-ptbr>

DAGLIA, M., TARSI, R., PAPETTI, A., GRISOLI, P., DACARRO, C., PRUZZO, C., & GAZZANI, G. Antiadhesive effect of green and roasted coffee on *Streptococcus mutans*' adhesive properties on saliva-coated hydroxyapatite beads. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 50, n. 5, p. 1225–1229, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf010958t>.

DAI, H., LV, T., LIU, S., LUO, Y., WANG, Y., WANG, H., MA, L., WU, J., & ZHANG, Y. Preparation of nanocellulose light porous material adsorbed with tannic acid and its application in fresh-keeping pad. *Food Chemistry*, v. 444, p. 138676, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138676>.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L. (Eds). *Fennema's Food Chemistry*. 5. ed. London; New York: Taylor & Francis Group, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315372914>.

DAS, A. K., ISLAM, M. N., FARUK, M. O., ASHADUZZAMAN, M., & DUNGANI, R. Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. *South African Journal of Botany**, v. 135, p. 58–70, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.08.008>.

DEBIŃSKA, A.; SOZAŃSKA, B. Dietary polyphenols - Natural bioactive compounds with potential for preventing and treating some allergic conditions. *Nutrients*, v. 15, n. 22, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15224823>.

DEDIEU, I.; GONTARD, N.; AOUF, C. The thermo-mechanical recyclability potential of biodegradable biopolyesters: Perspectives and limits for food packaging application. *Polymer Testing**, v. 111, maio 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107620>.

DEL NOBILE, M. A., CONTE, A., BUONOCORE, G. G., INCORONATO, A. L., MASSARO, A., & PANZA, O. Active packaging by extrusion processing of recyclable and biodegradable polymers. *Journal of Food Engineering*, v. 93, n. 1, p. 1–6, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.12.022>.

DESPRES, H. W., SABRA, A., ANDERSON, P., HEMRAZ, U. D., BOLUK, Y., SUNASEE, R., & CKLESS, K. Mechanisms of the immune response caused by cationic and anionic surface functionalized cellulose nanocrystals using cell-based assays. *Toxicology in Vitro*, v. 55, p. 124–133, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2018.12.009>.

DEY, A.; MUKHERJEE, A. Plant-derived alkaloids: A promising window for neuroprotective drug discovery. In: BRAHMACHARI, G. B. T. (Ed.). **Natural Product Drug Discovery**. Elsevier, 2018, p. 237–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809593-5.00006-9>.

DO VAL SIQUEIRA, L., ARIAS, C. I. L. F., MANIGLIA, B. C., & TADINI, C. C. Starch-

based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspectives. *Current Opinion in Food Science*, v. 38, p. 122–130, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.020>.

DUTTA, D.; SIT, N. Comprehensive review on developments in starch-based films along with active ingredients for sustainable food packaging. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, v. 39, p. 101534, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101534>.

FALLEH, H., BEN JEMAA, M., SAADA, M., & KSOURI, R. Essential oils: A promising eco-friendly food preservative. *Food Chemistry*, v. 330, p. 127268, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127268>.

FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA). Types of food ingredients. 2023. Disponível em: <https://www.fda.gov/food/food-additives-and-gras-ingredients-information-consumers/types-food-ingredients>. Acesso em: 31 out. 2024.

FRONZA, P. ET AL. FRONZA, P., BATISTA, M. J. P. A., FRANCA, A. S., & OLIVEIRA, L. Bionanocomposite based on cassava waste starch, locust bean galactomannan, and cassava waste cellulose nanofibers. *Foods*, v. 13, n. 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13020202>

GAIKWAD, D.; SUTAR, R.; PATIL, D. Polysaccharide mediated nanodrug delivery: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 261, p. 129547, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129547>

GARRIDO-ROMERO, M., AGUADO, R., MORAL, A., BRINDLEY, C., & BALLESTEROS, M. From traditional paper to nanocomposite films: Analysis of global research into cellulose for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 31, jun. 2021, p. 100788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100788>.

GARUTI, G. L., FREITAS, R. R. M. DE, LIMA, V. H. DE, CARMO, K. P. DO, PÁDUA, F. A. DE, & BOTARO, V. R. Nanocellulose reinforced starch biocomposite films via tape-casting technique. *Polímeros*, v. 34, 2024.

GAUTAM, V. *FoodDB: Food database*. Version 1.0. 2024. Disponível em: www.foodb.ca. Acesso em: 31 out. 2024.

GELAW, B. B., KASAEW, E., BELAYNEH, A., TESFAW, D., & TESFAYE, T. Review of the sources, synthesis, and applications of nanocellulose materials. *Polymer Bulletin*, v. 81, n. 9, p. 7713–7735, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-023-05061-4>.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757–768, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>. Acesso em: 22 dez. 2024.

GHOSH, T., NAKANO, K., MULCHANDANI, N., & KATIYAR, V. Curcumin loaded iron functionalized biopolymeric nanofibre reinforced edible nanocoatings for improved shelf life of cut pineapples. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 28, p. 100658, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100658>.

GOMATHI, S.; RAMESHPATHY, M. Valorization of agro-waste residues into bio-vanillin: A comprehensive review. *Industrial Crops and Products*, v. 205, p. 117522, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117522>.

GUNAWARDENE, O. H. P., GUNATHILAKE, C., AMARAWEEERA, S. M., FERNANDO, N. M. L., WANNINAYAKA, D. B., MANAMPERI, A., KULATUNGA, A. K., RAJAPAKSHA, S. M., DASSANAYAKE, R. S., FERNANDO, C. A. N., & MANIPURA, A. Compatibilization of starch/synthetic biodegradable polymer blends for packaging applications: A review. *Journal of Composites Science*, v. 5, n. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5110300>.

GUPTA, A.; LOLIC, L.; MEKONNEN, T. H. Reactive extrusion of highly filled, compatibilized, and sustainable PHBV/PBAT – Hemp residue biocomposite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 156, p. 106885, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106885>.

HELENA, L.; MANOEL, A. Bacuri (*Platonia insignis* Mart.): Nutritional values, volatile compounds, rheological properties, health benefits, and potential products. *Food Chemistry*, v. 436, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137528>.

HERNANDEZ-IZQUIERDO, V. M.; KROCHTA, J. M. Thermoplastic processing of proteins for film formation - A review. *Journal of Food Science*, v. 73, n. 2, p. 30–39, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00636.x>.

HEWSON, D., GEE, K., KOPTASIKOVA, L., HACKER, C., & SKUSE, D. Nano or not nano: An unbiased approach to classifying FiberLean microfibrillated cellulose. *Cellulose*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05980-z>.

HOU, T., SANA, S. S., LI, H., XING, Y., NANDA, A., NETALA, V. R., & ZHANG, Z. Essential oils and its antibacterial, antifungal, and anti-oxidant activity applications: A review. *Food Bioscience*, v. 47, p. 101716, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101716>.

HUANG, S., LIU, X., CHANG, C., & WANG, Y. Recent developments and prospective food-related applications of cellulose nanocrystals: A review. *Cellulose*, v. 27, n. 6, p. 2991–3011, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-02984-3>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO/TS 20477:2017(en)*. Nanotechnologies — Standard terms and their definition for cellulose nanomaterial. 2017. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:20477:ed-1:vl:en>. Acesso em: 31 out. 2024.

JAYAN, J. S.; DEERAJ, BDS; S. APPUKUTTAN; KURUVILLA, J. *Chapter Thirteen - Biopolymer-derived carbonaceous composites and their potential applications* (A. K. S. M. R. S. S. M. J. A. M. Asiri; (ed.); In Woodhea, p. Pages 253-280). Series in Composites Scienc, 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819900-8.00005-2>.

JIANG, Z.; NGAI, T. Recent advances in chemically modified cellulose and its derivatives for food packaging applications: A review. *Polymers*, v. 14, n. 8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14081533>.

JUN, S., GUK, C., YOON, S., JEONG, H., MIN, S., YEON, M., KYEOM, J., JUN, Y., & SHIN, E. Impact of roasting conditions on physicochemical, taste, volatile, and odor-active compound profiles of *Coffea arabica* L. (cv. Yellow Bourbon) using electronic sensors and GC-MS-O using a multivariate approach. *Food Chemistry: X*, v. 21, p. 101119, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101119>.

KAMBLE, H. V, & BODHANKAR, S. L. Cardioprotective effect of concomitant administration of trigonelline and sitagliptin on cardiac biomarkers, lipid levels, electrocardiographic and hemodynamic modulation on cardiomyopathy in diabetic Wistar rats. *Biomedicine & Aging Pathology*, 4(4), 335–342. (2014). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biomag.2014.07.009>

KARGARZADEH, H., MARIANO, M., GOPAKUMAR, D., AHMAD, I., THOMAS, S., DUFRESNE, A., HUANG, J., & LIN, N. Advances in cellulose nanomaterials. *Cellulose*, v. 25, n. 4, p. 2151–2189, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1723-5>.

KHARE, S., DELOID, G. M., MOLINA, R. M., GOKULAN, K., COUVILLION, S. P., BLOODSWORTH, K. J., EDER, E. K., WONG, A. R., HOYT, D. W., BRAMER, L. M., METZ, T. O., THRALL, B. D., BRAIN, J. D., & DEMOKRITOU, P. Effects of ingested nanocellulose on intestinal microbiota and homeostasis in Wistar Han rats. *NanoImpact*, v. 18, p. 100216, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100216>.

KIM, M.; DOH, H. Upcycling food by-products: Characteristics and applications of nanocellulose. *Chemistry – An Asian Journal*, v. 19, n. 6, p. e202301068, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.1002/asia.202301068>.

KONSTANTINIDIS, N., FRANKE, H., SCHWARZ, S., & LACHENMEIER, D. W. Risk assessment of trigonelline in coffee and coffee by-products. *Molecules*, v. 28, n. 8, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28083460>.

KOTKAR, G. D.; SHETGAONKAR, A. D.; TILVE, S. G. Diversity of chemical skeletons: A practical strategy to benefit. In: MEENA, S. N. et al. (Eds). *Progress in Biochemistry and Biotechnology*. Academic Press, 2023, p. 75–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15232-0.00023-0>.

KUMAR, N.; PRATIBHA, P.; PRASAD, J.; YADAV, A.; UPADHYAY, A.; NEERAJ, N.; SHUKLA, S.; PETKOSKA, A. T.; HEENA, H.; SURI, S.; GNIEWOSZ, M.; KIELISZEK, M. Recent trends in edible packaging for food applications — perspective for the future. *Food Engineering Reviews*, v. 15, n. 4, p. 718–747, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09358-y>.

KUMAR, R., KUMARI, S., RAI, B., KUMAR, R., SIROHI, S., & KUMAR, G. (2020). A Facile Chemical Approach to Isolate Cellulose Nanofibers from Jute Fibers. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(10), 2761–2770. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01808-6>

LAGO, R. C., DE OLIVEIRA, A. L. M., CORDASSO DIAS, M., DE CARVALHO, E. E. N., DENZIN TONOLI, G. H., & DE BARROS VILAS BOAS, E. V. Obtaining cellulosic nanofibrils from oat straw for biocomposite reinforcement: Mechanical and barrier properties. *Industrial Crops and Products*, v. 148, fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112264>.

LAGO, R. C., DE OLIVEIRA, A. L. M., DE AMORIM DOS SANTOS, A., ZITHA, E. Z. M., NUNES CARVALHO, E. E., TONOLI, G. H. D., & DE BARROS VILAS BOAS, E. V. Addition of wheat straw nanofibrils to improve the mechanical and barrier properties of cassava starch-based bionanocomposites. *Industrial Crops and Products*, v. 170, fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113816>.

LI, Q., WU, Y., SHABBIR, M., PEI, Y., LIANG, H., LI, J., CHEN, Y., LI, Y., LI, B., LUO, X., & LIU, S. Coalescence behavior of eco-friendly Pickering-MIPES and HIPEs stabilized by using bacterial cellulose nanofibrils. *Food Chemistry*, v. 349, p. 129163, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129163>.

LI, Y., BAO, T., ZHANG, J., LI, H., SHAN, X., YAN, H., KIMANI, S., ZHANG, L., & GAO, X. The coordinated interaction or regulation between floral pigments and volatile

organic compounds. *Horticultural Plant Journal*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2024.01.002>.

LI, Z.; ZHANG, Y.; ANANKANBIL, S.; GUO, Z. Applications of nanocellulosic products in food: Manufacturing processes, structural features and multifaceted functionalities. *Trends in Food Science & Technology*, v. 113, p. 277–300, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.027>.

LIU, X., JIANG, Y., WANG, L., SONG, X., QIN, C., & WANG, S. Tuning of size and properties of cellulose nanofibers isolated from sugarcane bagasse by endoglucanase-assisted mechanical grinding. *Industrial Crops and Products*, v. 146, p. 112201, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112201>.

LU, P., TAKIGUCHI, S., HONDA, Y., LU, Y., MITSUI, T., KATO, S., KODERA, R., FURIHATA, K., ZHANG, M., OKAMOTO, K., ITOH, H., SUZUKI, M., KONO, H., & NAGATA, K. NMR and HPLC profiling of bee pollen products from different countries. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, v. 5, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100119>.

LUO, M.; ZHANG, X.; WU, J.; ZHAO, J. Modifications of polysaccharide-based biomaterials under structure-property relationship for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, v. 266, p. 118097, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118097>.

MARYAM ADILAH, Z. A., JAMILAH, B.; HANANI, Z. A. N. Functional and antioxidant properties of protein-based films incorporated with mango kernel extract for active packaging. *Food Hydrocolloids*, v. 74, p. 207–218, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.017>.

MASCARENHAS, A. R. P., SCATOLINO, M. V., DIAS, M. C., MARTINS, M. A., MELO, R. R. DE, DAMÁSIO, R. A. P., MENDONÇA, M. C., & TONOLI, G. H. D. Fibers pre-treatments with sodium silicate affect the properties of suspensions, films, and quality index of cellulose micro/nanofibrils: Effect of Na₂SiO₃. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, p. 1–19, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0037>.

MASCARENHAS, A. R. P., SCATOLINO, M. V., DIAS, M. C., MARTINS, M. A., MELO, R. R. DE, MENDONÇA, M. C., & TONOLI, G. H. D. Association of cellulose micro/nanofibrils and silicates for cardboard coating: Technological aspects for packaging. *Industrial Crops and Products*, v. 188, jun. 2022, p. 0–2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115667>.

MASCARENHAS, A. R. P.; SETTER, C.; SCATOLINO, M. V.; LAGO, R. C. do; BATISTA, F. G.; MEDEIROS, D. T. de; SANTOS, C. A. de; VALE, A. R. do; MELO, R. R.

de; TONOLI, G. H. D. Valorization of *Coffea arabica* wood waste to obtain suspensions of lignocellulose microfibrils and lignocellulose nanofibrils (LCMF/LCNF) and production of eco-friendly films for packaging. *Forests*, v. 15, n. 10, p. 1834, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15101834>.

MASCARENHAS, A. R. P.; SCATOLINO, M. V.; LAGO, R. C. do; MEDEIROS, D. T.; BATISTA, F. G.; SETTER, C.; MELO, R. R. de; MARTINS, M. A.; TONOLI, G. H. D.. Silicates as alternative pretreatment for cellulose pulp to obtain nanofibrils for application in biodegradable packaging: a technical review. *CERNE*, 30, e-103354, 2024b. <https://doi.org/10.1590/01047760202330013354> MELO, L. F. M. DE, AQUINO-MARTINS, V. G. DE Q., SILVA, A. P. DA, OLIVEIRA ROCHA, H. A., & SCORTECCI, K. C. Biological and pharmacological aspects of tannins and potential biotechnological applications. *Food Chemistry*, v. 414, p. 135645, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135645>.

MISHRA, R. K.; SABU, A.; TIWARI, S. K. Materials chemistry and the futurist eco-friendly applications of nanocellulose: Status and prospect. *Journal of Saudi Chemical Society*, v. 22, n. 8, p. 949–978, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.02.005>.

MISHRA, R. K., SABU, A., & TIWARI, S. K.. Effects of deep eutectic solvents on cellulosic fibres and paper properties: Green “chemical” refining. *Carbohydrate Polymers*, v. 292, p. 119606, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119606>.

MONTEIRO, G. de M.; CARVALHO, E. E. N.; BOAS, E. V. B. V. Baru (*Dipteryx alata* Vog.): Fruit or almond? A review on applicability in food science and technology. *Food Chemistry Advances*, v. 1, ago. 2022, p. 100103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100103>.

MOON, R. J., MARTINI, A., NAIRN, J., SIMONSEN, J., & YOUNGBLOOD, J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, v. 40, n. 7, p. 3941–3994, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1039/C0CS00108B>.

MORCILLO-MARTÍN, R. et al. Raspberry (*Rubus idaeus* L.) waste-derived nanocellulose for circular application in edible films and coatings. *LWT*, v. 188, p. 115438, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115438>.

NADEEM, H., NIMMEGEERS, P., BATCHELOR, W., & BILLEN, P. Cellulose nanofibre films as a substitute for plastic packaging: A comparative environmental life cycle assessment. *Food and Bioproducts Processing*, v. 145, p. 175–186, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.03.005>.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. PubChem Compound

Summary for CID 16211032; Cellulose. 2024b Recuperado em 15 de junho de 2024 de www.pubchem.ncbi.nlm.nih.gov.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION - NCBI. PubChem Compound Summary for Starch, Corn. 2024a. Recuperado de https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Starch_Corn.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. PubChem Compound Summary para CID 16129778, Gallotannin. 2024c Recuperado em 29 de outubro de 2024 de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Gallotannin>.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION - NCBI. PubChem Compound Summary for CID 5570, Trigonelline. 2024d. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Trigonelline>.

NIAOUNAKIS, M. (2015). Introduction. In *Biopolymers: Processing and Products*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-26698-7.00001-5>

NGUYEN, Q. H., NGUYEN, T. T., DO, V. T., CHU, T. T. H., TRAN, H. T., NGUYEN, S. K., NGUYEN, P. H., NGUYEN, T. H., LE, N. D., NGUYEN, D. T., NGUYEN, T. P. T., NGUYEN, V. P., NGUYEN, T. A., KOSHOVYI, O., & RAAL, A. New insights into the chemical composition of *Piper* spp. collected in the northern region of Vietnam. *Biochemical Systematics and Ecology*, v. 112, set. 2023, p. 104770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104770>.

NGUYEN, V., TAINE, E. G., MENG, D., CUI, T., & TAN, W. Pharmacological activities, therapeutic effects, and mechanistic actions of trigonelline. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 25, n. 6, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25063385>.

NOGUEIRA, G. F., DE OLIVEIRA, R. A., VELASCO, J. I., & FAKHOURI, F. M. Methods of incorporating plant-derived bioactive compounds into films made with agro-based polymers for application as food packaging: A brief review. *Polymers*, v. 12, n. 11, p. 1–34, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12112518>.

NUGRAHINI, A. D., ISHIDA, M., NAKAGAWA, T., NISHI, K., & SUGAHARA. Trigonelline: An alkaloid with anti-degranulation properties. *Molecular Immunology*, v. 118, jul. 2019, p. 201–209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2019.12.020>.

OLAYIL, R., ARUMUGA PRABU, V., DAYAPRASAD, S., NARESH, K., & RAMA SREEKANTH, P. S. A review on the application of bio-nanocomposites for food packaging. *Materials Today: Proceedings*, v. 56, p. 1302–1306, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.315>.

OCH, A., PODGÓRSKI, R., NOWAK, R., ZHOU, J., CHAN, L., ZHOU, S., DEROSA, G., MAFFIOLI, P., CICERO, A. F. G., SAHEBKAR, A., AIN, Q. U., KHAN, H., MUBARAK, M. S., PERVAIZ, A., NETT, R. S., DHO, Y., LOW, Y. Y., SATTELY, E. S., UMEZAWA, K., ... YONEDA, M. Trigonelina. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(24), 1113–1124. (2012). <https://doi.org/10.1007/s13577-017-0196-4>

OLIVEIRA, A. C., RODRIGUES, C. A., DE ALMEIDA, M. C., MÁRSICO, E. T., SCALIZE, P. S., DE OLIVEIRA, T. F., SOLAR, V. A., & VALDÉS, H. Ethylene elimination using activated carbons obtained from baru (*Dipteryx alata* Vog.) waste and impregnated with copper oxide. *Molecules*, v. 29, n. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29122717>.

OLIVEIRA, A. L. M., BENTO, J. A. C., FIDELIS, M. C., DIAS, M. C., DE BARROS, H. E. A., NATARELLI, C. V. L., DO LAGO, R. C., BARBOSA, J. W., OSSANI, P. C., CALIARI, M., JÚNIOR, M. S. S., TONOLI, G. H. D., CARVALHO, E. E. N., FRANCO, M., CIRILLO, M. Â., & DE BARROS VILAS BOAS, E. V. Effect of pine, eucalyptus, and corn straw nanofibers on the structural properties of rice flour-based biodegradable films. *Industrial Crops and Products*, v. 191, p. 115929, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115929>.

OLIVEIRA, C. B. de; BRUM, L. F. D. S. *Farmacognosia pura*. SAGAH, 2018.
OLIVEIRA FILHO, J. G. DE, BRAGA, A. R. C., OLIVEIRA, B. R. DE, GOMES, F. P., MOREIRA, V. L., PEREIRA, V. A. C., & EGEEA, M. B.. The potential of anthocyanins in smart, active, and bioactive eco-friendly polymer-based films: A review. *Food Research International*, v. 142, fev. 2021, p. 110202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110202>.

OLIVEIRA FILHO, J. G. DE, DE SOUSA, T. L., BERTOLO, M. R. V., BOGUSZ JUNIOR, S., MATTOSO, L. H. C., PIMENTEL, T. C., & EGEEA, M. B. Next-generation food packaging: Edible bioactive films with alginate, mangaba pulp (*Hancornia speciosa*), and *Saccharomyces boulardii*. *Food Bioscience*, v. 54, p. 102799, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102799>.

OLIVEIRA FILHO, J. G., LEMES, A., BRAGA, A., & EGEEA, M. Biodegradable eco-friendly packaging and coatings incorporated of natural active compounds. In: *Eco-Friendly Polymer Nanocomposites for Food Packaging*, 2020, p. 171–206. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429322129-6>.

OTONI, C. G., AVENA-BUSTILLOS, R. J., AZEREDO, H. M. C., LOREVICE, M. V., MOURA, M. R., MATTOSO, L. H. C., & MCHUGH, T. H. *Comprehensive Reviews in Food*

Science and Food Safety, v. 16, n. 5, p. 1151–1169, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12281>.

PALANISAMY, S., DEVI, G., SELVAKESAVAN, R. K., VENKATACHALAM, S., BHARATHI, D., & LEE, J. Unlocking sustainable solutions: Nanocellulose innovations for enhancing the shelf life of fruits and vegetables – A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 261, p. 129592, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129592>.

PARRA-PACHECO, B., CRUZ-MORENO, B. A., AGUIRRE-BECERRA, H., GARCÍA-TREJO, J. F., & FEREGRINO-PÉREZ, A. A. Bioactive Compounds from Organic Waste. *Molecules*, v. 29, n. 10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29102243>.

PATEIRO, M., DOMÍNGUEZ, R., MUNEKATA, P. E. S., NIETO, G., BANGAR, S. P., DHAMA, K., & LORENZO, J. M. Bioactive compounds from leaf vegetables as preservatives. *Foods*, v. 12, n. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12030637>.

PATIL, A.; PAIKRAO, H. M.; PATIL, S. Chapter 7 - The chemistry and biology of the plant poisons and their forensic significance. In: RAHMAN, A. B. T. (Ed.). *Studies in Natural Products Chemistry*, v. 78, p. 255–321, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91253-2.00008-X>.

PIRVEISI, N., ARIANI, P., ESMAEILI, M., & AHMADI, M. (2023). Investigating active packaging based on cellulose nanofibers oxidized by TEMPO method containing hydrolyzed protein obtained from pine tree fruit on the quality of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during the storage period. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(4), 3323–3337. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01843-6>

PIZZI, A. Tannins medical/pharmacological and related applications: A critical review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, v. 22, abr. 2021, p. 100481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100481>.

POPA, M. S.; FRONE, A. N.; PANAITESCU, D. M. Polyhydroxybutyrate blends: A solution for biodegradable packaging? *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 207, jan. 2022, p. 263–277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.185>.

PRZYBYLSKA-BALCEREK, A.; FRANKOWSKI, J.; STUPER-SZABLEWSKA, K. Bioactive compounds in sorghum. *European Food Research and Technology*, v. 245, n. 5, p. 1075–1080, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3207-0>.

RASHWAN, A. K., YOUNIS, H. A., ABDELSHAFY, A. M., OSMAN, A. I., ELETMANY,

M. R., HAFOUDA, M. A., & CHEN, W. Plant starch extraction, modification, and green applications: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01753-z>.

RASHEED, TAHIR; VATTATHURVALAPPIL, SUHAIL HYDER; SHAUKAT, MIAN MOBEEN; THERAVALAPPIL, RAJESH; ALI, USMAN; UMMER, ANIZ CHENNAMPILLY; SALEEM, MUHAMMAD TAHA BIN; JASEER, E. A.; IMRAN, MUHAMMAD. Recent updates on biodegradability and recyclability of bioplastics: Towards a new era in sustainability. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 41, p. e01051, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993724002318>. Acesso em: 22 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01051>.

RIBEIRO, I. S., MACIEL, G. M., BORTOLINI, D. G., FERNANDES, I. DE A. A., MAROLDI, W. V., PEDRO, A. C., RUBIO, F. T. V., & HAMINIUK, C. W. I. Sustainable innovations in edible films and coatings: An overview. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104272. (2024). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104272>

RIGOTTI, M., FACANALI, R., LIMA, L., APARECIDA, M., VIEIRA, R., CHISAKI, T., MATTOS, M., MAXIMILIANO, M., IMACULADA, M., ORTIZ, M., & MARQUES, M. Chemical and genetic diversity of *Baccharis dracunculifolia* DC. (Asteraceae) from the Cerrado biome. *Biochemical Systematics and Ecology*, v. 111, set. 2023, p. 104735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104735>.

SAMARADIVAKARA, S. P., SAMARASEKERA, R., TILLEKERATNE, L. M. V., HANDUNNETTI, S. M., WEERASENA, O. V. D. S. J., TAYLOR, W. R., ALHADIDI, Q., & SHAH, Z. A. Bioactivities of n-hexane fraction of *Vateria copallifera* and GC-MS analysis of its phytoconstituents. *Industrial Crops and Products*, v. 97, p. 87–92, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.011>.

SCHULZ, M., SERAGLIO, S. K. T., BRUGNEROTTO, P., GONZAGA, L. V., COSTA, A. C. O., & FETT, R. Composition and potential health effects of dark-colored underutilized Brazilian fruits – A review. *Food Research International*, v. 137, jun. 2020, p. 109744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109744>.

SEKI, Y., SELLI, F., ERDOĞAN, Ü. H., ATAGÜR, M., & SEYDIBEYOĞLU, M. Ö. A review on alternative raw materials for sustainable production: novel plant fibers. *Cellulose*, v. 29, n. 9, p. 4877–4918, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04597-4>.

SELVARAJ, S., CHAUHAN, A., DUTTA, V., VERMA, R., RAO, S. K., RADHAKRISHNAN, A., & GHOTEKAR, S. A state-of-the-art review on plant-derived cellulose-based green hydrogels and their multifunctional role in advanced biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 265, 2024, p. 130991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130991>.

SETTER, C., DIAS, M. C., MASCARENHAS, A. R. P., TONOLI, G. H. D., & DE OLIVEIRA, T. J. P. Effect of different pre-treatments on the redispersion capacity of spray-dried microfibrillated cellulose: Elaboration and characterization of biofilms. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 243, 2023, p. 125279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125279>.

SHAN, Q., YU, W., XU, Q., LIU, R., YING, S., DONG, J., BAO, Y., LYU, Q., SHI, C., XIA, J., TANG, J., KUANG, H., WANG, K., TIAN, G., & CAO, G. Detoxification and underlying mechanisms towards toxic alkaloids by Traditional Chinese Medicine processing: A comprehensive review. *Phytomedicine*, v. 129, 2024, p. 155623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2024.155623>.

SILVA, D. W., BATISTA, F. G., SCATOLINO, M. V., MASCARENHAS, A. R. P., DE MEDEIROS, D. T., DENZIN TONOLI, G. H., MENDES, L. M., DE SOUZA, T. M., & ALVES JUNIOR, F. T. Nanofibrillated pulps from Amazonian species as a potential raw material for ecological packaging. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, v. 39, n. 2, p. 241–257, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1515/npprj-2023-0089>.

SILVA, D. W., BATISTA, F. G., SCATOLINO, M. V., MASCARENHAS, A. R. P., DE MEDEIROS, D. T., TONOLI, G. H. D., LAZO, D. A. Á., CASELLI, F. DE T. R., DE SOUZA, T. M., & ALVES JUNIOR, F. T. Developing a biodegradable film for packaging with lignocellulosic materials from the Amazonian biodiversity. *Polymers*, v. 15, n. 17, 2023a. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15173646>.

SILVA, L. E., SIMSON, R., TORRES, L., HART-COOPER, W., CAO, T., KLAMCZYNSKI, A., GLENN, G., DE SENA NETO, A. R., WILLIAMS, T., WOOD, D., ORTS, W., & TONOLI, G. H. D. Sodium chloride and sodium dodecyl sulfate as additives to enhance dispersibility in microfibrillated cellulose. *Cellulose*, v. 30, n. 17, p. 10923–10934, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05555-4>.

SIMÕES, C. M. O. Capítulo 20. Alcaloides: generalidades e aspectos básicos. In: *Farmacognosia*, v. 128, n. 21, p. 4153–4164, 2020. Disponível em: <https://online.vitalsource.com/books/8582713655C020>.

SINDHU, R. K., GOYAL, A., ALGIN YAPAR, E., & CAVALU, S. Bioactive compounds and nanodelivery perspectives for treatment of cardiovascular diseases. *Applied Sciences*, v. 11, n. 22, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112211031>.

SINGH, A. K.; ITKOR, P.; LEE, Y. S. State-of-the-art insights and potential applications of cellulose-based hydrogels in food packaging: advances towards sustainable trends. *Gels (Basel, Switzerland)*, v. 9, n. 6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels9060433>.

SINGH, B., MAL, G., SHARMA, D., SHARMA, R., ANTONY, C. P., & KALRA, R. S. Gastrointestinal biotransformation of phytochemicals: towards futuristic dietary therapeutics and functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, v. 106, p. 64–77, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.022>.

SOTO, E. R., RUS, F., LI, H., GARCEAU, C., CHICCA, J., ELFAWAL, M., GAZZOLA, D., NIELSEN, M. K., URBAN, J. F., AROIAN, R. V., & OSTROFF, G. R. Yeast particle encapsulation of scaffolded terpene compounds for controlled terpene release. *Foods*, v. 10, n. 6, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10061207>.

SUL, Y.; KHAN, A.; RHIM, J.-W. Effects of coffee bean types on the characteristics of carbon dots and their use for manufacturing cellulose nanofibers-based films for active packaging of meat. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 43, p. 101282, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101282>.

TAGUCHI, H., SAKAGUCHI, M., & SHIMABAYASHI, Y. Trigonelline Content in Coffee Beans and the Thermal Conversion of Trigonelline into Nicotinic Acid during the Roasting of Coffee Beans. *Agricultural and Biological Chemistry*, 49(12), 3467–3471. (1985). <https://doi.org/10.1080/00021369.1985.10867295>

TAIZ, L., ZEIGER, E., MOLLER, I. MAX, & MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal: diversidade vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAN, Y., WU, P., YU, J., BAI, J., NIE, C., LIU, B., NIU, Y., FAN, G., & WANG, J. Stabilization of Pickering emulsions with bacterial cellulose nanofibrils (BCNFs) fabricated by electron beam irradiation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 94, p. 103664, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103664>.

TRAMONTINA, R., CIANCAGLINI, I., ROMAN, E. K. B., CHACÓN, M. G., CORRÊA, T. L. R., DIXON, N., BUGG, T. D. H., & SQUINA, F. M. Sustainable biosynthetic pathways to value-added bioproducts from hydroxycinnamic acids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 107, n. 13, p. 4165–4185, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12571-8>.

ULLAH, A., SUN, L., WANG, F., NAWAZ, H., YAMASHITA, K., CAI, Y., ANWAR, F., KHAN, M. Q., MAYAKRISHNAN, G., & KIM, I. S. Eco-friendly bioactive β -caryophyllene/halloysite nanotubes loaded nanofibrous sheets for active food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 35, p. 101028, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101028>.

VAN, T. T., HANG PHUONG, N. T., SAKAMOTO, K., WIGATI, L. P., TANAKA, F., & TANAKA, F. Effect of edible coating incorporating sodium carboxymethyl

cellulose/cellulose nanofibers and self-produced mandarin oil on strawberries. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 40, p. 101197, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101197>.

VELVIZHI, G., GOSWAMI, C., SHETTI, N. P., AHMAD, E., KISHORE PANT, K., & AMINABHAVI, T. M. Valorisation of lignocellulosic biomass to value-added products: paving the pathway towards low-carbon footprint. *Fuel*, v. 313, out. 2022, p. 122678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122678>.

VENTURA, C; PINTO, F; LOURENÇO, A F; FERREIRA, P J. T.; LOURO, H; SILVA, M J. On the toxicity of cellulose nanocrystals and nanofibrils in animal and cellular models. *Cellulose*, v. 27, n. 10, p. 5509–5544, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03176-9>. DOI:<10.1007/s10570-020-03176-9>.

VUČUROVIĆ D, BAJIĆ B, TRIVUNOVIĆ Z, DODIĆ J, ZELJKO M, JEVTIĆ-MUČIBABIĆ R, DODIĆ S. Biotechnological Utilization of Agro-Industrial Residues and By-Products—Sustainable Production of Biosurfactants. *Foods*. 2024; 13(5):711. <https://doi.org/10.3390/foods13050711>

WALIA, A.; GUPTA, A. K.; SHARMA, V. Role of bioactive compounds in human health. *Acta Sci. Med. Sci.*, v. 3, n. 9, p. 25–33, 2019.

WASEEM, M., MAJEED, Y., NADEEM, T., NAQVI, L. H., KHALID, M. A., SAJJAD, M. M., SULTAN, M., KHAN, M. U., KHAYRULLIN, M., SHARIATI, M. A., & LORENZO, J. M. Conventional and advanced extraction methods of some bioactive compounds with health benefits of food and plant waste: A comprehensive review. *Food Frontiers*, v. 4, n. 4, p. 1681–1701, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.296>.

WU, F.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*, v. 117, p. 101395, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101395>.

XU, E.; WANG, D.; LIN, L. Chemical structure and mechanical properties of wood cell walls treated with acid and alkali solution. *Forests*, v. 11, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11010087>.

ZAKY, A. A., AKRAM, M. U., RYBAK, K., WITROWA-RAJCHERT, D., & NOWACKA, M. Bioactive compounds from plants and by-products: novel extraction methods, applications, and limitations. *AIMS Molecular Science*, v. 11, n. 2, p. 150–188, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3934/molsci.2024010>.

ZHANG, S., ZHAO, X., HE, X., YANG, L., WANG, Y., LIU, F., WANG, C., HUA, Q., WU, Y., & LIU, Z. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for the biosynthesis of α -copaene from glucose. *Biochemical Engineering Journal*, v. 186, jul. 2022, p. 108561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108561>.

ZHAO, D., DENG, Y., HAN, D., TAN, L., DING, Y., ZHOU, Z., XU, H., & GUO, Y. Exploring structural variations of hydrogen-bonding patterns in cellulose during mechanical pulp refining of tobacco stems. *Carbohydrate Polymers*, v. 204, p. 247–254, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.024>.

ZHAO, Y., ZHANG, F., CHEN, M., LIU, F., ZHENG, B., MIAO, W., GAO, H., & ZHOU, R. Cellulose nanofibrils-stabilized food-grade Pickering emulsions: clarifying surface charge's contribution and advancing stabilization mechanism understanding. *Food Hydrocolloids*, v. 152, p. 109920, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109920>.

ZHOU, S., LI, N., PENG, H., YANG, X., & LIN, D. The development of highly pH-sensitive bacterial cellulose nanofibers/gelatin-based intelligent films loaded with anthocyanin/curcumin for the fresh-keeping and freshness detection of fresh pork. *Foods*, v. 12, n. 20, 2023a. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12203719>.

ZHOU, Y., LIU, R., ZHOU, C., GAO, Z., GU, Y., CHEN, S., YANG, Q., & YAN, B. Dynamically crosslinked chitosan/cellulose nanofiber-based films integrated with γ -cyclodextrin/curcumin inclusion complex as multifunctional packaging materials for perishable fruit. *Food Hydrocolloids*, v. 144, p. 108996, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108996>.

ZHU, H., WANG, R., CHENG, J.-H., & KEENER, K. M. Engineering pineapple peel cellulose nanofibrils with oxidase-mimic functionalities for antibacterial and fruit preservation. *Food Chemistry*, v. 451, p. 139417, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139417>.

ZHU, L., SHAN, W., WU, C., WEI, W., XU, H., LU, W., CHEN, J., SU, X., & KUANG, J. Ethylene-induced banana starch degradation mediated by an ethylene signaling component MaEIL2. *Postharvest Biology and Technology*, v. 181, p. 111648, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111648>.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 1: BARU (*Dipteryx alata* Vogel): FRUTO OU AMÊNDOA? UMA REVISÃO DA APLICABILIDADE PARA CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

*Artigo publicado na revista Food Chemistry Advance

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100103>

Gracieli de Miranda Monteiro ^{a *}, Elisangela Elena Nunes Carvalho^b, Eduardo Valério Barros Vilas Boas ^c.

^a School of Agronomy, Federal University of Goiás, 74690-900, Goiânia, Brazil.

^{b,c} Department of Food Science, Federal University of Lavras, 37200-000, Lavras, Brazil

Corresponding author: gracieli.nutri@gmail.com

RESUMO

Como tendência de mercado, as frutas nativas têm ganhado destaque, principalmente na mídia gastronômica, por seus sabores exóticos. São considerados frutos que integram produtos da sociobiodiversidade, portanto, sua exploração, valorização, reconhecimento e aceitabilidade aumentaram nos últimos anos. É aceito como matéria-prima renovável proveniente do Cerrado brasileiro. Seu reconhecimento é atribuído principalmente à sua única castanha, cujos potenciais nutricionais e funcionais estão associados a benefícios promotores da saúde. Erroneamente conhecida como simplesmente “baru”, a castanha do baru, compõe $\frac{1}{4}$ do fruto que é constituído por outras frações distintas: epicarpo (casca), mesocarpo (polpa) e endocarpo, material lenhoso, rico em celulose, hemicelulose e lignina que recobre e protege a castanha. Estudos recentes demonstram as demais frações do fruto são tão valiosas quanto a castanha, o que desperta o interesse científico. No entanto, são considerados resíduos e desperdiçados na cadeia produtiva estruturada de sua castanha. O epicarpo contém altos níveis de fibras e compostos fenólicos. O mesocarpo é composto por 70% de carboidratos, fonte de sacarose (23 g/100g), permitindo sua extração para obtenção de açúcar granulado. E, o endocarpo apresenta potencial na geração de biomassa, biocombustível e biochar que auxilia na redução da emissão de CO₂. Assim, conclui-se que o fruto baru, em sua integralidade, possui potencial tecnológico para aplicação na indústria alimentícia e áreas correlatas.

PALAVRAS-CHAVE:

Frutos Nativos

Compostos Bioativos

Capacidade antioxidante

Aplicações alimentícias

Resíduos agroindustriais

Agroecologia

1. Introdução

Em consonância com o movimento global de valorização da biodiversidade destaca-se neste trabalho a importância do fruto conhecido como baru (*Dipteryx alata* Vogel) contextualizado em seu habitat natural, o bioma Cerrado. O Cerrado, segundo maior ecossistema brasileiro, é considerado a região de savana tropical com a maior biodiversidade do mundo (Oliveira-Alves et al., 2020; Sawyer et al., 2018). Diante de sua magnitude, a riqueza diversificada de espécies do Cerrado é inquestionável, mas ainda subutilizada pelas comunidades locais, seja pela falta de conhecimento científico, seja pela falta de incentivos quanto a tecnologias e processos inovadores, o que leva ao mau aproveitamento de seu potencial produtivo (Oliveira et al., 2020; Lima et al., 2021a)

Outros atrativos e questões relevantes são indexados quando o assunto é baru, nesse contexto de frutos do Cerrado. Tais frutos possuem sabores especiais que ganharam destaque, principalmente, no meio gastronômico, o que tem levado ao aumento de sua exploração, valorização, reconhecimento e aceitação (de Oliveira et al., 2020), por uma sociedade cada vez mais criteriosa quanto ao tipo de alimento a ser consumido. Além dos atributos sensoriais exóticos, o baru, como outros frutos do Cerrado, apresenta potencial nutricional favorável à promoção da saúde (Lima et al., 2021), do qual atualmente é considerado pela indústria de alimentos como ingrediente funcional (de Oliveira Gonçalves et al., 2020). Possui composição química muito variada a depender da localização geográfica e variação climática, quanto aos teores de proteínas, lipídios, vitaminas, minerais, fibras, açúcares e compostos bioativos (de Oliveira et al., 2020).

Mesmo estando no ápice de grupos de pesquisas, o processamento e a comercialização do fruto são típicos de uma atividade extrativista, geralmente atrelada a agricultura familiar, associações e cooperativas (Lima et al., 2021; de Oliveira Gonçalves et al., 2020). Os estudos científicos são de grande importância social, uma vez que grupos populacionais específicos, como os indígenas, quilombolas e ribeirinhos, dependem dos recursos naturais do Cerrado para sua subsistência, atrelado à qualidade de vida. O baru é uma das muitas espécies nativas do Cerrado utilizadas popularmente de forma medicinal, como também são regularmente consumidas por moradores locais e vendidos nos centros urbanos (Sawyer et al., 2018).

Nesse sentido, nota-se atenção especial às espécies nativas, que além do seu papel na promoção da saúde, contribuem na preservação dos biomas naturais (Lima et al., 2021). Agregar valor às espécies nativas, aumenta seu valor comercial, que aliado ao seu potencial

nutricional vem despertando o interesse nacional e internacional (de Oliveira Gonçalves et al., 2020).

Os cientistas de alimentos têm se preocupado em desenvolver produtos que valorizem a matéria-prima (Lima et al., 2021) contribuindo para a busca de inovações tecnológicas da indústria de alimentos que proporcionem um desenvolvimento competitivo (de Oliveira et al., 2020).

Foi pensando na relevância do tema que este trabalho de revisão teve como objetivo promover e divulgar informações sobre o fruto do baru, cuja cadeia produtiva é baseada no extrativismo regional. Assim, essa cadeia produtiva se preocupa em desenvolver ações coordenadas para agregar valor comercial aos produtos derivados, utilizando tecnologias sustentáveis e inovadoras, e gerando fontes de renda para as comunidades locais. Portanto, este trabalho pretende estimular o desenvolvimento da agricultura familiar e de outras áreas produtivas das indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética.

Considerando que o fruto do baru possui relevância ambiental e nutricional, o objetivo do presente estudo foi levantar informações da literatura sobre o potencial tecnológico do fruto do baru e suas aplicações na área de pesquisa de alimentos.

2. Metodologia

Este estudo descritivo teve como estratégia de pesquisa e critérios delimitativos para seleção de trabalhos científicos a adoção de três termos ou palavras-chaves para fins de buscas de pesquisa, *Dipteryx alata Vog.*, baru e frutos do Cerrado. Escolha pelo nome científico e popular que são conhecidos e citados nas pesquisas nacionais e internacionais. Enquanto o termo, frutos do Cerrado engloba pesquisas com as demais frutas, além da inclusão de informações relevantes sobre o baru. Quanto ao período de publicação dos artigos, foi delimitado o quinquênio compreendido entre julho de 2015 a julho de 2021.

A pesquisa bibliográfica foi realizada no período de janeiro a julho de 2021 utilizando a base acadêmica disponibilizada por meio da Plataforma CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) (<https://www.periodicos.capes.gov.br/>), que mantém convênio com a Universidade Federal de Goiás (UFG) via Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), proporcionando acesso remoto a uma infinidade de bases acadêmicas nacionais e internacionais.

Para levantamento de publicações internacionais foram selecionadas três bases específicas de maior relevância na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos: ScienceDirect

(Elsevier); SCOPUS (Elsevier) e SpringerLink. Para publicações nacionais, os termos escolhidos foram inseridos diretamente na base de dados da CAPES, local busca de assuntos.

As publicações selecionadas foram classificadas de acordo com a fração avaliada do baru, sendo elas castanhas, epicarpo, mesocarpo e endocarpo. Posteriormente, os trabalhos foram avaliados quanto à sua relevância para área de Ciência e Tecnologia de Alimentos.

3. Baru (*Dipteryx alata* Vog.)

Para um melhor entendimento do contexto de aplicabilidade do baru (fruto) e estudos atuais, é necessário um prévio conhecimento dos aspectos botânicos, culturais e ecológicos, que impactam de maneira expressiva o potencial de expansividade comercial deste produto.

O nome baru é usado vulgar e intercambiavelmente para designar o fruto, a árvore e a castanha do baru. Esse termo deveria ser reservado apenas ao fruto. O fato da exploração prioritária do fruto se dar por meio da comercialização da castanha do baru, e os demais componentes ainda não serem tão apreciados e valorizados, tornou popular a identificação “baru” à designação da castanha.

Utiliza-se o termo barueiro para identificar a árvore do baru. Seu nome científico é *Dipteryx alata* Vog., que é uma espécie arbórea, frutífera pertencente à família Fabaceae (Egea & Takeuchi, 2020). Está distribuída principalmente no Cerrado, nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, além de Venezuela, Costa Rica e Panamá (Niedack et al., 2021). O nome popular baru é adotado nos Estados de Goiás, Tocantins, Minas Gerais e Distrito Federal, mas pode sofrer variação para cumaru ou cumbaru em São Paulo, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (SANO et al., 2004)

Essa árvore (**Figura1**) pode atingir de 5 a 10 m de altura, algumas alcançam vinte metros na idade adulta (Carvalho, 2003) . Ela floresce de novembro a maio e produz frutos de julho a outubro (Sano et al., 2004; Reis & Schmiele, 2019).

Uma árvore adulta produz cerca de 150 kg de frutos por safra produtiva, podendo intercalar uma safra produtiva a cada dois anos (Carrazza & Avila, 2010). Isso sugere a bienalidade da espécie, fenômeno comum em muitas plantas que utilizam o ano subsequente ao da safra produtiva para recuperação da energia gasta na frutificação. Assim, deparamos com o primeiro desafio para utilização desse fruto em escala comercial, pois ele tem característica de sazonalidade, com safra intermitente e, conseqüentemente, variações bruscas de intensidade de produção de frutos de um ano para o outro.



Figura 1. Barú (*Dipteryx alata* Vog.) da região Noroeste de Minas Gerais.

Fonte: Dos autores, 2022

Quanto às características botânicas do fruto, ele é classificado como drupa monospermica, indeiscente, geralmente ovóide, com alguns frutos de forma não bem definida, fibroso e com coloração podendo variar de bege-escuro e marrom-claro (Sano et al., 2004; Alves-Santos et al., 2021), a marrom avermelhado, opaco. Sua superfície é irregular apresentando algumas depressões e textura áspera; com ápice arredondado, base que se liga ao pecíolo estreita, com um dos lados apresentando-se levemente achatado (Carvalho, 2003; Silva et al., 2021). As dimensões expressam uma média de comprimento próximo a 52 mm; largura de 38 mm e espessura de 29 mm, com massa entre 26 a 40 g (Alves-Santos et al., 2021; Martins et al., 2017).

O baru abriga no seu interior uma única castanha ou semente, podendo ser denominado noz verdadeira (Morais et al., 2021; Oliveira-Alves et al., 2020). Sua castanha é a principal parte comercializada e explorada do fruto (Egea & Takeuchi, 2020) representando apenas 5% do seu peso total (Martins, et al., 2017). A cor da castanha varia de creme a branco, sendo envolvida por uma película castanha escura (Silva et al., 2021). Essa película apresentou 10%

do total de compostos fenólicos do fruto e alta capacidade antioxidante quando consumida juntamente com a castanha (Da Silva et al., 2020)

O epicarpo (casca), mesocarpo (polpa) e endocarpo estão ganhando espaço nas pesquisas científicas, principalmente no reaproveitamento de resíduos e sua transformação em subprodutos (Rambo et al., 2021). Pelo contexto ambiental, a utilização desses produtos poderia ser repensado no controle de desperdício, uma vez que retirada à castanha, restam 95% do fruto, que a recobrem e protegem.

A casca, ou epicarpo, compõe uma fina camada que tem contato direto com o meio externo, sendo responsável pela coloração marrom-clara do fruto, composta por elevada quantidade de fibras (Santiago et al., 2018). Já a polpa, ou mesocarpo, é composta por mais de 70% de carboidratos com predominância para os açúcares (23 g/100g) (Egea & Takeuchi, 2020), considerado uma camada fibrosa (Alves-Santos, et al., 2021), adocicada (Santiago et al., 2018) e comestível (Gadioli et al., 2021). O endocarpo lenhoso recobre e protege a castanha (Carrazza & Avila, 2010) e é conhecido por ser extremamente duro e amadeirado, devido a presença de celulose, lignina e hemicelulose, e mais escuro que o mesocarpo (Egea & Takeuchi, 2020). Dados sobre as características físicas da casca e da polpa do baru, como massa e rendimento, são escassos na literatura (Alves-Santos, et al., 2021). A **Figura 2** retrata o fruto baru inteiro, com frações evidentes pelo corte transversal, e a castanha do baru com e sem película.

3.1 O baru em destaque entre os frutos do Cerrado

Considerado um hotspot de biodiversidade do mundo, o Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, depois da floresta amazônica (de Almeida et al., 2019) apresentando grande diversidade de frutos com cores e sabores exóticos (Gadioli et al., 2021), que possuem grande valor nutricional e potencial funcional (de Oliveira Gonçalves et al., 2020) atribuído, principalmente, aos compostos bioativos com alta capacidade antioxidante (M. C. de Oliveira et al., 2020) e com irrefutável apelo à saudabilidade.

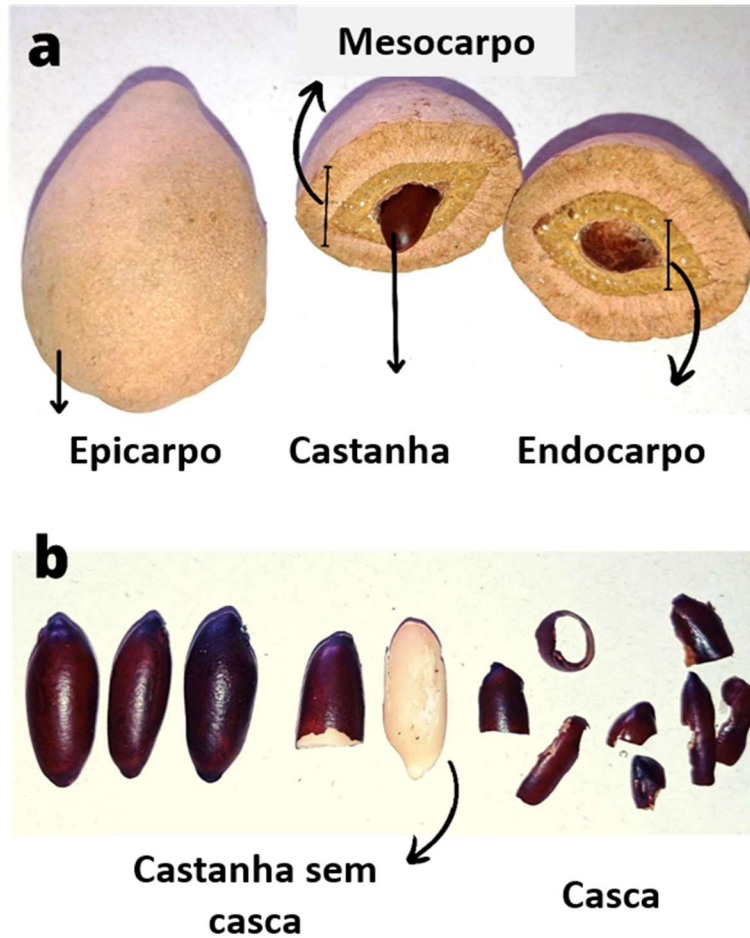


Figura 2. Fruto do baru inteiro, corte transversal (a); castanhas com e sem casca (b).
Fonte: arquivo pessoal dos autores.

O potencial nutricional, funcional e sensorial do baru vai ao encontro dos anseios e expectativas do mercado consumidor que está cada vez mais decidido a consumir produtos naturais e funcionais, o que leva as frutas nativas a serem valorizadas e reconhecidas pela sociedade (de Oliveira et al., 2020). Há registros do consumo tradicional pela população local, além da grande potencialidade para utilização na indústria alimentícia devido aos atrativos de aspectos sensoriais e tecnológicos que interessam ambas as partes, consumidores e indústria de alimentos (de Almeida et al., 2019). Conciliar os atuais interesses de um mercado consumidor mais exigente é o grande desafio à indústria de alimentos, principalmente na área de desenvolvimento de novos produtos a fim de torná-los apreciáveis, saudáveis, dentro de uma prolongada vida útil do produto (Reis & Schmiele, 2019).

Ressalta-se que as pesquisas com frutos nativos têm grande importância econômica e social para o extrativismo regional (de Oliveira Gonçalves et al., 2020). O conhecimento científico de novas fontes de nutrientes atribuídas aos frutos regionais incentiva seu uso pelas

indústrias farmacêutica e alimentícia (Leite et al., 2020). Tais informações englobam potencial exploratório nacional e internacional que desperta o interesse do consumidor e contribui para a busca por inovações (de Oliveira et al., 2020), que podem ser o diferencial na formulação de novos produtos (Reis & Schmiele, 2019).

O baru, assim como outros frutos nativos do Brasil, tem ganhado destaque nas pesquisas científicas devido ao seu papel de agregação de valor comercial, que aliado ao seu potencial nutricional (de Oliveira et al., 2020) e funcional, pode viabilizar muitas aplicações na indústria alimentícia em busca de inovações tecnológicas. Sua relevância nas pesquisas científicas é constatada ao se indexar o termo baru com assuntos como fruto nativo do Cerrado brasileiro (de Almeida et al., 2019), semente comestível (Egea & Takeuchi, 2020), noz verdadeira (Oliveira-Alves et al., 2020), árvore de reflorestamento (Antunes et al., 2020) entre tantos outros discutidos ao longo deste artigo.

Seu destaque relaciona-se principalmente pelo potencial econômico vislumbrado pela sua versatilidade evidenciada nos estudos aplicados na alimentação, forragem, medicina, recuperação de áreas degradadas, paisagismo, extração de madeira (Antunes et al., 2020), assim como potencial de aplicação em diversos ramos da indústria por meio do aproveitamento de resíduos da polpa e endocarpo (Rambo et al., 2021).

3.2 Trajetória da agroecologia na cadeia produtiva do baru

Sob a ótica das perspectivas e desafio da produção e exploração do baru, essa espécie, assim como outros frutos do Cerrado precisam superar diversos obstáculos, o principal é o desmatamento do cerrado (Forbes, 2019). Com a intensificação das atividades humanas acelerando o uso e a exploração dos recursos naturais, tem ocorrido o desaparecimento e a fragmentação dos ecossistemas, entre eles o cerrado, acarretando grandes perdas de biodiversidade (Valadão et al., 2018; Cardoso e Nogueira, 2021).

Num bioma caracterizado pela presença de comunidades extrativistas, indígenas, quilombolas e de pequenos produtores agroextrativistas, dentre tantas outras que vêm conservando, de forma efetiva, grandes áreas naturais por gerações e gerações; é preciso perceber e valorizar a pequena produção familiar e o extrativismo como aliados da conservação e as populações do Cerrado como seus verdadeiros guardiões (Lobo e Sawyer, 2022). Por isso, ao propor a utilização racional dos recursos naturais, entre eles a exploração do baru, é importante compreender e valorizar atividades econômicas que praticam a sustentabilidade

(Valadão et al., 2018), incorporando os atores envolvidos no processo, buscando a equidade social e proteção ambiental (Hespanhol, 2008).

Nesse sentido, destaca-se a agroecologia que é uma alternativa de agricultura familiar, baseada nos princípios da sustentabilidade. Esses princípios, conceitos e metodologias permitem o planejamento de uma produção de alimentos de alta qualidade ao mesmo tempo em que mantém a produtividade da terra, respeita a natureza, amplia a diversidade de produtos para o consumo da família e do mercado e gera mais renda para os agricultores (Copabase, 2022). A agricultura verdadeiramente de base ecológica não pode se restringir apenas à preocupação ambiental, sendo fundamental incorporar outras dimensões, como a social, a econômica, a cultural, a política e a ética (Hespanhol, 2008).

A agroecologia abrange todo o sistema alimentar, desde o extrativismo, a produção, a comercialização, até o consumo. Cria sistemas autossuficientes, saudáveis e sem poluição, oferecendo alimentos seguros, acessíveis e variados (CEPF, 2022).

A Cooperativa Regional de Agricultura Familiar e Extrativismo (<https://www.copabase.org/>) demonstrou dados otimistas de produtividade e inovação apresentados no relatório da organização não governamental - *Critical Ecosystem Partnership Fund* (CEPF) (<https://www.cepf.net/>). Eles utilizaram uma ferramenta conceituada de Análise de Retorno Social de Investimento (SROI) para elaboração dos dados. A promoção da agroecologia nas diversas cadeias agroalimentares, inclusive a cadeia prioritária da região que é a castanha do baru, oferecem vantagens competitivas se aplicadas no modelo produtivo da agricultura familiar alicerçado na agroecologia (CEPF, 2022).

Dentre os resultados de destaques nesse case de sucesso a CEPF (2022) cita: diminuição do analfabetismo, diversificação da produção e aumento de renda do produtor, inclusão de mulheres na atividade produtiva, recuperação de nascentes, aumento de árvores nativas nas propriedades. Dados de cálculos de monetização de custos da recomposição de hectares do cerrado, monetização de toneladas de CO² sequestrados em decorrência de hectares da mata nativa recuperada, entre outros parâmetros, citam que o valor do retorno social ambiental se aproximou de R\$ 37.634.959,75. Este valor representa o período de 2013-2021 em relação ao funcionamento da cooperativa e pelo boom da conversão da agricultura convencional para agroecologia. Em dólar esse valor aproxima-se a US\$ 263.444.718,30.

A exploração comercial da castanha do baru acontece em diversas comunidades espalhadas no Brasil, com uma produção que evolui continuamente conforme dados divulgados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), órgão responsável pela gestão das

políticas agrícolas do Brasil que está vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

A castanha do baru está inserida oficialmente no grupo de produtos da sociobiodiversidade do Brasil (Conab, 2022). Conforme dados apresentados pela Companhia de Abastecimento na série histórica de custos de produção da castanha do baru (2010 -2021), apenas quatro empreendimentos que comercializam a castanha de baru foram monitorados no período. Sendo três da região de Goiás (GO) e um da região de Mato Grosso (MT), que somaram uma produção média de castanha de baru variando de 375 kg a 1 tonelada/safra/produção, a depender da unidade produtiva, que correspondem ao valor de custo de produção entre R\$ 5.003,31 a R\$ 10.169,77, respectivamente. O preço do produto sofreu muitas alterações no período, mas em 2022 o preço mínimo para comercialização foi estipulado em R\$ 26,68/kg, calculado com base no preço fixado pela Portaria N° 376 (2021) conforme diretrizes da Política de Garantia de Preços Mínimos para Produtos da Sociobiodiversidade (PGPM-Bio).

Quanto aos subprodutos do baru, até onde se tem conhecimento, apenas a polpa (mesocarpo) é comercializada e exportada para EUA através da empresa alimentícia Barùkas, uma multinacional que tem sede em Carlsbad, Califórnia (FORBES, 2019). Ela exporta um mix traill que inclui tiras desidratadas da polpa (mesocarpo) do fruto. O cofundador da empresa, Darin Olien, citou em sua entrevista a Forbes que sonha em reflorestar o ecossistema regional com árvores de baruzeiro e criar uma fonte de subsistência para as populações locais que colhem e vivem do produto que leva o nome de sua empresa.

3.3 Aplicações da castanha de baru na ciência e tecnologia de alimentos

A castanha do baru é, notoriamente, a porção mais valorizada do fruto. Muito apreciada na culinária de grandes chefes, ela tem sido amplamente investigada (Egea & Takeuchi, 2020). Seu potencial nutricional e apelo funcional têm sido destacados. Ela é considerada um alimento fonte de proteínas com perfil de aminoácidos desejável e essencial (Fernandes et al., 2010), rica em ácidos graxos monoinsaturados totais associados a baixos índices trombogênicos e aterogênicos (Campidelli, et al., 2020a), cálcio, ferro, zinco e compostos bioativos com atividade antioxidante, como fenólicos, fitatos e taninos, além de compostos antiproliferativos (Oliveira-Alves et al., 2020). Juntamente com pequi, o baru se destaca pela alta atividade antioxidante, entre os frutos do Cerrado (de Oliveira et al., 2020). Seu papel na saúde humana foi revisado no trabalho de Alves-Santos et al. (2021).

A Tabela 1 resume, em ordem cronológica, 30 artigos publicados durante 2016–2021 em revistas científicas de alto impacto, compilados através das bases de dados mais relevantes para as áreas de pesquisa da Ciência e Tecnologia de Alimentos. Esses artigos ressaltam a importância da castanha de baru.

Tabela 1. Pesquisa bibliográfica sobre castanhas do baru no período de 2016-2021 na área de ciência e tecnologia de alimentos.

ANO	APLICAÇÃO TECNOLÓGICA E PRODUTOS	AUTOR	CLASSIFICAÇÃO
2021	1. Barrinha de cereal mista de castanhas.	Lima et al.	B
	2. Bebidas fermentadas simbióticas.	Costa Fernandes et al.	D
	3. Bebida fermentada (probiótico e amido de banana verde).	Coutinho et al.	D
	4. Extração de óleo de sementes de Baru.	Chañi-Paucar	E
	5. Espectroscopia para avaliar fraudes em óleos vegetais de alto valor comercial.	Nascimento et al.	A
2020	6. Bioacessibilidade <i>in vitro</i> do Cu, Fe, Mn e Zn na polpa da castanha do baru.	de Oliveira Gonçalves et al.	A
	7. Cremes de cacau suplementados com castanhas de baru.	Campidelli et al. (a)	B
	8. Bebida vegetal mista de castanhas.	Silva et al.	D
	9. Efeito de secagem sobre propriedades nutricionais da castanha do baru.	Campidelli, et al. (b)	A
	10. Otimização de extração de compostos fenólicos com destaque para película do baru.	Da Silva et al.	A
2019	11. Identificação de compostos funcionais em nozes de baru.	Oliveira-Alves et al.	A
	12. Caracterização espectroscópica e comportamento térmico dos óleos vegetais de noz de baru.	Alarcon et al.	A
	13. Sobremesas lácteas com baru regula o trânsito gastrointestinal em ratos.	Cruz et al.	B
	14. Características e potencialidades dos frutos do Cerrado na indústria de alimentos.	Reis e Schmiele	C
	15. Maionese formulada com sementes de chia microencapsuladas, sementes de abóbora e óleo de baru.	Rojas et al.	B
2018	16. Determinação e análise da cinética de secagem da farinha integral e desengordurada.	Reis et al.	A
	17. Comparação das amêndoas com polpa e casca do baru.	Santiago et al.	A
	18. Cupcakes com baixo teor de gordura a partir da farinha de baru.	Paglarini et al.	B
	19. Extração de óleo de semente de baru usando tecnologia de solventes comprimidos.	Fetzer et al.	E
	20. Emulsão de fase gel lamelar contendo óleo de baru.	Moraes et al.	B
2017	21. Cookies a partir da torta de baru após extração do óleo.	Caetano et al.	B
	22. Isolado proteico da castanha de baru a partir da farinha de baru desflatada.	Nunes et al.	B
	23. Características físicas do fruto do baruzeiro visando a extração da amêndoa.	Martins et al.	A
	24. Bebida fermentada saborizada.	Fiorante et al.	D
	25. Qualidade química do óleo da amêndoa como substituto ao óleo de soja e azeite.	Siqueira et al.	A
2016	26. Sementes comestíveis e nozes nativas do <i>Cerrado</i> com perfil de ácidos graxos semelhante ao das oleaginosas tradicionais.	Alves et al.	C
	27. Revisão de fruto do Cerrado – indicação da castanha como ingrediente funcional para indústria de alimentos.	de Andrade Silva & Fonseca	C
	28. Extração de óleo assistido por ultrassom.	Santos et al.	E
	29. Preparação e caracterização de poliuretano com diferentes quantidades de óleo de baru	De Almeida et al.	B
	30. Qualidade nutricional de barras de chocolate adicionadas de castanhas de baru.	Correa et al.	B

Classificação baseada no foco de publicação: composição e propriedades nutricionais (A)/desenvolvimento de novos produtos (B)/revisão de literatura de frutas do Cerrado/amêndoas de baru (C)/bebidas hidrossolúveis (D)/métodos de extração de óleo (E).

Com base nos trabalhos publicados, foram anotados trending topics e temas. Dessa forma, as publicações foram classificadas em cinco categorias (A–E): grupo A: dados referentes à composição e propriedades nutricionais da amêndoa de baru; grupo B: estudos que exploram o desenvolvimento de produtos obtidos a partir de amêndoas ou torta após extração de óleo; grupo C: revisões de literatura sobre frutos do Cerrado, incluindo dados sobre amêndoa de baru; grupo D: desenvolvimento de bebidas hidrossolúveis extraídas da amêndoa de baru; grupo E: metodologias e técnicas de extração de óleo de amêndoa de baru. Em particular, os artigos focados em composição química (grupo A) e desenvolvimento de produtos (grupo B) representaram grande proporção das publicações (10 artigos cada, 33,33%).

Entretanto, como as publicações sobre composição química não são o foco da presente revisão, trabalhos sobre a composição química da castanha de baru e de outras frutas do Cerrado não são discutidos aqui. O Grupo B incluiu publicações sobre a aplicação da amêndoa de baru como ingrediente substituto em receitas tradicionais, que originalmente utilizavam outras sementes oleaginosas, como castanhas, nozes ou amendoim. Especificamente, destacamos o desenvolvimento de barras proteicas comestíveis contendo amêndoas de baru (Lima et al., 2021b) que geralmente são formuladas com nozes convencionais e creme de cacau (Campidelli et al., 2020) estas barras são hoje muito populares e amplamente aceitas na gastronomia em comparação com a formulação original contendo avelãs.

Nos artigos do grupo D, o uso de amêndoas de baru no preparo de bebidas hidrossolúveis é justificado com base em aspectos nutricionais comprovados benéficos observados após a incorporação ou substituição de outros ingredientes em produtos alimentícios por essas amêndoas. Nesse sentido, Lima et al. (2021) comprovou que as barras alimentícias com baru apresentaram alta concentração de proteínas, minerais K, Mn e Zn, além de fenólicos totais (1171,95 mg GAE/100g), dentre outros compostos bioativos e atividade antioxidante (185,64 mcg Trolox/g). A menor atividade de água nos produtos com maior concentração de baru foi um aspecto tecnológico de destaque, uma vez que quanto menor a atividade de água, maior a vida útil do alimento, aspecto de alto impacto para indústria alimentícia. Campidelli et al. (2020 a) evidenciou o aumento significativo das concentrações dos minerais Ca, Mg, S, Mn, predomínio do ácido oléico (57,85g/100g) entre os MUFA, além da presença de vitamina C (24,37 mg/100g) em cremes de cacau com baru. A combinação de amêndoas de baru com cacau já tinha sido estudada no trabalho de da Cruz et al. (2019). Esses autores desenvolveram uma sobremesa láctea com atividade antioxidante semelhante à amêndoa do baru in natura, ou até superior, com valor 3.513 mg GAE/kg (método FRAP), resultado superior ao método ABTS –

639 mg GAE/kg. Os autores sugeriram que a combinação desses dois ingredientes ricos em compostos fenólicos contribuíra para elevada atividade antioxidante dos produtos.

Além disso, Paglarini et al. (2018) e Rojas et al. (2019) desenvolveram maionese e cupcakes, com apelo funcional, por meio da incorporação de óleo e farinha integral de amêndoa de baru, respectivamente. Tanto as funcionalidades quanto a aplicabilidade tecnológica foram atribuídas ao perfil de ácidos graxos da amêndoa de baru. A proporção dos diferentes compostos lipídicos com alto teor de insaturação (MUFA), a presença, mesmo que em menor concentração, de ácidos graxos SFA, e a inexistência de ácidos graxos *trans* na farinha de amêndoas contribuíram para exitosa aplicação tecnológica na substituição parcial ou total da gordura convencional em produtos de panificação (Paglarini et al., 2018). Observou-se elevada eficiência de encapsulação do óleo de chia, abóbora e baru para enriquecimento de maionese. Essa afinidade entre os compostos lipídicos foi justificada devido à natureza hidrofóbica do ácido esteárico, um ácido graxo saturado com os demais ácidos graxos, MUFA e PUFA. Importante citar que, isoladamente, o óleo da amêndoa de baru apresentou maior concentração de ácido oleico 42,42%, incidindo no destaque dos ácidos graxos monoinsaturados (MUFA) 45,10% (Rojas et al., 2019).

Quanto aos aspectos tecnológicos relacionados ao perfil diferenciado e a afinidade entre os ácidos graxos do óleo de baru, pesquisadores propuseram desenvolver uma emulsão de fase lamelar, conhecido como sistema coloidal, utilizados como veículos de medicamentos e agentes cosméticos à pele (Moraes et al., 2018). O óleo de baru possui níveis consideráveis de compostos fotoquimicamente ativos, tocoferóis e fitoesteróis (Rojas et al., 2019), sobrepujando outros óleos vegetais amplamente utilizados, com vistas a facilitar a permeação de moléculas ativas na absorção cutânea. Os autores destacaram excelentes capacidades de solubilização da emulsão para ingredientes ativos lipofílicos e hidrofílicos, garantindo a alta aplicabilidade do produto (Moraes et al., 2018). Condição parecida foi citada no estudo de Nunes et al. (2017) que testaram um isolado proteico obtido a partir da torta desengordura da amêndoa de baru, indicando o produto para fins de formulações em alimentos gordurosos devido à sua boa capacidade de absorver e emulsionar óleos, formando espumas estáveis em pH moderadamente ácido a neutro.

Embora alguns dos estudos anteriores mencionados acima utilizassem óleo de baru comercial adquirido nos mercados locais, outros (por exemplo, Caetano et al. (2017) extraíram o óleo durante experimentos. Especificamente, em estudo anterior, foram elaborados biscoitos contendo farinha de amêndoa de baru desengordurada. O foco nutricional desse estudo foi o rico perfil de aminoácidos dos biscoitos proporcionado pela torta de semente de baru

desengordurada utilizada na preparação do produto. Enquanto isso, em outros estudos, a torta de semente de baru desengordurada foi utilizada para explorar o aspecto protéico da amêndoa de baru. Por exemplo, Nunes et al. (2017) produziram proteínas isoladas e Fetzer et al. (2018) extraíram o óleo da amêndoa de baru usando a técnica fluido supercrítico (SFE) com solventes pressurizados (propano e dióxido de carbono (CO₂) + etanol). Ambos afirmaram que os resíduos da torta de amêndoa do baru são subprodutos de alto valor nutricional, apresentando relativamente baixo ou mesmo nenhum traço de solventes remanescente. Assim, esses resíduos podem servir como fontes potenciais de proteínas e minerais.

Em relação aos métodos e técnicas eficientes para extração do óleo de amêndoa de baru, três estudos do grupo E aplicaram SFE para recuperar grandes quantidades de óleo de baru, melhorando o rendimento do produto final. Anteriormente, diversas técnicas foram implementadas para otimizar a extração de óleo vegetal em termos de rendimento, recuperação final ou mesmo melhoria das características físico-químicas e composição de ácidos graxos. No geral, a SFE é uma “tecnologia verde” atraente que utiliza CO₂, um solvente não tóxico, não inflamável e inerte.

Dos Santos et al. (2016) conciliaram a SFE com ultrassom avaliando as variações de temperaturas e pressão. A melhor condição de operação do SFE em termos de rendimento global foi a 35 Mpa e 40°C com valores de 22,8 % de óleo. Apesar do aumento da taxa de extração, o uso do ultrassom em experimentos de SFE não afetou a composição de ácidos graxos do óleo de baru. Houve um aumento da solubilidade dos ácidos graxos em CO₂ supercrítico com aumento da pressão devido ao alto poder de solvatação. Os autores ainda citam a vantagem da utilização da técnica SFE para obtenção de ácidos graxos de baru em vez de técnicas convencionais como os métodos Soxhlet e Bligh e Dyer. Em contrapartida, Fetzer et al. (2018) apresentaram os melhores rendimentos de extrações com etanol e hexano, utilizando o método de Soxhlet, alcançando rendimentos de 46,18% e 39,76% de óleo de baru, respectivamente. O percentual de lipídios parece alto quando se nota na literatura valores médios em torno de 24,2% (de Oliveira Gonçalves et al., 2020) e 41,69% (Lima et al., 2021). Entretanto, Coutinho et al. (2021) encontraram 47,50% de lipídios na amêndoa de baru, mas não relatam qual o método foi utilizado. Sobre a técnica de extração de óleo com solvente comprimido e adição de etanol como co-solvente, Fetzer et al. (2018) citam que os extratos gerados a partir de etanol são particulares devido à sua polaridade miscível, em relação ao produto obtido com CO₂ puro, que é apolar. O etanol está em evidência nos estudos por ser um solvente de baixa toxicidade, utilizado para extrair diversos tipos de compostos, inclusive compostos bioativos, como foi citado no experimento de da Silva et al. (2020), que otimizou a

extração de compostos fenólicos totais e capacidade antioxidante da amêndoa de baru com casca na proporção relação sólido-solvente (79% etanol/2 mg mL⁻¹) a 85 °C.

Chañi-Paucar et al. (2021) utilizaram SFE assistida por prensagem a frio (SFEAP) para extrair óleo de baru e obtiveram rendimento de até 29% a 350 bar e 45°C. É digno de nota que as condições operacionais, como temperatura e tamanho de partícula, que impactam significativamente o rendimento do óleo extraído, diferiram entre os estudos do grupo E. No geral, o SFEAP pode ser uma alternativa promissora para uso em escala industrial devido aos altos rendimentos de extração e baixo CO₂ consumo (fluxo = 7 g·min⁻¹).

As bebidas hidrossolúveis, associadas ao conceito de proteínas vegetais, têm se difundido (Bocker & Silva, 2022). Coerente com essa tendência de mercado, quatro publicações do grupo D destacaram bebidas hidrossolúveis à base de amêndoa de baru. Segundo a (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2005), as bebidas vegetais são definidas como extratos vegetais hidrossolúveis, considerados produtos alimentícios obtidos a partir de partes proteicas de espécies vegetais. Esses produtos podem apresentar-se na forma de grânulos, pó, líquidos ou outras formas, exceto os não convencionais para alimentação. Além disso, esses produtos podem ser adicionados de outros ingredientes, desde que não alterem a cor do produto.

Fioravante et al. (2017) foram os pioneiros em desenvolver uma bebida fermentada a partir da amêndoa do baru. A bebida foi aromatizada com ameixa e estabilizada com hidrocoloides carboximetilcelulose (CMC) e goma xantana. Silva et al. (2020) utilizaram o mesmo estabilizante, CMC, a fim de avaliar a reologia de uma bebida à base de castanha-do-Brasil e amêndoa do baru. Ambos utilizaram o CMC, um aditivo alimentar da classe funcional espessante, INS 468. Os agentes espessantes são utilizados para dispersar, estabilizar ou evitar a sedimentação de substância em suspensão (Codex, 2019). A estabilidade do produto é considerado um dos principais problemas enfrentados pela indústria alimentícia, uma vez que a desestabilização dessas interfaces pode alterar as propriedades sensoriais e consequentemente comprometer a aceitabilidade do produto (Silva et al., 2020). Constatado que este se tratava de um desafio na elaboração das bebidas hidrossolúveis de amêndoa de baru, Costa Fernandes et al. (2021) e Coutinho et al. (2021) apresentaram alternativas para estabilização da bebida em substituição ao aditivo alimentar CMC. Costa Fernandes et al. (2021) apresentaram uma bebida fermentada de baru simbiótica adicionada com probiótico *Lacticaseibacillus casei* e prebiótico inulina com viscosidade e propriedades funcionais potencializadas. A adição da inulina afetou positivamente a consistência do produto atendendo a expectativa dos consumidores. Já Coutinho et al. (2021) ajustaram a textura da bebida fermentada hidrossolúvel de baru com a

adição de 4,5% de amido de banana verde garantindo sua aceitação junto aos consumidores do teste sensorial.

Em conjunto, a discussão acima demonstra que a relevante qualidade nutricional dos frutos de baru se reflete em produtos saudáveis, confirmando que a matriz alimentar desempenha um papel essencial nas interações químicas que refletem diretamente no valor nutricional e no potencial dos produtos finais desenvolvidos. A partir desses dados fica evidente a relevância e consolidação da amêndoa de baru, evidenciando as possibilidades de suas aplicações na ciência e tecnologia de alimentos.

3.4 Epicarpo, mesocarpo e endocarpo: resíduo, subproduto ou coproduto?

Após a extração da amêndoa, quase 95% do fruto, composto por epicarpo, mesocarpo e endocarpo, é desperdiçado (Martins et al., 2017), o que chama a atenção para oportunidades de melhor aproveitamento do fruto inteiro. Segundo alguns autores, essas partes remanescentes do fruto do baru são resíduos ou subprodutos do processamento (Ferreira et al., 2020; Morais et al., 2021). As pesquisas sobre as aplicações desses componentes e avaliação de seu potencial tecnológico permanecem em fase de investigação, como evidenciado pelo notável aumento no número de publicações relevantes em 2021. Portanto, a classificação dessas frações como resíduo pode mudar após novos avanços de pesquisas e as inovações são apresentadas pelos 13 artigos publicados sobre este tema durante 2016–2021 (Tabela 2).

Apesar disso, as publicações sobre a utilização dessas frações de baru são escassas na literatura, abrindo novos caminhos de pesquisa. A maioria dos estudos realizados trata da avaliação nutricional, das propriedades bioativas e da capacidade antioxidante do mesocarpo do baru (da Silva et al., 2021) que são comparáveis à sua amêndoa (Santiago et al., 2018).

À luz das atualizações recentes sobre o tema, as diferenças geográficas e condições ambientais podem afetar significativamente a composição e propriedades físico-químicas do mesocarpo do baru (Gadioli et al., 2021). Da Silva et al. (2021) encontraram variações bruscas nos resultados de composição centesimal e compostos bioativos da polpa de baru, discrepâncias que ultrapassam 100% de diferença entre os macronutrientes e compostos fenólicos (Tabela 3) - APÊNDICE. Com foco do estudo nos compostos fenólicos e metabólitos secundários, especificamente taninos, os valores de 19,61-22,61 mg/GAE/100g e 2,41-3,29 mg CAE/100g, respectivamente, foram considerados altos nesse estudo, mas não superaram os achados de Gadioli et al. (2021) para os mesmos compostos, fenólicos e taninos.

Tabela 2. Pesquisa bibliográfica sobre epicarpo, mesocarpo e endocarpo de baru no período de 2016-2021 com aplicação na área de ciência e tecnologia de alimentos.

ANO	APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS E PESQUISAS	AUTOR	CLASSIFICAÇÃO
2021	Potencial nutricional e efeito do solvente na extração de compostos bioativos da polpa e da casca do baru	Da Silva et al.	A
	Propriedades Nutricionais, Antioxidantes e Cristalização da sacarose do Mesocarpo de Baru	Gadioli et al.	B
	Fruta baru opção de noz e polpa com propriedades nutricionais e funcionais vantajosas	Alves- Santos et al.	C
	Monitoramento químico bebida alcoólica fermentada com polpa de baru	Silva et al.	B
	Influência das temperaturas de secagem nas características físico-químicas da polpa do baru	Morais et al.	A
	Estudo comparativo dos produtos da pirólise de resíduos sugerindo aplicação da biomassa do baru em vários ramos da indústria, inclusive como biocombustível.	Rambo et al.	D
	Caracterização físico-química, compostos bioativos e correlações em frutos nativos de oeste do Mato Grosso do Sul	De Oliveira et al.	A
2020	Propriedades energéticas do endocarpo de baru	Teixeira et al.	D
	Elaboração de biscoitos tipo cookies com polpa pré-tratada de baru	Ferreira et al.	B
2019	Prazo de validade de biscoitos feitos de polpa de baru sob diferentes condições de armazenamento	Barreto Ferreira et al.	B
	Avaliação das propriedades químicas e bioativas de frutas nativas do Cerrado brasileiro	Almeida et al.	C
2018	A casca e a polpa do baru apresentam alto teor de fibras, fenólicos e capacidade antioxidante	Santiago et al.	A
2017	Características físicas do fruto do baruzeiro visando a extração da amêndoa comprovando a alta resistência do endocarpo lenhoso superior a outras nozes	Martins et al.	D

Classificação baseada no foco de publicação: composição e propriedades nutricionais (A)/desenvolvimento de novos produtos (B)/revisão de literatura de frutos do Cerrado/componentes do baru(C)/reaproveitamento de resíduos (D).

O manejo e processamento pós-colheita do baru podem afetar sua composição química (da Silva et al., 2021). Os autores apontaram diferenças significativas na composição química do baru, obtidos de diferentes safras. Eles atribuíram as diferenças ao manejo dos frutos, que ocorreu de forma diferenciada nas safras de 2013, 2014 e 2015. Após a colheita, frutas e hortaliças continuam a desenvolver reações metabólicas para manter seu sistema fisiológico e, posteriormente iniciar a senescência do fruto. Morais et al. (2021) afirmaram que com o avanço da maturação do baru ocorre a redução da adstringência causada por fenólicos, principalmente os taninos. Alterações nos açúcares da polpa foram citadas em uma discussão sobre a vida de prateleira de cookies produzidos a partir da polpa de baru, na qual Barreto Ferreira et al. (2020) associaram a diminuição do pH e aumento da acidez dos cookies de baru à conversão dos açúcares da polpa (frutose e sacarose) em ácidos.

Além disso, Gadioli et al. (2021) avaliaram amostras de mesocarpo do baru que apresentaram 50% de açúcares totais, desses, 29% representavam a sacarose (Tabela 3). Essa composição possibilitou a cristalização e granulação da sacarose da polpa do baru. Silva et al. (2021) não caracterizaram quais açúcares representavam os 67% dos carboidratos presentes no mesocarpo do baru utilizado para fermentar e produzir a bebida alcoólica do seu estudo. Os autores destacaram o curto período entre a coleta do fruto e seu armazenamento a frio. O fruto foi enviado diretamente ao laboratório no menor tempo possível, embalado e armazenado em freezer para posterior processamento. De Oliveira et al. (2020) citam o mesmo cuidado na coleta

de amostras e rápido armazenamento do fruto, entretanto o valor de açúcares totais (6.9%) contrasta com os resultados apresentados por Gadioli e da Silva (Tabela 3). Extrapolando o estudo, ressalta-se que por se tratar de um fruto do cerrado, as áreas de produção são de difícil acesso, dificultando a colheita. Com vistas a otimizar o processo, a colheita acontece após a queda dos frutos maduros. Esse tempo entre a queda do fruto até a colheita ainda não foi monitorada e descrita em trabalhos sobre o baru, mas há indícios que pode perdurar por tempos superiores a meses, uma vez que a safra vai de julho a meados de novembro.

O interesse por novas fontes de nutrientes e a necessidade de preservação das espécies nativas do cerrado por meio de sua valorização tem motivado a crescente investigação sobre a polpa e endocarpo do baru, evidenciando o potencial tecnológico seja em produtos alimentícios ou diversas aplicações. Da Silva et al. (2021) sugeriram que a polpa do baru poderia ser utilizada para produção de extratos com alto teor de compostos fenólicos e taninos para fins industriais em substituição ao fenol na formulação de adesivos, ou como antioxidante para aplicação na indústria alimentar, cosmética e farmacêutica. Como já discutido anteriormente, acrescenta-se a essa informação o critério de avaliar o estágio de maturação do fruto e manejo correto pós colheita afim de assegurar essas propriedades químicas. Além disso, Morais et al. (2021) indicaram que a melhor faixa de temperatura de secagem da polpa do baru se situa entre 60 e 70°C, na qual é possível preservar as potencialidades bioativas e físico-químicas do mesocarpo.

Quatro publicações do grupo B focaram no desenvolvimento de produto: Gadioli et al. (2021) com açúcar granulado, Silva et al. (2021) com uma bebida alcóolica fermentada e Ferreira et al. (2020) e Barreto Ferreira et al. (2020) que desenvolveram um biscoito tipo cookie com farinha pré-tratada em substituição à farinha de trigo, com prazo de validade de 80 dias, embalados em polietileno de baixa densidade (PEBD). O potencial tecnológico do mesocarpo do baru na panificação já havia sido explorado por Rocha & Santiago (2009) quando apresentaram um pão com farinha do mesocarpo de baru, destacando a alta concentração de fibras (7,15%) e a redução de gorduras, além da alta aceitabilidade do produto percebidos por meio dos atributos aparência, textura e sabor, quando comparado ao pão padrão de farinha de trigo.

Três estudos do grupo D merecem destaque para o reaproveitamento de resíduos. Primeiramente, Teixeira et al. (2020) testaram as propriedades energéticas (umidade, teor de voláteis, carbono fixo e o teor de cinza) do mesocarpo e endocarpo, e concluíram que o mesocarpo e endocarpo possuem alta reatividade como combustível (teor volátil = 88%). Porém essas frações merecem atenção devido ao alto teor de cinzas (9,24%), que pode causar alguns problemas durante a queima. Por exemplo: a redução do poder calorífico, além de

acúmulo nos cinzeiros no caso da queima direta em fornalhas, na aplicação como carvão vegetal. Nessa mesma linha, Rambo et al. (2021) realizaram uma comparação entre os produtos resultantes da pirólise de resíduos de baru brutos e hidrolisados, conseguindo apresentar biomassas de baru como fontes potenciais para produção de biocombustíveis e biochar (uma alternativa de carvão vegetal utilizado para sequestrar carbono reduzindo a emissão de dióxido de carbono), comprovando o potencial de biorrefinação dos resíduos do baru.

Em outro estudo, foi relatado que o endocarpo é útil para a produção de carvão vegetal (Teixeira & Olsen, 2013). Por fim, Martins et al. (2017) caracterizaram as propriedades físico-mecânicas do endocarpo, como compressão e ruptura, para determinar o limite de tensão de deformação do fruto para otimização do processo de descascamento e obtenção de amêndoas intactas.

Em 2021, foram publicados 11 estudos relevantes sobre o fruto do baru, dos quais seis foram dedicados às porções epicarpo, mesocarpo e endocarpo. Este evidente aumento nas pesquisas sobre frutos de baru, especialmente os componentes visados, é consistente com as tendências e demandas de um mercado em expansão.

Considera-se, nesse sentido, a existência de consumidores que anseiam por produtos funcionais (De Oliveira et al., 2020); a expansão e incentivo à comercialização desses produtos, auxiliando famílias envolvidas na base agroextrativista da cadeia produtiva no bioma Cerrado o processamento e aplicação do baru na indústria alimentícia devido aos atrativos de aspectos sensoriais e tecnológicos (de Almeida et al., 2019); o favorecimento à preservação e valorização da biodiversidade nativa brasileira por meio da exploração sustentável dos recursos naturais, atendendo à demanda de nichos empresariais em crescimento, alimentos naturais, funcionais e sustentáveis (Martins et al., 2009).

Os consumidores esperam produtos funcionais (De Oliveira et al., 2020); e a ampliação e incentivos à comercialização desses produtos podem ajudar as famílias envolvidas na cadeia produtiva agrícola extrativista do bioma Cerrado (Martins et al., 2009); promover o processamento e aplicação do baru na indústria alimentícia, dados seus atrativos aspectos sensoriais e tecnológicos (de Almeida et al., 2019); e corroborar a preservação e valorização da biodiversidade nativa brasileira por meio da exploração sustentável dos recursos naturais e atender às demandas de nichos de negócios relacionados à expansão e também a produtos alimentícios naturais, funcionais e sustentáveis (Martins et al., 2009).

De modo geral, os destaques nas investigações sobre a composição e propriedades nutricionais, bem como a busca por novos produtos do baru demonstram que as pesquisas atuais estão condizentes com os interesses de um mercado consumidor mais exigente, uma vez que o

desenvolvimento de produtos inovadores, atraentes, saudáveis e sustentáveis é o desafio industrial mais complexo da atualidade.

4. Conclusão

Na presente revisão de literatura verificamos que o fruto do baru, em sua totalidade (ou seja, incluindo epicarpo, mesocarpo, endocarpo e amêndoa), apresenta evidente potencial tecnológico para aplicações na indústria alimentícia e áreas afins. Independentemente da fração do fruto, notamos predomínio de estudos relevantes sobre composição química e desenvolvimento de novos produtos. Quanto à aplicabilidade inovadora da amêndoa de baru, destacam-se o desenvolvimento de bebidas hidrossolúveis, formulações que utilizam óleo de baru em substituição a outros óleos vegetais e preparo de sobremesas com castanha de baru. Entre outros componentes da fruta, destaca-se o aproveitamento do mesocarpo; essa polpa doce é útil para a produção de farinha e açúcar granulado e também é fonte de fenólicos.

O reaproveitamento de resíduos industriais para o desenvolvimento de produtos inovadores é consistente com a tendência de um mercado consumidor mais consciente que busca ações sustentáveis e de indústrias que buscam matérias-primas renováveis e com valor nutricional comprovado.

Considerando o papel social e ambiental do fruto do baru, é fundamental divulgar e ampliar o potencial de exploração comercial deste fruto, bem como sua aplicabilidade na ciência e tecnologia de alimentos.

Referências

- Agência Nacional de Vigilância Sanitária. (2005). Resolução RDC nº 268, de 22 de setembro de 2005. *Diário Oficial da União*, 23 set. 2005. Disponível em <https://www.saude.rj.gov.br/comum/code/MostrarArquivo.php?C=MjI0Nw%2C%2C>. Acesso em 15 mar. 2021.
- Alarcon, R. T., Gaglieri, C., Lamb, K. J., North, M., & Bannach, G. (2020). Spectroscopic characterization and thermal behavior of baru nut and macaw palm vegetable oils and their epoxidized derivatives. *Industrial Crops and Products*, 154, Article 112585. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112585>.
- Almeida, A. B., Silva, A. K. C., Lodete, A. R., Egea, M. B., Lima, M. C. P. M., & Silva, F. G. (2019). Assessment of chemical and bioactive properties of native fruits from the Brazilian Cerrado. *Nutrition and Food Science*, 49, 381–392. <https://doi.org/10.1108/NFS-07-2018-0199>.

- Almeida, E. L., Goulart, G. A. S., Claro Neto, S., Chierice, G. O., & Siqueira, A. B. (2016). Preparação e caracterização de poliuretanos contendo diferentes quantidades de óleo de baru. *Polimeros*, 26, 176–184. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2151>.
- Alves, A. M., Fernandes, D. C., Borges, J. F., Sousa, A. G. O., & Naves, M. M. V. (2016). Oilseeds native to the Cerrado have fatty acid profile beneficial for cardiovascular health. *Revista de Nutrição*, 29, 859–866. <https://doi.org/10.1590/1678-98652016000600010>.
- Alves-Santos, A. M., Fernandes, D. C., & Naves, M. M. V. (2021). Baru (*Dipteryx alata* Vog.) fruit as an option of nut and pulp with advantageous nutritional and functional properties: A comprehensive review. *NFS Journal*, 24, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.07.001>.
- Antunes, A. M., Soares, T. N., Targueta, C. P., Novaes, E., Coelho, A. S. G., & Telles, M. P. C. (2020). The chloroplast genome sequence of *Dipteryx alata* Vog. (Fabaceae: Papilionoideae): Genomic features and comparative analysis with other legume genomes. *Revista Brasileira de Botânica*, 43, 271–282. <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00599-3>.
- Bocker, R., & Silva, E. K. (2022). Innovative technologies for manufacturing plant-based non-dairy alternative milk and their impact on nutritional, sensory and safety aspects. *Future Foods*, 5, Article 100098. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100098>.
- Brasil. Ministério da Educação. (2021). *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)*. Disponível em <https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php/aceso-cafe.html>. Acesso em 15 mar. 2021.
- Caetano, K. A., Ceotto, J. M., Ribeiro, A. P. B., Morais, F. P. R., Ferrari, R. A., Pacheco, M. T. B., & Capitani, C. D. (2017). Effect of baru (*Dipteryx alata* Vog.) addition on the composition and nutritional quality of cookies. *Food Science and Technology*, 37, 239–245. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.19616>.
- Campidelli, M. L. L., Carneiro, J. D. S., Souza, E. C., Magalhães, M. L., Nunes, E. E. C., Faria, P. B., Franco, M., & Vilas Boas, E. V. B. (2020). Effects of the drying process on the fatty acid content, phenolic profile, tocopherols and antioxidant activity of baru almonds (*Dipteryx alata* Vog.). *Grasas y Aceites*, 71, 1–11. <https://doi.org/10.3989/gya.1170182>.
- Cardoso, H. B., & Nogueira, J. C. (2021). Perspectivas e desafios do agronegócio brasileiro. In D. G. Giacobbo, & L. M. Frota (Coords.), *AGRO: O papel do agronegócio brasileiro nas novas relações econômicas mundiais* (cap. 18). Synergia, 2021. Disponível em https://books.google.com.br/books?id=V8dAEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false. Acesso em 10 agosto 2022.
- Carrazza, L. R., & Avila, J. C. C. (2010). Manual tecnológico de aproveitamento integral do fruto do Baru (*Dipteryx alata*) (2a ed.). ISPN.
- Carvalho, P. E. R. (2003). *Baru*. Embrapa Florestas. (Circular Técnica, 83).
- Chañi-Paucar, L. O., Osorio-Tobón, J. F., Johner, J. C. F., & Meireles, M. A. A. (2021). A comparative and economic study of the extraction of oil from Baru (*Dipteryx alata*) seeds by supercritical CO₂ with and without mechanical pressing. *Heliyon*, 7, Article E05971. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05971>.
- Companhia Nacional de Abastecimento. (2022). Série histórica de Custos do Baru. Política de Garantia de Preços Mínimos para Produtos da Sociobiodiversidade (PGPM-Bio). Normas específicas de comercialização da amêndoa do baru extrativista- safra 2022. Disponível em respectivamente em: <https://www.conab.gov.br/> <https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao/item/16321-serie-historica-custos-baru-2010-a-2020/> <https://www.conab.gov.br/precos-minimos/pgpm-bio/> https://www.conab.gov.br/images/arquivos/moc/78_NORMAS_ESPECIFICAS_DE_

- BARU_AMENDOA_EXTRATIVISTA_SAFRA-2022.pdf. Acesso em 11 de agosto de 2022.
- Copabase (2022). *Agroecologia: Equilíbrio, saberes e geração de renda para preservação do Cerrado*. Copabase. Disponível em <https://www.copabase.org/documentos-e-publica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em 9 ago. 2022.
- Coutinho, G. S. M., Ribeiro, A. E. C., Prado, P. M. C., Oliveira, É. R., Careli-Gondim, Í., Oliveira, A. R., Soares, M. S., Jr., Caliari, M., & Vilas Boas, E. V. B. (2021). Green banana starch enhances physicochemical and sensory quality of baru almond-based fermented product with probiotic bacteria. *International Journal of Food Science and Technology*, *56*, 5097–5106. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15260>.
- Critical Ecosystem Partnership Fund. (2022). *Copabase: 13 anos promovendo a produção cooperada e a conservação do Cerrado*. Disponível em: <https://cepcerrado.iieb.org.br/?s=SROI+COPABASE>. Acesso em 10 ago. 2022.
- Cruz, P. N., Gama, L. A., Américo, M. F., & Pertuzatti, P. B. (2019). Baru (*Dipteryx alata* Vogel) almond and dairy desserts with baru regulates gastrointestinal transit in rats. *Journal of Food Processing and Preservation*, *43*, Article e14167. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14167>.
- Egea, M. B., & Takeuchi, K. P. (2020). Bioactive compounds in baru almond (*Dipteryx alata* Vogel): Nutritional composition and health effects. In H. N. Murthy, & V. A. Bapat (Eds.), *Bioactive compounds in underutilized fruits and nuts* (pp. 289–302). Springer.
- Food and Agriculture Organization. (2019). *GSFA online - Food Additive Details*. Disponível em www.fao.org/gsfaonline/additives/details.html?id=407&d-3586470-s=2&d-3586470-o=2&print=true. Acesso em 9 ago. 2022.
- Fernandes, A. B. C., Marcolino, V. A., Silva, C., Barão, C. E., & Pimentel, T. C. (2021). Potentially synbiotic fermented beverages processed with water-soluble extract of Baru almond. *Food Bioscience*, *42*, Article 101200. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101200>.
- Fernandes, D. C., Freitas, J. B., Czedler, L. P., & Naves, M. M. V. (2010). Nutritional composition and protein value of the baru (*Dipteryx alata* Vog.) almond from the Brazilian Savanna. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *90*, 1650–1655. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3997>.
- Ferreira, T. H. B., Florizo, G. K. M., & Argandoña, E. J. S. (2020). Shelf life of cookies made from baru (*Dipteryx alata* Vog.) pulp under different storage conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, *44*, Article e14702. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14702>.
- Ferreira, T. H. B., Silva, S. R., Munhoz, C. L., & Argandoña, E. J. S. (2020). Elaboration of biscuits type cookies with pre-treated baru (*Dipteryx alata* Vog.) pulp flour. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *14*, 3156–3162. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00557-3>.
- Fetzer, D. L., Cruz, P. N., Hamerski, F., & Corazza, M. L. (2018). Extraction of baru (*Dipteryx alata* vogel) seed oil using compressed solvents technology. *Journal of Supercritical Fluids*, *137*, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.03.004>.
- Fioravante, M. B., Hiane, P. A., & Braga Neto, J. A. (2017). Elaboração, aceitação sensorial e caracterização de bebida fermentada saborizada à base de extrato hidrossolúvel da amêndoa de baru. *Ciência Rural*, *47*, 5–10. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151646>.
- Gadioli, I. L., Asquiere, E. R., Oliveira, L. L., Figueiredo, L. F. A., Celestino, S. M. C., Batista, R. D., & Asquiere, E. M. A. R. (2021). Influence of climatic and geographical variations on the nutritional and antioxidant properties of baru mesocarp (*Dipteryx alata* Vog.) and the crystallization of sucrose by secondary nucleation. *International Journal of Sugar*

- Crops and Related Industries*, 24, 900-913. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01042-x>.
- Gonçalves, T. O., Filbido, G. S., Pinheiro, A. P. O., Piereti, P. D. P., Dalla Villa, R., & Oliveira, A. P. (2020). In vitro bioaccessibility of the Cu, Fe, Mn and Zn in the baru almond and bocaiúva pulp and, macronutrients characterization. *Journal of Food Composition and Analysis*, 86, Article 103356. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103356>.
- Hespanhol, R. A. M. (2008). Perspectives de l'agriculture durable au Brésil. *Confins*, 2, 1-12. <https://doi.org/10.4000/confins.2353>.
- Leite, N. R., Araújo, L. C. A., Rocha, P. S., Agarrayua, D. A., Ávila, D. S., Carollo, C. A., Silva, D. B., Estevinho, L. M., Souza, K. P., & Santos, E. L. (2020). Baru pulp (*Dipteryx alata* vogel): Fruit from the Brazilian savanna protects against oxidative stress and increases the life expectancy of *Caenorhabditis elegans* via *sod-3* and *daf-16*. *Biomolecules*, 10, Article 1106. <https://doi.org/10.3390/biom10081106>.
- Lima, D. S., Egea, M. B., Cabassa, I. C. C., Almeida, A. B., Sousa, T. L., Lima, T. M., Loss, R. A., Volp, A. C. P., Vasconcelos, L. G., Dall'Oglio, E. L., Hernandez, T., & Takeuchi, K. P. (2021). Technological quality and sensory acceptability of nutritive bars produced with Brazil nut and baru almond coproducts. *LWT - Food Science and Technology*, 137, Article 110467. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110467>.
- Lima, J. S. G. (2017). Segurança alimentar e nutricional: sistemas agroecológicos são a mudança que a intensificação ecológica não alcança. *Ciência e Cultura*, 69, 49-50. <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602017000200015>.
- Lobo, A. S., Sawyer, D. R. (2022). O cerrado. *Central do Cerrado*. Disponível em <https://www.centraldocerrado.org.br/ocerrado>. Acesso em 9 ago. 2022.
- Lubas, C. C. S., Cândido, C. J., Souza, S. V. S., & Guimarães, R. C. A. (2016). Qualidade nutricional de barras de chocolate Nutritional quality of chocolate bars with baru nuts. *Multitemas*, 21, 181-192. <http://dx.doi.org/10.20435/multi.v21i49.812>.
- Martins, B. A., Ferraz, A. C. O., & Schmidt, F. L. (2017). Physical characteristics of baru tree fruit aimed at kernel extraction. *Semina: Ciências agrárias*, 38, 1865-1873. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n4p1865>.
- Martins, B. A., Pimentel, N. M., Del Menezzi, C. H., & Schmidt, F. L. (2009). *Processamento de Baru (Dipteryx alata Vog.) - Estado da arte*. Anais do Sexto Encontro Nacional de Engenharia e Desenvolvimento Social, Campinas, SP.
- Moraes, C., Anjos, J. L. V., Maruno, M., Alonso, A., & Rocha-Filho, P. (2018). Development of lamellar gel phase emulsion containing baru oil (*Dipteryx alata* Vog.) as a prospective delivery system for cutaneous application. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 13, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2017.09.003>.
- Morais, F. A., Belisário, C. M., Favareto, R., Maia, G. P. A. G., & Carvalho, V. D. F. (2021). Influência das temperaturas de secagem nas características físico-químicas da polpa do baru. *Agrarian*, 14, 119–126. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v14i51.10563>.
- Nascimento, T. A., Lopes, T. I. B., Nazario, C. E. D., Oliveira, S. L., & Alcantara, G. B. (2021). Vegetable oils: Are they true? A point of view from ATR-FTIR, ¹H NMR, and regiospecific analysis by ¹³C NMR. *Food Research International*, 144, Article 110362. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110362>.
- Niedack, L. O. C., Souza, L. G. S., Alves, L. E. O., & Damiani, C. R. (2021). Baru (*Dipteryx alata* Vogel), a woody species characteristic of Cerrado and its phytoremediation potential. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 57798–57806. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14708-6>.
- Nunes, Â. A., Favaro, S. P., Miranda, C. H. B., & Neves, V. A. (2017). Preparation and characterization of baru (*Dipteryx alata* Vog) nut protein isolate and comparison of its

- physico-chemical properties with commercial animal and plant protein isolates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 151–157. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7702>.
- Oliveira, M. C., Curi, P. N., Pio, R., Farias, D. H., Rigote, M. R., Schiassi, M. C. E. V., Pasqual, M., & Souza, V. R. (2020). Physicochemical characterization, bioactive compounds and correlations in native fruits of western Mato Grosso do Sul. *British Food Journal*, 122, 841–851. <https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2019-0423>.
- Oliveira-Alves, S. C., Pereira, R. S., Pereira, A. B., Ferreira, A., Mecha, E., Silva, A. B., Serra, A. T., & Bronze, M. R. (2020). Identification of functional compounds in baru (*Dipteryx alata* Vog.) nuts: Nutritional value, volatile and phenolic composition, antioxidant activity and antiproliferative effect. *Food Research International*, 131, Article 109026. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109026>.
- Paglarini, C. S., Queirós, M. S., Tuyama, S. S., Moreira, A. C. V., Chang, Y. K., & Steel, C. J. (2018). Characterization of baru nut (*Dipteryx alata* Vog) flour and its application in reduced-fat cupcakes. *Food Science and Technology*, 55, 164–172. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2876-1>.
- Rambo, M. K. D., Nemet, Y. K. S., Santana, C. C., Jr, Pedroza, M. M., & Rambo, M. C. D. (2021). Comparative study of the products from the pyrolysis of raw and hydrolyzed baru wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 1943–1953. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00585-0>.
- Reis, A. F., & Schmiele, M. (2019). Características e potencialidades dos frutos do Cerrado na indústria de alimentos. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22, Article e2017150. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.15017>.
- Rocha, L. S., & Santiago, R. A. C. (2009). Implicações nutricionais e sensoriais da polpa e casca de baru (*Dipterix Alata* vog.) na elaboração de pães. *Food Science and Technology*, 29, 820–825. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612009000400019>.
- Rojas, V. M., Marconi, L. F. C. B., Guimarães-Inácio, A., Leimann, F. V., Tanamati, A., Gozzo, Â. M., Fuchs, R. H. B., Barreiro, M. F., Barros, L., Ferreira, I. C. F. R., Tanamati, A. A. C., & Gonçalves, O. H. (2019). Formulation of mayonnaises containing PUFAs by the addition of microencapsulated chia seeds, pumpkin seeds and baru oils. *Food Chemistry*, 274, 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.015>.
- Sano, S. M., & Ribeiro, J. F., Brito, M. A. (2004). *Baru: Biologia e uso*. Embrapa Cerrados.
- Santiago, G. L., Oliveira, I. G., Horst, M. A., Naves, M. M. V., & Silva, M. R. (2018). Peel and pulp of baru (*Dipteryx Alata* Vog.) provide high fiber, phenolic content and antioxidant capacity. *Food Science and Technology*, 38, 244–249. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.36416>.
- Santos, P., Aguiar, A. C., Viganó, J., Boeing, J. S., Visentainer, J. V., & Martínez, J. (2016). Supercritical CO₂ extraction of cumbaru oil (*Dipteryx alata* Vogel) assisted by ultrasound: Global yield, kinetics and fatty acid composition. *Journal of Supercritical Fluids*, 107, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.08.018>.
- Sawyer, D., Mesquita, B., Coutinho, B., Almeida, F. V., Figueiredo, I. B., & Eloy, L. (2018). *Perfil do Ecossistema: Hotspot de biodiversidade do cerrado*. SuperNova.
- Schatz, R. D. (2019). Como a Barukas quer usar a castanha de baru para reflorestar o cerrado. *Forbes*. Disponível em <https://forbes.com.br/negocios/2019/10/como-a-barukas-quer-usar-a-castanha-de-baru-para-reflorestar-o-cerrado/>. Acesso em 9 ago. 2022.
- Silva, C. A. A., & Fonseca, G. G. (2016). Brazilian savannah fruits: Characteristics, properties, and potential applications. *Food Science and Biotechnology*, 25, 1225–1232. <https://doi.org/10.1007/s10068-016-0195-3>.
- Silva, J. S., Ferreira, N. B. S., Asquiere, E. R., Damiani, C., & Asquiere, E. M. A. R. (2021a). Chemical monitoring of baru (*Dipteryx alata* vog.) pulp fermented beverage. *Food Science and Technology*, 41, 155–162. <https://doi.org/10.1590/fst.14420>.

- Silva, K., Machado, A., Cardoso, C., Silva, F., & Freitas, F. (2020a). Rheological behavior of plant-based beverages. *Food Science and Technology*, *40*, 258–263. <https://doi.org/10.1590/fst.09219>.
- Silva, P. N., Dias, T., Borges, L. L., Alves-Santos, A. M., Horst, M. A., Silva, M. R., & Naves, M. M. V. (2020b). Total phenolic compounds and antioxidant capacity of baru almond and by-products evaluated under optimizing extraction conditions. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, *15*, Article e8530. <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8530>.
- Silva, S. R., Ferreira, T. H. B., Giunco, A. J., & Argandoña, E. J. S. (2021b). Nutritional potential and effect of the solvent on the extraction of secondary metabolites from pulp and bark of baru (*Dipteryx alata*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, *15*, 3453–3460. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00926-6>.
- Siqueira, A. P. S., Castro, C. F. S., Silveira, E. V., & Lourenço, M. F. C. (2016). Chemical quality of Baru almond (*Dipteryx alata* oil). *Ciência Rural*, *46*, 1865–1867. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150468>.
- Teixeira, H. M., Santos, S. B., Araujo, N. C. C., Silva, T. A. A., & Alves, N. M. C. (2020). Propriedades energéticas do endocarpo de baru (*Dipteryx Alata* Vog.)/Energy properties of baru endocarp (*Dipteryx Alata* Vog.). *Brazilian Journal of Development*, *6*, 72110–72119. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-599>.
- Valadão, G. M., Souza, A. N., Scardua, F. P., Martins, R. C. C., Pimentel, N. M., Nogueira, J. M. P., Rodrigues, M. I. D. (2018). A Comercialização da castanha de baru (*Dipteryx alata* Vogel.) da região Vale do Rio Urucuia em Minas Gerais. In A. Borges, Jr., R. C. Campos, R. A. Leite (Orgs.), *Perspectivas para agropecuária sustentável* (pp. 486-501). Kelps.
- Vale, A. T., & Olsen, L. B. (2013). Produção de carvão vegetal de casca de baru (*Dipteryx alata*) utilizando células de carbonização. *Floresta*, *43*, 117-124.

CAPÍTULO 3

ARTIGO 2: ANÁLISE COMPOSICIONAL DA POLPA DE BARU (*DIPTERYX ALATA* VOG.) DESTACANDO SEU POTENCIAL INDUSTRIAL

*Artigo em revisão pela Food Research International.

Gracieli de Miranda Monteiro^a *, Elisângela Elena Nunes Carvalho^b, Rafael Carvalho do Lago^c, Luíz Guilherme Malaquias da Silva^b, Lorrane Ribeiro de Souza^b, Carlos Alexandre Rocha da Costa^b, Eduardo Valério de Barros Vilas Boas^b.

^a Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, 74690-900 Goiânia, GO, Brasil.

^b Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, 37200-900 Lavras, MG, Brasil.

^c Departamento de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras, 37200-900 Lavras, MG, Brasil.

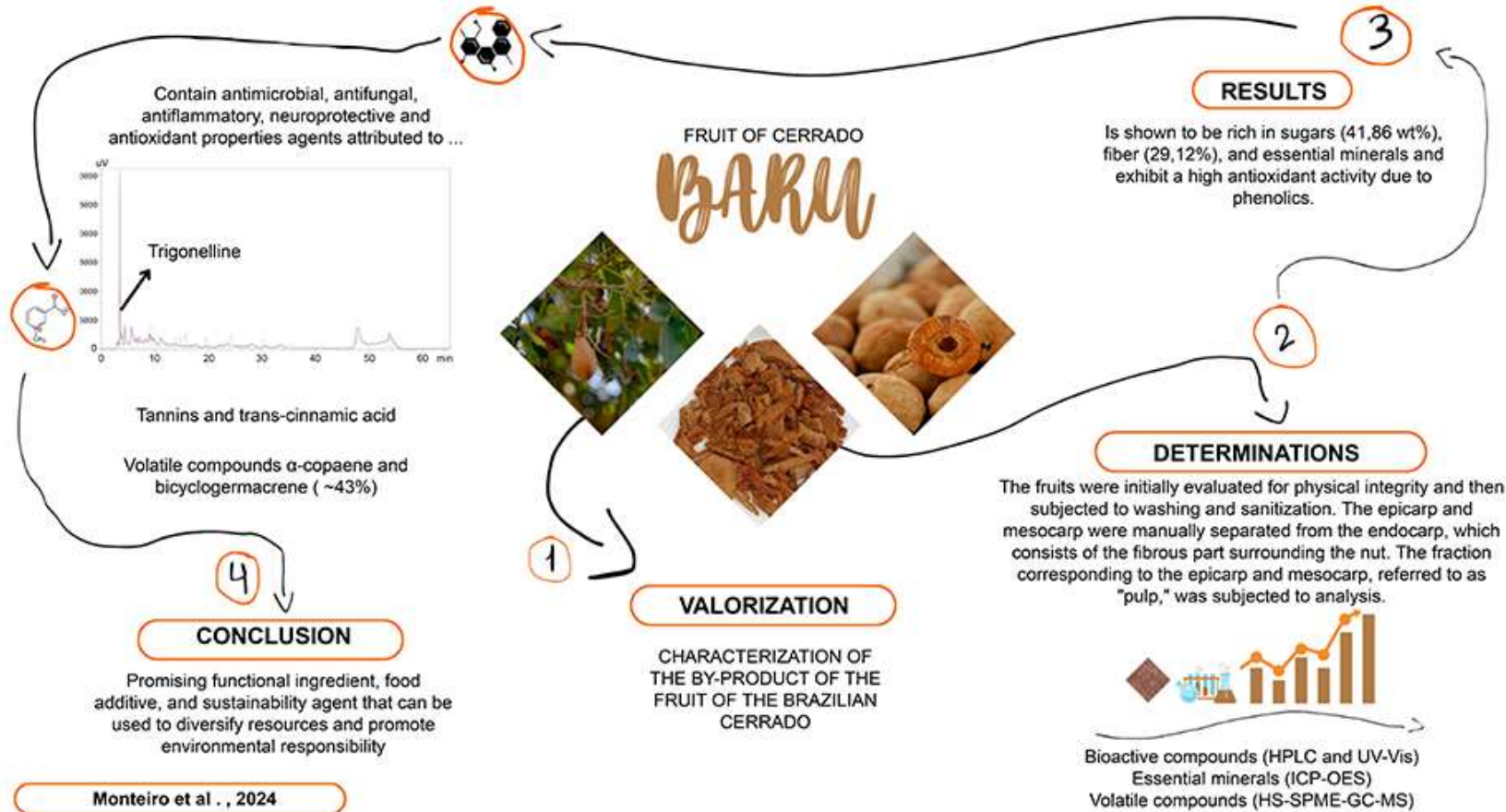
Autor correspondente: Gracieli de Miranda Monteiro

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Escola de Agronomia.

Universidade Federal de Goiás, 74690-900 Goiânia, GO, Brasil.

Email: gracieli.monteiro@ifnmg.edu.br; gracieli.nutri@gmail.com

Composition analysis of baru (*Dipteryx alata* Vog.) pulp highlighting its industrial potential



Destaques

- A polpa de baru contém compostos bioativos como trigonelina, taninos e fenólicos.
- Os sesquiterpenos da polpa de baru contribuem para seu aroma amadeirado e potencial de óleo essencial.
- A polpa de baru é rica em açúcares, fibras e minerais essenciais.
- O resíduo apresenta potencial como alimento funcional para o uso sustentável de alimentos.
- O baru é um fruto do Cerrado com potencial para o desenvolvimento de novos produtos.

RESUMO

O baru (*Dipteryx alata* Vogel), fruto nativo do Cerrado brasileiro, vem ganhando interesse científico devido ao seu potencial nutricional e valor comercial. Sua semente comestível, de alto valor comercial, representa cerca de 5% do fruto. Por outro lado, sua polpa, subproduto da indústria de processamento do baru, é normalmente descartada gerando um enorme volume de resíduos com propriedades antioxidantes relatadas. Este estudo investiga a composição e as propriedades bioativas da polpa de baru, visando identificar os componentes antioxidantes neste subproduto. Nossa análise revelou que a polpa de baru é rica em açúcares (41,86%), fibras (29,12%) e minerais essenciais, juntamente com compostos bioativos de valor comercial, como trigonelina (139,10 mg 100 g⁻¹), taninos (429,16 mg tanino equivalente 100 g⁻¹), vitamina C (109,57 mg 100 g⁻¹) e compostos fenólicos, como ácido transcinâmico (5,91 mg 100 g⁻¹), ácido clorogênico e ácido gálico (1,07 mg 100 g⁻¹). Sesquiterpenos industrialmente relevantes, como α -copaeno e biciclogermacreno, respondem por 42,75% do perfil volátil, juntamente com germacreno D (11,69%), aromadendreno (9,05%), α -cubebeno (6,84%), β -elemeno (5,90%) e ledeno (5,82%), que são comumente usados na produção de óleo essencial de outras matrizes alimentares. Embora mais estudos sejam necessários para otimizar os métodos de extração, essas descobertas destacam a polpa de baru como uma alternativa promissora e de baixo custo às fontes tradicionais de compostos bioativos, com potenciais aplicações em formulações de alimentos funcionais e processos industriais sustentáveis. Especificamente, recomenda-se o uso de polpa *in natura* ou de sua farinha para enriquecimento de alimentos, apoiando a sustentabilidade por meio da valorização de resíduos agroindustriais.

PALAVRAS CHAVE: Bioma Cerrado; compostos fenólicos; perfil volátil; trigonelina; α -copaeno; biciclogermacreno.

1. Introdução

O fruto do baru é produzido por *Dipteryx alata* Vog, uma espécie típica do Cerrado, o segundo maior bioma brasileiro. Este fruto tem atraído considerável atenção devido à sua importância socioeconômica e ambiental e correlação com o movimento global de valorização da biodiversidade (Monteiro et al., 2022). É valorizado principalmente por sua castanha, que representa apenas 5% da massa total do fruto, o que resulta em um volume significativo da polpa como resíduo e impactos ambientais (Alves-Santos et al., 2021). A geração significativa de resíduos alimentares, principalmente após a colheita de frutas e vegetais, tem impulsionado pesquisas focadas na utilização de resíduos agroindustriais para aplicações nas indústrias alimentícia e farmacêutica (Mitreá et al., 2023; Palanisamy et al., 2024).

Pesquisas recentes apresentaram soluções inovadoras para o gerenciamento e uso sustentável de resíduos, que representam fontes valiosas para a extração de fitoquímicos e biomassa para biorrefinarias. Esses resíduos podem ser utilizados como matéria-prima para obtenção de produtos biotecnológicos de interesse industriais como biopolímeros, cosméticos e rações animais, com aplicação nas industriais alimentícias, têxteis e farmacêuticas (Kumar et al., 2023; Mitreá et al., 2023). A exploração científica dos resíduos alimentares oferece oportunidades concretas para agregação de valor e geração de renda em diferentes escalas de produção.

Ressalta-se que o mesocarpo do baru, resíduo da indústria de castanha do baru, tem grande potencial a ser explorado devido as altas concentrações de compostos bioativos e capacidade antioxidante (Silva et al., 2021). De fato, pesquisas sobre a composição química e efeitos terapêuticos desses compostos extraídos de espécies nativas brasileiras negligenciadas e/ou subutilizadas são muito promissoras (Schulz et al., 2020). Portanto, é fundamental investir em estudos sobre o processamento desses resíduos, buscando aplicações em diferentes segmentos industriais e economia circular. Isso pode ser refletido na valorização econômica dessas

espécies, incentivo à preservação dos biomas envolvidos, mitigação dos efeitos deletérios das ações antrópicas e melhoria social.

De fato, a redução do desperdício de alimentos e, conseqüentemente, dos impactos ambientais pode ser alcançada pelo gerenciamento e uso desses resíduos em novas aplicações biotecnológicas (Pateiro et al., 2020). Essas são duas das maiores preocupações futuras, principalmente devido à grande perspectiva de crescimento populacional global, de acordo com um relatório das Nações Unidas (Al-Obadi et al., 2022).

Assim, com o objetivo de expandir o conhecimento sobre o fruto do baru e descobrir seu potencial industrial, este estudo examinou a polpa (epicarpo + mesocarpo) do fruto do baru, um subproduto potencial do processamento da castanha do baru, e avaliou sua composição, incluindo fenólicos, compostos orgânicos voláteis e fatores antinutricionais.

2. Metodologia

2.1 Coleta e processamento do fruto baru

Os frutos maduros foram coletados após a abscisão natural no bioma Cerrado (15° 54' 19" S, 46° 6' 32" W; cidade de Arinos, noroeste do estado de Minas Gerais, Brasil). Os frutos foram inspecionados e excluíram-se aqueles que mostravam sinais de deterioração. Após lavagem e sanitização, a polpa (epicarpo + mesocarpo) foi separada manualmente do endocarpo, embalada em sacos de polietileno e armazenada a -18 °C até a análise (Fig. 1).

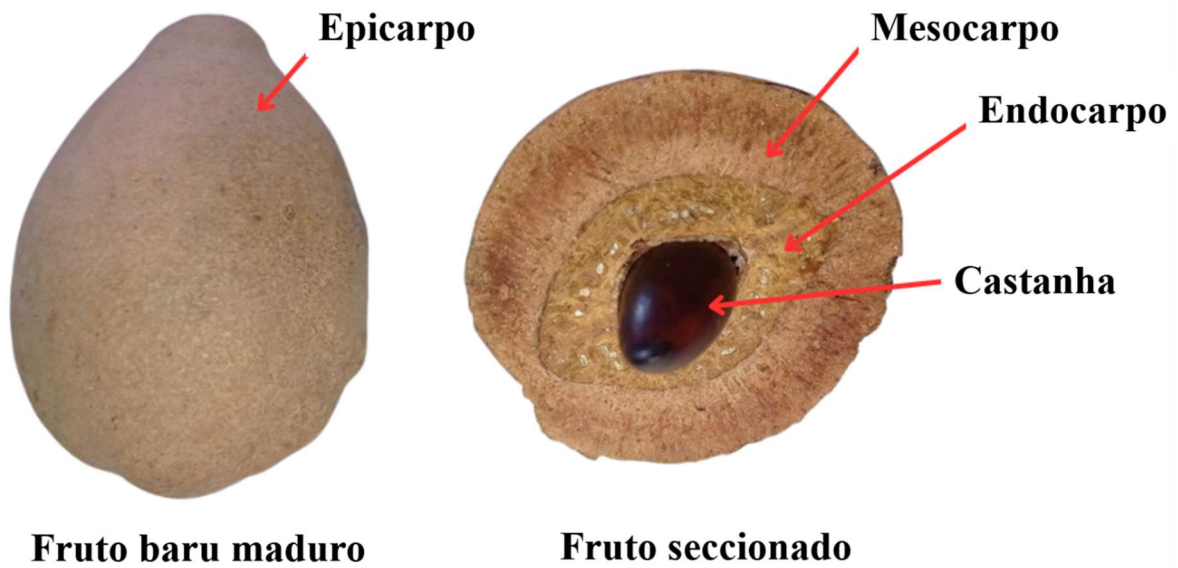


Fig. 1 Fruto baru maduro e frações visíveis em corte transversal.

Parâmetros físicos e físico-químicos, composição centesimal e conteúdo mineral

2.2.1 pH, Acidez Titulável, Teor de Sólidos Solúveis e Composição Centesimal Frutos inteiros não congelados foram analisados em termos de massa, firmeza, dimensões e cor. A polpa foi submetida às mesmas análises, exceto dimensões. A firmeza foi avaliada com o uso de um penetrômetro (Intratherm PTR-300). O pH foi determinado com um medidor de pH TECNAL® (R-TEC-7-MP Piracicaba-SP, Brasil), previamente calibrado com soluções tampão de pH 4 e 7. A acidez total titulável foi realizada com solução de NaOH 0,1 N e fenolftaleína como indicador ácido-base. O teor de sólidos solúveis foi determinado com um refratômetro digital (ATAGO PR-100, Tóquio, Japão). A análise de cor foi feita com um iluminador Konica Minolta (CR-400), iluminante D65. A análise centesimal seguiu o protocolo padrão da Association of Official Analytical Chemistry (AOAC, 2019), e o conteúdo calórico foi calculado com os fatores de conversão de Atwater.

2.2.2 Determinação de Sacarose, Frutose e Glicose

O método utilizado seguiu Santos et al. (2021). Uma amostra de 500 µg foi macerada e extraída com água ultrapura (10 mL) por 4 horas a 30 °C. O extrato foi centrifugado a 10.142 g por 5 minutos, e o sobrenadante foi diluído e analisado usando um cromatógrafo Shimadzu Prominence equipado com uma coluna Shim-pack SCR 102HG, protegida por uma pré-coluna SCR 102HG. Detectores de índice de refração (RID-20A) e UV-vis (SPD-20A) foram utilizados. A temperatura do forno foi ajustada para 50 °C, e a fase móvel (5 mM HClO₄) foi fornecida a uma taxa de fluxo de 0,600 mL min.

2.2.3 Teor de Minerais

A análise de minerais foi realizada de acordo com um protocolo padrão (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 3051 A), utilizando espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente para B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S e Zn (USEPA, 2017). Para essa análise, as amostras de polpa foram secas, moídas e digeridas em um micro-ondas CEM® Mars-5.

2.3 Atividade Antioxidante pelos Métodos β-caroteno/ácido linoleico, DPPH e ABTS^{•+}

A atividade antioxidante foi avaliada utilizando os ensaios β-caroteno/ácido linoleico, 2,2-difenil-1-picrilhidrazila (DPPH; 515 nm) e 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico) (ABTS; 734 nm), com pequenas modificações (Kolap et al., 2022; Rufino et al., 2010). Os extratos foram realizados conforme metodologia de Rufino et al. (2010). Os resultados foram apresentados como porcentagem de inibição da oxidação (% de proteção) e atividade sequestrante de radicais (% RSA):

$$\%RSA \text{ (DPPH)} = 100 \times (A_c - (A_s - F_c)/A_c),$$

$$\%RSA \text{ (ABTS)} = 100 \times (A_c - A_s/A_c),$$

onde A_c é a absorvância do controle (solução inicial de ABTS/DPPH), A_s é a absorvância da solução de teste/amostra, e F_c é um fator de correção que contabiliza a cor residual (do violeta ao amarelo claro) no teste DPPH, correspondendo a $A_c - A_{\text{branco}}$, isto é, leitura inicial - leitura com DPPH e água destilada em vez da amostra. Os valores de % RSA dos extratos foram comparados com aqueles obtidos para diferentes concentrações (1–6 mg mL⁻¹) de ácido ascórbico (controle). As concentrações dos extratos de polpa de baru utilizadas nos testes foram de 4 mg mL⁻¹ para DPPH e 1,20 mg mL⁻¹ para ABTS. Os ensaios DPPH e ABTS foram realizados com um tempo de reação de 60 minutos.

O teor de vitamina C foi determinado utilizando a espectrofotometria seguindo as metodologias propostas por Strohecker e Henning (1967), como resultado expresso em mg de ácido ascórbico por 100 g de amostra.

2.4 Taninos e Fatores Antinutricionais

O teor de taninos e ácido oxálico foi determinado por métodos espectrofotométricos, seguindo as metodologias propostas por Mahajan et al. (2023) e Naik et al. (2014), respectivamente. As leituras de absorvância foram realizadas em, 775 e 528 nm, com os resultados expressos em mg de, ácido tânico e ácido oxálico por 100 g de amostra.

A cianogênese foi examinada usando a hidrólise enzimática de glicosídeos cianogênicos, de acordo com o método de Santos et al. (2005). O resultado foi expresso como positivo ou negativo, com base na mudança de cor do papel de filtro de amarelo para vermelho-alaranjado devido à liberação de ácido cianídrico.

2.5 Perfil de Teobromina, Trigonelina e Compostos Fenólicos

O método foi baseado em da Costa et al. (2024). A identificação dos compostos foi realizada pelo tempo de retenção e comparação dos espectros UV-vis com quinze padrões,

nomeadamente, trigonelina, teobromina, catequina, resveratrol, vanilina e ácidos gálico, clorogênico, ferúlico, cafeico, o-cumárico, m-cumárico, p-cumárico, siríngico, rosmarínico e trans-cinâmico. Os resultados obtidos foram expressos em mg por 100 g de amostra.

2.6 Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)

Os COVs da polpa de baru foram extraídos por microextração em fase sólida em headspace (HS-SPME) usando fibras de divinilbenzeno, carboxina e polidimetilsiloxano (30–50 μm , Supelco, 1 cm). Amostras frescas (2 g) foram aquecidas a 40 °C por 30 min em frascos de 20 mL. Os COVs foram dessorvidos a 220 °C por 2 min. A separação e identificação foram realizadas em um equipamento QP2010 Plus (Shimadzu, Japão) com um injetor automático AOC-5000 e uma coluna SLBTM (30 m \times 0,25 mm \times 0,25 μm , 5 % fenil, 95 % dimetilsiloxano) operando em modo split (1:5). O gás hélio foi utilizado a 1 mL/min, e a temperatura do forno foi ajustada de 40 a 200 °C (4 °C min⁻¹). A espectrometria de massa foi conduzida no modo de impacto eletrônico (70 eV), escaneando entre 45–600 Da. A identificação dos COVs foi realizada usando o software GCMS-QP2010 (LabSolutions), com comparações em cinco bibliotecas de massa e índices de retenção baseados em séries homólogas de alcanos (C8–C40), validados com dados relatados (Acree, 2004; Adams, 2017).

2.3 Estatística

As análises foram conduzidas em seis repetições. Cada repetição consistiu de 20 frutos, resultando em um total de 120 frutos analisadas no estudo. Os valores foram apresentados como média \pm desvio padrão, calculados usando planilhas do Microsoft Excel.

3. Resultados e Discussão

3.1 Parâmetros físicos e físico-químicos, composição centesimal e conteúdo mineral

Os resultados dos parâmetros físicos e físico-químicos encontrados nas análises do fruto inteiro, bem como de sua polpa madura, estão descritos na Tabela 1. A média do comprimento, largura, espessura e massa por fruto foi de 57,33 mm, 39,54 mm, 34,18 mm e 38,38 g, respectivamente. Conforme relatado em outros estudos, o rendimento médio da polpa foi de 57,61 %, excedendo as frações [endocarpo + semente] com rendimento de 42,38 %. De acordo com Gadioli et al. (2022), variações na composição e rendimento dos frutos de baru podem ocorrer em diferentes localidades, sendo influenciadas por fatores como localização, clima, solo e genética, pois a espécie ainda não foi domesticada, e a propagação sexual aumenta a variação genética.

Tabela 1. Parâmetros físicos e físico-químicos avaliados.

Parâmetros Avaliados	Resultados
Massa do fruto (g)	38.38 ± 4.66
Rendimento [Epicarpo e Mesocarpo] polpa (%)	57.61 ± 1.62
Rendimento [Endocarpo e Castanha] (%)	42.38 ± 1.62
Comprimento (mm)	57.33 ± 0.23
Largura (mm)	39.54 ± 0.15
Espessura (mm)	34.18 ± 0.11
Cor (epicarpo/mesocarpo)	
L*	55.38 ± 2.02 / 49.96 ± 4.14
c*	31.34 ± 1.86 / 37.02 ± 2.44
h°	71.14 ± 1.50 / 63.93 ± 1.80
Firmeza (N)	92.2 ± 0.47
pH (mesocarpo)	4.96 ± 0.58
Acidez Titulável (TA) (%) (mesocarpo)	0.54 ± 0.11
Sólidos Solúveis (SS) (%) (mesocarpo)	57.33 ± 1.03

A polpa do baru apresentou uma tonalidade amarela-avermelhada. O epicarpo ($h^\circ = 71,14$, $L^* = 55,38$, $C^* = 31,34$) apresentou maior ângulo de tonalidade (mais amarelado), maior luminosidade (L^*) e menor intensidade de cor (C^*) em comparação com o mesocarpo ($h^\circ = 63,93$, $L^* = 49,96$, $C^* = 37,02$). Ambas as frações apresentaram valores relativamente baixos de L^* e C^* , o que pode afetar a vivacidade percebida da cor, pois L^* baixo sugere uma aparência mais escura e C^* baixo, uma tonalidade mais acinzentada. Esses valores de L^* , C^* e h° estão alinhados com descrições anteriores do baru, caracterizado por uma coloração de bege escuro a marrom avermelhado (Alves-Santos et al., 2021; Monteiro et al., 2022).

A alta firmeza dos frutos de baru (92,2 N) foi atribuída à sua natureza seca (17,9% umidade), semelhante à das nozes e castanhas, bem como ao seu elevado teor de fibras (29,12 %) (Tabela 2). Os frutos do baru possuem um pericarpo lenhoso que contribui para sua textura firme. Sua firmeza é influenciada pela integridade da parede celular e pelos compostos da fração de fibras, como a celulose e a lignina. Essas características tornam os frutos resistentes a patógenos e facilitam o manuseio e a conservação durante os processos industriais (Prasanna et al., 2007; Wang et al., 2018). Com base no seu pH (4,96), a polpa do baru foi classificada como um alimento com acidez média ($pH < 5,5$), o que favorece sua preservação ao inibir o crescimento de algumas bactérias, embora fungos filamentosos e leveduras possam se desenvolver nesse pH (Forsythe, 2013).

O teor de umidade apontado no baru (17,9%, Tabela 2) é inferior ao de outros frutos carnosos, mas típico de frutas secas, como o jatobá do Cerrado (Arruda et al., 2022) e o tucumã (da Silva Sousa et al., 2023). Alimentos com teor de umidade abaixo de 13% possuem maior durabilidade e, embora a polpa de baru tenha umidade relativamente baixa, sua vida útil pode ser prolongada através da secagem.

Tabela 2. Composição centesimal da polpa do baru. %VD: Valor Diário de referência baseada em uma dieta de 2000 kcal (8400 kJ) (Food and Drug Administration, 2020). * VD não estabelecido.

Macronutrientes e Energia (g/100g⁻¹)	Amostra Integral	% VD*
Umidade	17.90 ± 0.03	**
Lipídios	3.57 ± 0.26	5
Proteína	5.21 ± 0.64	10
Cinzas	2.21 ± 0.03	**
Fibra Alimentar Dietética	29.12 ± 0.91	104
Carboidratos Não Fibrosos	41.99 ± 0.07	15
Sacarose	20.44 ± 0.15	**
Frutose	11.33 ± 0.02	**
Glicose	10.09 ± 0.02	**
Energia (kcal)	220.41	11

Os carboidratos são os principais componentes da polpa de baru, conforme descrito na composição centesimal (Tabela 2). Especificamente, os carboidratos não fibrosos representaram 41,99% (sacarose: 20,44%, glicose: 10,09%, frutose: 11,33%), enquanto a fibra alimentar compreendeu 29,12%. O alto teor de sólidos solúveis (57,33%) confirma a doçura característica do fruto. Essa composição difere de outras frutas nativas do Cerrado, como a cagaita, a gabiroba e a mangaba (2,3–10,6%), que possuem menor teor de carboidratos e maior teor de água (80,87–91,56%) (Arruda et al., 2022). Uma porção de 100 g de polpa de baru fornece cerca de 11% da ingestão diária recomendada de energia, além de contribuições significativas para a ingestão diária de fibras e açúcares. O alto teor de fibras, associado a efeitos probióticos (Alves-Santos et al., 2023), destaca o potencial funcional da polpa do fruto.

Embora os carboidratos sejam predominantes na polpa de baru, as quantidades de cinzas (2,21%), lipídios (3,57%) e proteínas (5,21%) não são desprezíveis. A polpa de baru é uma fonte potencial de minerais importantes, como P, K, Ca, Mg, Mn e Fe (Tabela 3).

Tabela 3. Perfil mineral da polpa do baru maduro. %VD: Valor Diário de referência baseada em uma dieta de 2000 kcal (8400 kJ) por dia (Food and Drug Administration, 2020). * VD não estabelecida.

Elementos	mg 100 g⁻¹	% VD
Fósforo (P)	120.11	10
Potássio (K)	1066.72	23
Cálcio (Ca)	129.89	10
Magnésio (Mg)	92.81	22
Enxofre (S)	60.88	**
Boro (B)	2.15	**
Cobre (Cu)	0.40	44
Manganês (Mn)	10.84	471
Zinco (Zn)	1.16	11
Ferro (Fe)	2.83	16

Aproximadamente 30 g de polpa de baru são suficientes para atender às necessidades diárias de manganês, enquanto 100 g fornecem 10% da ingestão diária recomendada de cálcio e 16% de ferro, ambos minerais essenciais com importância conhecida para a saúde pública (Food and Drug Administration, 2020). Comparando essas descobertas com Silva Sousa et al. (2023), a polpa de baru apresenta teor de manganês e ferro significativamente mais alto do que outras frutas nativas, como tucumã, bacupari e pupunha. Enquanto a polpa de baru atende às necessidades diárias de manganês, as outras frutas apresentam níveis mais baixos, ressaltando a vantagem nutricional da polpa de baru como uma fonte valiosa de ferro e manganês.

Além disso, a forma natural dessas frutas nativas tende a ter um teor de umidade mais alto, o que pode diluir suas concentrações minerais. Em contraste, o menor nível de umidade na polpa de baru contribui para sua maior densidade mineral, diferenciando-a de outras frutas do Cerrado ricas em água.

3.2 Atividade antioxidante, compostos bioativos e fatores antinutricionais

Com base no método β -caroteno/ácido linoleico, os alimentos podem ser classificados em atividades antioxidantes alta, média e baixa (>70 %, 40–70 % e <40 %, respectivamente) (Rufino et al., 2010). Portanto, a polpa de baru foi classificada como tendo alta atividade antioxidante (Tabela 4).

Tabela 4. Conteúdo de compostos bioativos e atividades antioxidantes da polpa de baru.

Parâmetros	Valores
β -Carotene/ALA, % proteção	70.33 \pm 5.43
DPPH, %RSA	63.93 \pm 6.66
ABTS, %RSA	33.23 \pm 2.92
Ácido Ascórbico, mg 100 g ⁻¹	109.57 \pm 2.61
Taninos, mg 100 g ⁻¹	429.79 \pm 19.86
Ácido Oxálico, g 100 g ⁻¹	2.51 \pm 0.09
Ácidos Cianogênicos	Negativo

O %RSA do extrato de polpa de baru foi de 63,93 % (DPPH) e 33,23 % (ABTS). A atividade antioxidante do extrato de polpa de baru medida pelo método DPPH foi comparável à de outros extratos vegetais, como o extrato de espinheiro (*Crataegus* sp.) [66,86 % a 2 mg mL⁻¹] (Seğmenoğlu & Çenet, 2024), subprodutos do abacaxi (*Ananas comosus* L.) [75,4 % a 5 mg mL⁻¹] (Hadidi et al., 2020), e extrato de *Woodrowii* (fruto usado na medicina tradicional indiana) [43–58 % a 10 mg mL⁻¹] (Kolap et al., 2022).

O uso de ácido ascórbico em concentrações de 5 e 3 mg mL⁻¹ resultou em 100% e 69% de eliminação do radical DPPH, respectivamente. A atividade antioxidante da polpa de baru, medida pelo método ABTS, superou a relatada por Oliveira et al. (2023) para a polpa de *Litchi*

chinensis (17,21%). O uso de 4 mg mL^{-1} de ácido ascórbico como padrão permitiu a eliminação de 100% do radical ABTS. Vale ressaltar que a determinação da atividade antioxidante por meio do %RSA proporciona uma interpretação mais precisa e confiável dos resultados, superando as limitações do método EC50 (Ferreira da Silva et al., 2024; Muhaxi et al., 2023). A atividade antioxidante de frutas e vegetais está diretamente ligada à presença de compostos bioativos, como fenólicos, carotenoides e vitamina C. A vitamina C, também conhecida como ácido ascórbico (AA) ou ascorbato, é um composto bioativo essencial para os seres humanos, com alta capacidade antioxidante. O teor médio dessa vitamina na polpa de baru foi determinado como $110 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$. Assim, o consumo de 100 g de polpa de baru forneceria mais de 100% da ingestão diária de ácido ascórbico para um adulto saudável (Food and Drug Administration, 2020). O ascorbato é altamente biodisponível e essencial para eliminar radicais livres, prevenindo danos a proteínas, lipídios e DNA, além de contribuir para a formação de colágeno, fundamental para a geração de tecido conjuntivo, protegendo contra o estresse oxidativo e ajudando a manter a integridade dos tecidos. A capacidade de neutralizar radicais livres e influenciar a formação de colágeno torna este componente da fruta um nutriente essencial para a saúde e bem-estar (González-Molina et al., 2010; Santos-Sánchez et al., 2019). Frutas cítricas são fontes bem conhecidas de ácido ascórbico, e a polpa de baru excedeu os valores relatados para laranjas ($89,8 \text{ mg g}^{-1}$) e limões ($46,9 \text{ mg g}^{-1}$) (Belayneh Asfaw et al., 2024; González-Molina et al., 2010), destacando a importância da polpa do baru como fonte dessa vitamina.

O teor de taninos da polpa de baru ($429,16 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$, Tabela 4) excedeu substancialmente o valor relatado por da Silva et al. (2021), que determinou apenas a fração de taninos condensados na polpa de baru ($6,09 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$). Os taninos são fenólicos amplamente presentes em vários alimentos, incluindo uvas, amoras, morangos, nozes, castanhas-de-caju, avelãs, mangas e chá (DAS et al., 2020). Fecka et al. (2021) revelaram que morangos maduros possuem um teor

médio de taninos (21,07 mg 100 g⁻¹) cerca de 20 vezes menor do que o da polpa de baru. Os taninos podem ser classificados em hidrolisáveis e poliflavonoides (condensados), sendo estes últimos formados pela polimerização de flavonoides. Enquanto os taninos hidrolisáveis são menores e contêm ácidos fenólicos, os condensados representam a maioria dos taninos industriais (DAS et al., 2020; PIZZI, 2021).

Nesse sentido, a polpa do baru, como fonte natural de taninos, assim como a casca de acácia e de pinho, pode ser explorada comercialmente, principalmente devido às propriedades desses polifenóis, destacando-se suas atividades antimicrobianas e anti-inflamatórias (DAS et al., 2020; de MELO et al., 2023; PIZZI, 2021).

Os taninos podem atuar como fatores antinutricionais devido à sua capacidade de complexar proteínas e reduzir sua biodisponibilidade. Um estudo com animais mostrou que a taxa de crescimento de frangos alimentados com uma dieta contendo mais de 0,5% de taninos foi consideravelmente reduzida (Chung et al., 1998). No entanto, em humanos, os efeitos tóxicos dos taninos são observados apenas em ingestões superiores a 2000 mg kg⁻¹ de peso corporal (Maugeri et al., 2022), o que torna o risco de toxicidade dos taninos pelo consumo da polpa de baru mínimo.

O ácido oxálico é um fator antinutricional comumente encontrado em vegetais. O teor de ácido oxálico na polpa de baru (2,51 g 100 g⁻¹, Tabela 4) excede os valores de outras espécies vegetais comestíveis. Filho et al. (2023) estudaram mais de 140 espécies de plantas de interesse alimentar e medicinal, determinando seus teores de ácido oxálico, variando de 0 a 6,2 g 100 g⁻¹ na matéria seca. O teor de ácido oxálico na polpa de baru com base na matéria seca (3,25%) está dentro desse intervalo. Altos níveis de ácido oxálico também foram encontrados em alcaçuz (*Glycyrrhiza glabra*, 3,51 g 100 g⁻¹) e no trevo azul (*Trigonella coerulea*, 1,24 g 100 g⁻¹) (Siener et al., 2021). Ambas as espécies pertencem à família Fabaceae, assim como o baru. A presença de ácido oxálico em plantas levanta preocupações devido ao seu potencial papel no

desenvolvimento ou agravamento de problemas renais (Filho et al., 2023) e a potencial toxicidade para pacientes com doença renal crônica (Muthu et al., 2016). Portanto, a possibilidade de consumo da polpa de baru por pacientes renais deve ser cuidadosamente avaliada.

Neste estudo, não foram detectados compostos cianogênicos na polpa de baru. Compostos cianogênicos são fatores antinutricionais potencialmente prejudiciais comumente encontrados em alimentos como raízes e folhas de mandioca (*Manihot esculenta*). Quando consumidos, esses compostos podem produzir ácido cianídrico (HCN), um composto altamente tóxico que pode se ligar a metais e interromper processos corporais importantes, como o transporte de íons e atividades enzimáticas, levando à inibição da respiração celular aeróbica, principalmente bloqueando a citocromo oxidase e, assim, afetando vários processos metabólicos (Aguilar & da Veiga Júnior, 2021).

3.3 Trigonelina, teobromina e Perfil fenólico

Dois alcaloides (trigonelina e teobromina) e nove compostos fenólicos foram identificados na polpa de baru (Tabela 5), sendo a trigonelina o composto majoritário.

Tabela 5. Teores de trigonelina, teobromina e compostos fenólicos da polpa de baru maduro.

Compound	PubChem CID	mg 100 g ⁻¹
Trigonelina	5571	139.10 ± 0.56
Teobromina	5429	0.10 ± 0.05
Ácido <i>trans</i> -cinâmico	444539	5.91 ± 0.12
Ácido Gálico	370	1.07 ± 0.06
Ácido Clorogênico	1794427	1.07 ± 0.31
Ácido Cafeico	689043	0.09 ± 0.01
Ácido Siringico	10742	0.07 ± 0.01
Ácido <i>p</i> -Cumárico	637542	0.24 ± 0.00

Ácido <i>m</i> -Cumárico	637541	0.16 ± 0.00
Ácido <i>o</i> -Cumárico	637540	0.35 ± 0.02
Catequina	9064	0.20 ± 0.00

A trigonelina (ácido N-metilnicotínico) é um alcaloide vegetal baseado em piridina, um metabólito da vitamina B3 metilada (niacina). As principais fontes de trigonelina são os grãos de café e as sementes de *Trigonella foenum-graecum L.* (feno-grego), embora ela esteja presente em outras plantas consumíveis, como cebola, milho, soja, ervilha, pequi e maracujá roxo (Ayseli & Ipek Ayseli, 2016; da Costa et al., 2023, 2024).

O teor de trigonelina na polpa de baru foi aproximadamente 10% do teor encontrado no café (Konstantinidis et al., 2023; Taguchi et al., 1985) e semelhante ao das sementes de feno-grego (Nguyen et al., 2024b; Umezawa et al., 2018). Extensas pesquisas sobre a trigonelina são devidas à sua bioatividade multifacetada, como propriedades anti-inflamatórias, antineoplásicas e antitumorais, neuroproteção comprovada, redução da neuropatia auditiva e inibição da liberação de citocinas, controle glicêmico no diabetes mellitus, redução de distúrbios nervosos e hormonais (Aktar et al., 2024; da Costa et al., 2023; Dey & Mukherjee, 2018; Nguyen et al., 2024b). Ao fornecer uma fonte alternativa e sustentável de trigonelina, a polpa de baru poderia oferecer novas oportunidades para indústrias que buscam explorar os benefícios desse alcaloide sem se limitarem às cadeias produtivas do café e do feno-grego.

O teor de teobromina na polpa de baru foi de 0,1 mg 100 g⁻¹. Apenas algumas plantas acumulam alcaloides purínicos como a teobromina (Ashihara et al., 2013). A principal fonte de teobromina é a semente de cacau, que possui um teor de teobromina (aproximadamente 3,3%) consideravelmente maior que o da polpa de baru (Franco et al., 2013). Mesmo em baixa concentração, esse alcaloide agrega valor ao fruto de baru, devido às suas propriedades neuroprotetoras e anti-inflamatórias, contribuindo para o controle de peso e aumento do

catabolismo lipídico, além de poder prevenir a formação de cálculos renais ao inibir a cristalização do ácido úrico e promover a diurese (Zhang et al., 2024).

O ácido transcinâmico foi o mais abundante dos fenólicos identificados, cuja concentração ($5,91 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) excedeu aproximadamente cinco vezes a dos ácidos gálico e clorogênico ($1,07 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$). O teor de ácido transcinâmico da polpa de baru excedeu consideravelmente os níveis relatados por Lee et al. (2015) para azeite de oliva virgem, *Viola betonicifolia* (planta medicinal) e morango ($2,91\text{--}4,97 \mu\text{g g}^{-1}$). No entanto, a concentração desse composto fenólico na polpa de baru é menor do que a observada na canela (*Cinnamomum zeilanicum*), uma das principais fontes de ácido transcinâmico ($16,97 \text{ mg g}^{-1}$) (Guzman, 2014; Ruwizhi & Aderibigbe, 2020).

Os ácidos clorogênico e gálico, os fenólicos mais abundantes depois do ácido trans-cinâmico, são encontrados naturalmente em extratos de café verde e chá (Naveed et al., 2018). O ácido gálico também foi identificado em espécies das famílias Fabaceae, Anacardiaceae e Myrtaceae (Wianowska & Olszowy-Tomczyk, 2023). Além disso, morangos, framboesas, amoras e suco de uva são reconhecidos como fontes de ácido gálico, com concentrações variando de $0,8 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (amoras) a $11 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (suco de uva) (King & Young, 1999; Shahrzad & Bitsch, 1996; Tomás-Barberán & Clifford, 2000). Portanto, o teor de ácido gálico da polpa de baru está dentro do intervalo relatado para essas frutas. A demanda por ácido gálico e suas fontes nas indústrias farmacêutica e alimentícia está atualmente em crescimento (da Costa et al., 2023). Os frutos do café são uma importante fonte de ácido clorogênico, com concentrações que variam dependendo da forma do fruto (Costa et al., 2024). Por exemplo, grãos crus podem ter teores de ácido clorogênico de $90\text{--}174 \text{ mg g}^{-1}$, enquanto uma xícara de café pode ter conteúdos de $20\text{--}675 \text{ mg g}^{-1}$ de café coado (dos Santos et al., 2018).

Os fenólicos restantes foram encontrados em níveis de $0,07 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (ácido siríngico) a $0,35 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (ácido o-cumárico). Alimentos considerados fontes desses fenólicos apresentam

variações nas concentrações, por exemplo, batatas contêm ácido cafeico (0,9–31,4 mg g⁻¹), açaí contém ácido siríngico (1,9–2,6 mg g⁻¹) e linhaça contém ácido p-cumárico (11–142 mg g⁻¹) (da Silva et al., 2023). A diversidade de vias biossintéticas resulta na heterogeneidade dos compostos fenólicos. A via do ácido chiquímico desempenha um papel significativo na biossíntese da maioria dos fenólicos derivados de plantas (Li et al., 2024). O ácido chiquímico atua como um precursor, formando a estrutura do fenilpropano (C6–C3) e, portanto, dando origem ao nome alternativo dessa via (via fenilpropanoide). O aminoácido aromático fenilalanina, sintetizado pela via do ácido chiquímico, é desaminado pela fenilalanina amônia liase para produzir ácido transcinâmico e seus derivados, incluindo os ácidos p-/m-/o-cumárico, cafeico e clorogênico (Meinhart et al., 2019), todos identificados na polpa de baru. O ácido transcinâmico e seus derivados exibem uma ampla gama de atividades biológicas (por exemplo, hepato-, cardio- e neuroprotetoras, anti-inflamatórias, antioxidantes, antipiréticas, antiobesidade, antivirais, antimicrobianas, anti-hipertensivas, antidiabéticas, antimutagênicas e anticâncer) (Adisakwattana, 2017; Bai et al., 2021; Banc et al., 2023; Chavarria et al., 2015; Fiorentino et al., 2009; Korošec et al., 2014; Meinhart et al., 2019; Naveed et al., 2018; Ong et al., 2013; Rodrigues et al., 2019; Ruwizhi & Aderibigbe, 2020; Suzuki et al., 2002; Taofiq et al., 2015).

O alcalóide e os compostos fenólicos presentes na polpa de baru, como trigonelina, ácido *trans*-cinâmico, ácido clorogênico e ácido gálico, apresentam amplas propriedades bioativas e são reconhecidos como potentes antioxidantes naturais, com aplicabilidade nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética. Sua capacidade de neutralizar espécies reativas de oxigênio (ROS) os posiciona como alternativas eficazes aos antioxidantes sintéticos, com menor risco de efeitos adversos (Parra-Pacheco et al., 2024; Waseem et al., 2023; Zaky et al., 2024). Assim, a elevada atividade antioxidante do extrato da polpa de baru reflete diretamente

em sua rica composição fenólica, no qual os fenólicos desempenham um papel central na promoção da saúde e prevenção de doenças, consolidando destaque dessa pesquisa.

3.4 Compostos Orgânicos Voláteis

Compostos orgânicos voláteis (COV) são emitidos por plantas em concentrações variáveis, dependendo de fatores como espécie, variedade, estágio de desenvolvimento e condições ambientais. Esses compostos pertencem a diferentes categorias químicas, incluindo ésteres, aldeídos, álcoois, cetonas, lactonas, éteres, ácidos orgânicos e hidrocarbonetos de baixo peso molecular (Tomas et al., 2023). Entre os 24 VOCs identificados na polpa de baru, 22 eram sesquiterpenos, representando 91,67% da área do cromatograma. Além disso, um álcool (hexanol) e um aldeído (hexanal) foram detectados. Esses compostos, juntamente com seus índices massa/carga (m/z), tempos de retenção, índices de retenção (RIs), % de área, números CAS (Chemical Abstracts Service) e odores, estão detalhados na Tabela 6.

Tabela 6. Compostos orgânicos voláteis identificados na polpa de baru. RT = tempo de retenção. IR = índice de retenção (lx). CAS# = número de referência do Chemical Abstracts Service.

Pico	Nome comum	m/z	RT	Calc. RI	Lit. RI	Area %	CAS #	Odor
1	<i>n</i> -Hexanal	56	5.517	802	801	0.59	66-25-1	Gramma, gordura
2	<i>n</i> -Hexanol	56	7.433	869	867	0.79	111-27-3	Resina, flor, verde
3	α -Cubebene	105	24.475	1352	1351	6.84	17699-14-8	Herbáceo, cera
4	α -Copaene	119	25.492	1382	1.376	21.84	3856-25-5	Amadeirado, especiarias
5	β -Bourbonene	81	25.733	1390	1380	0.33	5208-59-3	Herbáceo
6	β -Elemene	93	25.875	1394	1.390	5.90	515-13-9	Herbáceo, cera, fresco
7	<i>E</i> -Caryophyllene	93	26.925	1427	1.428	2.99	87-44-5	Amadeirado, especiarias.

8	γ -Maaliene	91	27.167	1434	1.430	0.70	20071-49-2	
9	γ -Amorphene	161	27.233	1437	1.490	0.31	13744-15-5	
10	Aromadendrene	91	27.542	1446	1.441	9.05	489-39-4	Amadeirado
11	Cadina-3,5-diene	161	27.833	1456	1.452	0.25	267665-20-3	
12	α -Humulene	93	28.058	1463	1.467	0.26	6753-98-6	Amadeirado
13	δ -Guaiene	107	28.125	1465	1.439	0.51	3691-11-0	Amadeirado, balsâmico
14	allo-Aromadendrene	91	28.217	1468	1.460	0.92	25246-27-9	Amadeirado
15	Cadina-1(6),4-diene	161	28.558	1478	1.472	0.78	20085-11-4	
16	α -Amorphene	161	28.650	1481	1.483	1.84	20085-19-2	
17	Germacrene D	161	28.875	1488	1.480	11.69	23986-74-5	Amadeirado e especiarias
18	Ledene	105	29.208	1499	1.496	5.82	21747-46-6	
19	Bicyclgermacrene	121	29.367	1504	1500	21.15	24703-35-3	Verde, amadeirado
20	Germacrene A	93	29.692	1514	1.509	0.26	28387-44-2	-
21	δ -Cadinene	161	29.983	1524	1.522	4.95	16729-01-4	Amadeirado
22	<i>cis</i> -Calamenene	159	30.075	1526	1.528	0.32	483-77-2	Herbáceo, especiarias
23	<i>trans</i> -Cadina-1,4-diene	119	30.417	1537	1534	1.47	38758-02-0	Amadeirado
24	α -Cadinene	105	30.542	1541	1538	0.44	82468-90-4	Amadeirado

Os sesquiterpenos são moléculas com 15 átomos de carbono que pertencem à classe dos terpenoides. Terpenoides, como os encontrados na polpa de baru, são considerados os principais compostos responsáveis pelo aroma e sabor de vegetais. Os compostos mais abundantes na polpa de baru foram α -copaeno e bicyclgermacreno, com percentuais de área de 21,85 % e 21,15 %, respectivamente, seguidos por germacreno D (11,69 %), aromadendreno (9,05 %), α -cubebeno (6,84 %), β -elemeno (5,90 %) e ledeno (5,82 %) (Tabela 6). Glicosinolatos, sulfoxidos de cisteína alquilada e compostos fenólicos também desempenham papéis importantes na determinação do aroma e sabor, sendo os sesquiterpenos especialmente

significativos no envolvimento em sinalização e respostas de estresse das plantas (Li et al., 2024).

Pesquisas recentes têm focado no potencial medicinal e farmacológico de plantas produtoras de sesquiterpenos, investigando as contribuições de diferentes compostos, como os encontrados na polpa de baru (Hou et al., 2022; Nguyen et al., 2024a; Rigotti et al., 2023; Zhang et al., 2022). A predominância de sesquiterpenos observados na polpa de baru é semelhante à de outras frutas secas do Cerrado, como o *Pterodon emarginatus* Vogel (Fabaceae), conhecido como sucupira branca, que contém α -copaeno, α -cubebeno, alo-aromadendreno, β -cubebeno e γ -muruleno como componentes principais (Alves et al., 2013). Além disso, a casca do jatobá do Cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) contém os sesquiterpenos espatulenol (25,19 %) e cariofileno (13,33 %) como componentes principais (Oliveira de Veras et al., 2020)

O perfil de VOC da polpa de baru é notavelmente diferente do de frutos carnosos do mesmo bioma, como a pitaya do cerrado (*Selenicereus setaceus*), que contém principalmente ésteres (50 %), aldeídos (33,3 %) e álcoois (17,7 %) (Tomas et al., 2023). O pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) é rico em ésteres (57,89 %) e terpenoides (31,58 %) (da Costa et al., 2024), enquanto a mangaba (*Hancornia speciosa* Gomes) contém álcoois (25 %), aldeídos (25 %), terpenoides (19 %), outros hidrocarbonetos (19 %), ésteres (9 %) e cetonas (3 %) (de Lima et al., 2015).

O α -copaeno, principal VOC detectado na polpa de baru (CID PubChem 12303902), é um sesquiterpeno tricíclico comumente encontrado em várias plantas medicinais e aromáticas, especialmente em *Piper cubeba*, *Vateria copallifera* (copaíba) e *Cinnamomum zeylanicum* (canela). Este terpeno tem chamado a atenção devido às suas propriedades antioxidantes e antimutagênicas documentadas (Dong et al., 2020), bem como às suas atividades analgésicas, anti-inflamatórias (Chavan et al., 2012), hepatoprotetoras (Boyom et al., 2003), antiplasmódicas (Vinholes et al., 2014), neuroprotetoras e antitumorais (Elufioye et al., 2017;

Turkez et al., 2014). Além disso, esse composto inibe a proliferação de diversos microrganismos, incluindo *Staphylococcus aureus*, *Candida albicans*, *Bacillus subtilis* e *Escherichia coli* (Bersan et al., 2014; Wu et al., 2014; Zhang et al., 2022).

O biciclogermacreno, um VOC abundantemente presente na polpa de baru, é um agente anti-inflamatório potencial. O óleo essencial de *Syzygium variolosum*, uma variedade de jambo, demonstra alta atividade inibitória de inflamação em ensaios de lipoxigenase, principalmente devido à presença de biciclogermacreno (13,5 %), β -elemeno (20,2 %) e β -cariofileno (0,5 %), que inibem a enzima 5-LOX (Rahim et al., 2024). O biciclogermacreno é comparável ao α -copaeno em termos de atividade anti-inflamatória (de Veras et al., 2023; Saldanha et al., 2019), o que destaca a valiosa composição da polpa de baru.

Outros compostos, como δ -cadineno e germacrona, possuem propriedades antifúngicas e antibacterianas. Um estudo com extrato de *Baccharis dracunculifolia*, conhecido como alecrim do Cerrado, destacou o potencial desses compostos. Essa planta é amplamente utilizada na medicina tradicional e como fonte botânica para a produção de própolis (Rigotti et al., 2023). O β -cariofileno, um sesquiterpeno encontrado na polpa de baru, é conhecido por atrair polinizadores e desempenhar um papel nos mecanismos de defesa da planta, estimulando o crescimento e suprimindo microrganismos patogênicos (Jiménez-Bremont et al., 2024).

O β -elemeno, presente em níveis significativos na polpa de baru (5,90 %), é um sesquiterpeno lipossolúvel isolado da erva medicinal chinesa *Rhizoma zedoariae*, com potenciais propriedades antineoplásicas e quimiopreventivas (National Center for Biotechnology Information, 2022) e é registrado como um ingrediente olfativo positivo pela Associação Internacional de Fragrâncias (IFRA, 2024). Óleos essenciais de várias espécies vegetais, incluindo *Eucalyptus sp.*, *Piper equadorensense*, *Piper boehmeriifolium* e *Nepeta ukriana* L., exibem propriedades antibacterianas, antifúngicas, larvicidas e antioxidantes devido à presença de sesquiterpenos, como α -copaeno, α -pineno, aromadendreno, β -cariofileno,

biciclogermacreno, β -elemeno e germacreno, todos também encontrados na polpa de baru (Hou et al., 2022; Nguyen et al., 2023). Dessa forma, a polpa de baru é uma rica fonte de sesquiterpenos para aplicações em diferentes segmentos industriais.

Embora as plantas possam emitir uma ampla variedade de compostos orgânicos voláteis, apenas uma fração desses compostos contribui de maneira significativa para seus aromas específicos. No caso do café e do tomate, por exemplo, foram identificados mais de 1000 e 350 compostos voláteis, respectivamente, mas somente alguns são determinantes para os aromas específicos associados a cada um (Ayseli & İpek Ayseli, 2016). A polpa do baru, por sua vez, é descrita como apresentando um aroma predominantemente amadeirado com nuances herbais e tons picantes (Tabela 6). Ainda assim, estudos adicionais são necessários para identificar os compostos responsáveis por esse perfil aromático.

4. Conclusão

A composição da polpa de baru (*Dipteryx alata* Vog.) destaca seu potencial industrial como um valioso subproduto agroindustrial rico em compostos bioativos e nutrientes essenciais. Essas descobertas elevam a polpa de baru ao status de um valioso coproduto caracterizado por altos níveis de açúcares, fibras, minerais essenciais e compostos bioativos, incluindo trigonelina, taninos, vitamina C, compostos fenólicos e um perfil distinto de sesquiterpenos voláteis. Oferecendo uma alternativa sustentável e promissora às fontes bioativas tradicionais, a polpa de baru é particularmente atraente para aplicações industriais devido ao seu conteúdo de sesquiterpenos comercialmente relevantes comumente usados na produção de óleo essencial. Embora mais pesquisas sejam necessárias para otimizar os métodos de extração e avaliar a biodisponibilidade desses compostos, nossos resultados apoiam a possibilidade de incorporação da polpa de baru em formulações de alimentos funcionais, ou como farinha, para adicionar

benefícios nutricionais e antioxidantes aos produtos alimentícios. Este estudo contribui para a valorização dos resíduos agroindustriais do processamento do baru, alinhando-se com os objetivos do desenvolvimento sustentável ao promover a biodiversidade, minimizar o desperdício e criar oportunidades econômicas para o bioma Cerrado.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Lavras (UFLA), à Universidade Federal de Goiás (UFG) e ao Instituto Federal de Educação do Norte de Minas Gerais (IFNMG).

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento específico de agências públicas, comerciais ou do setor sem fins lucrativos.

Declaração de conflito de interesse

Os autores declaram que não possuem interesses financeiros concorrentes ou relações pessoais que poderiam ter influenciado o trabalho relatado neste artigo.

Disponibilidade de dados

Os dados estarão disponíveis mediante solicitação.

Referências

Acree, T. E. (2004). Flavor net and human odor space. <https://flavornet.org/flavornet.html>.

- Adams, R. P. (2017). Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectroscopy. R.P. In *Biochemical Systematics and Ecology* (4,1, Vol. 24, Issue 6). ISBN 978-1-932633-21-4. Old version available at.
- Adisakwattana, S. (2017). Cinnamic acid and its derivatives: Mechanisms for prevention and management of diabetes and its complications. In *Nutrients*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/nu9020163>.
- Aguiar, A. T. C., & da Veiga Júnior, V. F. (2021). The poisonous garden: The chemistry behind the intoxication by domestic ornamental plants. *Química Nova*, 44(8), 1093–1100. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170746>.
- Aktar, S., Ferdousi, F., Kondo, S., Kagawa, T., & Isoda, H. (2024). Transcriptomics and biochemical evidence of trigonelline ameliorating learning and memory decline in the senescence-accelerated mouse prone 8 (SAMP8) model by suppressing proinflammatory cytokines and elevating neurotransmitter release. *GeroScience*, 46(2), 1671–1691. <https://doi.org/10.1007/s11357-023-00919-x>.
- Al-Obadi, M., Ayad, H., Pokharel, S., & Ayari, M. A. (2022). Perspectives on food waste management: Prevention and social innovations. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 190–208. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.012>
- Alves, S. F., Luiz Borges, L., de Paula, J. A. M., Vieira, R. F., Ferri, P. H., do Couto, R. O., de Paula, J. R., & Freitas Bara, M. T. (2013). Chemical variability of the essential oils from fruits of *Pterodon emarginatus* in the Brazilian Cerrado. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 23(2), 224–229. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2013005000016>.
- Alves-Santos, A. M., Fernandes, D. C., & Naves, M. M. V. (2021). Baru (*Dipteryx alata* Vog.) fruit as an option of nut and pulp with advantageous nutritional and functional properties: A comprehensive review. *NFS Journal*, 24(June), 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.07.001>.
- Alves-Santos, A. M., Sampaio, K. B., Lima, M. D. S., Coelho, A. S. G., de Souza, E. L., & Naves, M. M. V. (2023). Chemical composition and prebiotic activity of baru (*Dipteryx alata* Vog.) pulp on probiotic strains and human colonic microbiota. *Food Research International*, 164, 112366. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112366>.
- Arruda, H. S., Araújo, M. V. L., & Marostica Junior, M. R. (2022). Underexploited Brazilian Cerrado fruits as sources of phenolic compounds for diseases management: A review. *Food Chemistry. Molecular Sciences*, 5, 100148. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100148>.
- Ashihara, H., Yokota, T., & Crozier, A. (2013). Chapter Four. Biosynthesis and catabolism of purine alkaloids. In N. B. T.-A. B. R. Giglioli-Guivarc'h (Ed.), *New light on alkaloid biosynthesis and future prospects*, (Vol. 68), 111–138. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408061-4.00004-3>.
- Association of Official Analytical Chemistry. Official methods of analysis. 21. ed. Gaithersburg: AOAC, 2019.
- Ayseli, M. T., & İpek Ayseli, Y. (2016). Flavors of the future: Health benefits of flavor precursors and volatile compounds in plant foods. *Trends in Food Science and Technology*, 48, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.005>.

- Bai, J., Zhang, Y., Tang, C., Hou, Y., Ai, X., Chen, X., Zhang, Y., Wang, X., & Meng, X. (2021). Gallic acid: Pharmacological activities and molecular mechanisms involved in inflammation-related diseases. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, *133*, 110985. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110985>.
- Banc, R., Rusu, M. E., Filip, L., & Popa, D.-S. (2023). Phytochemical profiling and biological activities of *Quercus* sp. galls (oak galls): A systematic review of studies published in the last 5 years. *Plants*, *12*(22). <https://doi.org/10.3390/plants12223873>.
- Belayneh Asfaw, T., Getachew Tadesse, M., Beshah Tessema, F., Woldemichael Woldemariam, H., V Chinchkar, A., Singh, A., Upadhyay, A., & Mehari, B. (2024). Ultrasonic-assisted extraction and UHPLC determination of ascorbic acid, polyphenols, and half-maximum effective concentration in *Citrus medica* and *Ziziphus spina-christi* fruits using multivariate experimental design. *Food Chemistry: X*, *22*, 101310. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101310>.
- Bersan, S. M. F., Galvão, L. C. C., Goes, V. F. F., Sartoratto, A., Figueira, G. M., Rehder, V. L. G., Alencar, S. M., Duarte, R. M. T., Rosalen, P. L., & Duarte, M. C. T. (2014). Action of essential oils from Brazilian native and exotic medicinal species on oral biofilms. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, *14*, 451. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-14-451>.
- Boyom, F. F., Ngouana, V., Zollo, P. H. A., Menut, C., Bessiere, J. M., Gut, J., & Rosenthal, P. J. (2003). Composition and anti-plasmodial activities of essential oils from some Cameroonian medicinal plants. *Phytochemistry*, *64*(7), 1269–1275. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2003.08.004>.
- Chandra, S., Roy, A., Jana, M., & Pahan, K. (2019). Cinnamic acid activates PPAR α to stimulate Lysosomal biogenesis and lower Amyloid plaque pathology in an Alzheimer's disease mouse model. *Neurobiology of Disease*, *124*, 379–395. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2018.12.007>.
- Chavan, M. J., Wakte, P. S., & Shinde, D. B. (2012). Analgesic and anti-inflammatory activities of the sesquiterpene fraction from *Annona reticulata* L. bark. *Natural Product Research*, *26*(16), 1515–1518. <https://doi.org/10.1080/14786419.2011.564583>.
- Chavarria, D., Silva, T., Martins, D., Bravo, J., Summavielle, T., Garrido, J., & Borges, F. (2015). Exploring cinnamic acid scaffold: Development of promising neuroprotective lipophilic antioxidants. *MedChemComm*, *6*(6), 1043–1053. <https://doi.org/10.1039/C5MD00018A>.
- Chung, K. T., Wong, T. Y., Wei, C. I., Huang, Y. W., & Lin, Y. (1998). Tannins and human health: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *38*(6), 421–464. <https://doi.org/10.1080/10408699891274273>.
- da Costa, C. A. R., do Nascimento, S. V., da Silva Valadares, R. B., da Silva, L. G. M., Machado, G. G. L., da Costa, I. R. C., Nahon, S. M. R., Rodrigues, L. J., & Vilas Boas, E. V. B. (2024). Proteome and metabolome of *Caryocar brasiliense* camb. fruit and their interaction during development. *Food Research International*, *191*, 114687. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114687>.
- da Costa, C. A. R., Machado, G. G. L., Rodrigues, L. J., de Barros, H. E. A., Natarelli, C. V. L., & Boas, E. V. B. V. (2023). Phenolic compounds profile and antioxidant activity of

purple passion fruit's pulp, peel and seed at different maturation stages. *Scientia Horticulturae*, 321(May). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112244>.

- da Costa, C. A. R., Pinheiro, F. S., da Silva, L. G. M., da Silva, F. M. O., & Toro, M. J. U. (2024). Evaluation of physicochemical properties, bioactive compounds, and antioxidant activity in traditional and decaffeinated coffee blends from the Cerrado Mineiro Region in Brazil. *Food and Humanity*, 3, 100388. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100388>.
- da Silva, A. P. G., Sganzerla, W. G., John, O. D., & Marchiosi, R. (2023). A comprehensive review of the classification, sources, biosynthesis, and biological properties of hydroxybenzoic and hydroxycinnamic acids. *Phytochemistry Reviews*. <https://doi.org/10.1007/s11101-023-09891-y>.
- da Silva, N. L.F., Dantas-Medeiros, R., de Aragão Tavares, E., Porto, D. L., da Silva, V. C., Xavier-Santos, J. B., Passos, J. G. R., de Souza Paiva, W., de Oliveira Rocha, H. A., de Freitas Fernandes-Pedrosa, M., Fernandes, J. M., & Zucolotto, S. M. (2024). Phenolic-rich extract from Bryophyllum pinnatum leaf cultivated under drought stress conditions modulates the antioxidant and anti-inflammatory response. *Phytochemistry Letters*, 61, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2024.03.013>.
- da Silva, S. R., Ferreira, T. H. B., Giunco, A. J., & Argandoña, E. J. S. (2021). Nutritional potential and effect of the solvent on the extraction of secondary metabolites from pulp and bark of baru (*Dipteryx alata*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(4), 3453–3460. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00926-6>.
- da Silva Sousa, H. M., Leal, G. F., da Silva Gualberto, L., de Freitas, B. C. B., Guarda, P. M., Borges, S. V., Morais, R. A., & de Souza Martins, G. A. (2023). Exploration of the chemical characteristics and bioactive and antioxidant potential of tucumã (*Astrocaryum vulgare*), peach palm (*Bactris gasipaes*), and bacupari (*Garcinia gardneriana*) native Brazilian fruits. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1, 1–14. <https://doi.org/10.1007/S13399-023-05145-1>.
- Das, A. K., Islam, M. N., Faruk, M. O., Ashaduzzaman, M., & Dungani, R. (2020). Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. *South African Journal of Botany*, 135, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.08.008>.
- de Lima, J. P., Fante, C. A., Freitas Pires, C. R., Nunes, E. E., Alves, R. R., de Siqueira Elias, H. H., Nunes, C. A., & de Barros Vilas Boas, E. V. (2015). The antioxidative potential and volatile constituents of mangaba fruit over the storage period. *Scientia Horticulturae*, 194, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.05.035>.
- de Melo, L. F. M., Aquino-Martins, V. G. Q., da Silva, A. P. D., Oliveira Rocha, H. A., & Scortecchi, K. C. (2023). Biological and pharmacological aspects of tannins and potential biotechnological applications. *Food Chemistry*, 414, 135645. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135645>.
- de Veras, B. O., Moura, G. M. M., Barros, A. V., Vanusa da Silva, M., Assis, P. A. C., Aguiar, J. C. R. O. F., Navarro, D. M. D. A. F., Ximenes, R. M., Wanderley, A. G., Oliveira, M. B. M., & Lopes, A. C. S. (2023). Antinociceptive and anti-inflammatory activities of essential oil of the leaves of *Amburana cearensis* (Allemão) A. C. Smith. From the semi-arid region of Northeastern Brazil. *Journal of Ethnopharmacology*, 317, 116858. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.116858>.

- Dey, A., & Mukherjee, A. (2018). Chapter 6. Plant-derived alkaloids: A promising window for neuroprotective drug discovery. In G. B. T.-D. and D. of N. A. from N. P. Brahmachari (Ed.), *Natural product drug discovery* (pp. 237–320). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809593-5.00006-9>.
- Dong, W.-Y., Li, R., Wang, Y., Tan, J., Tang, S.-H., & Jiang, Z.-T. (2020). Antioxidant compound screening and chemical composition of sweet ginger (*Alpinia coriandriodora* D. Fang) essential oil and the mechanism of scavenging radicals. *Journal of Food Biochemistry*, 44(8), e13293. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13293>.
- dos Santos, C. O., Silva, M. C. S., & Castiglioni, G. L. (2021). Industrial yeast strains competence in mixed culture with wild flocculent yeast. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 36(September), 102144. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102144>.
- dos Santos, R. A., Prado, M. A., Pertierra, R. E., & Palacios, H. A. (2018). Análises de açúcares e ácidos clorogênicos de cafês colhidos em diferentes estádios de maturação e após o processamento [Analysis of sugars and chlorogenic acids in coffees harvested at different stages of maturity and after processing.] In *Brazilian Journal of Food Technology*. SciELO, 21. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.16317>.
- Elufioye, T. O., Berida, T. I., & Habtemariam, S. (2017). Plants-derived neuroprotective agents: Cutting the cycle of cell death through multiple mechanisms. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine: eCAM*, 2017, 3574012. <https://doi.org/10.1155/2017/3574012>.
- Fecka, I., Nowicka, A., Kucharska, A. Z., & Sokół-Łętowska, A. (2021). The effect of strawberry ripeness on the content of polyphenols, cinnamates, L-ascorbic and carboxylic acids. *Journal of Food Composition and Analysis*, 95, 103669. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103669>.
- Ferreira da Silva, N. L., Dantas-Medeiros, R., de Aragão Tavares, E., Porto, D. L., da Silva, V. C., Xavier-Santos, J. B., Passos, J. G. R., de Souza Paiva, W., Oliveira Rocha, H. A., de Freitas Fernandes-Pedrosa, M., Fernandes, J. M., & Zucolotto, S. M. (2024). Phenolic-rich extract from *Bryophyllum pinnatum* leaf cultivated under drought stress conditions modulates the antioxidant and anti-inflammatory response. *Phytochemistry Letters*, 61, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2024.03.013>.
- Filho, J. O. C. B., Magalhães, C. S., de Santana, D. C. A. S., Martins Filho, J. P. B., Sá, R. D., Luz da Silva, R. V., Randau, K. P., & de Santana, F. J. M. (2023). Methodologies for determining oxalic acid in plant species consumed by humans: An integrative review. *Journal of Herbal Medicine*, 40, 100682. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2023.100682>.
- Fiorentino, A., D'Abrosca, B., Pacifico, S., Mastellone, C., Scognamiglio, M., & Monaco, P. (2009). Identification and assessment of antioxidant capacity of phytochemicals from kiwi fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 4148–4155. <https://doi.org/10.1021/jf900210z>.
- Food and Drug Administration (FDA). (2020). *Daily value and percent daily value: Changes on the new nutrition and supplement facts labels. (Vol.1)*. (pp 1-6). *Food and Drug Administration*. <https://www.fda.gov/food/nutrition-facts-label/>.
- Forsythe, S. J. (2013). *Microbiologia da segurança dos alimentos*. (Food Safety Microbiology). 2nd edition. Porto Alegre: Publisher Artmed, 2013. Book.

- Franco, R., Oñatibia-Astibia, A., & Martínez-Pinilla, E. (2013). Health benefits of methylxanthines in cacao and chocolate. In *Nutrients* (Vol. 5, Issue 10, pp. 4159–4173), 5(10), 4159–4173. <https://doi.org/10.3390/nu5104159>.
- Gadioli, I. L., Asquiere, E. R., de Lacerda de Oliveira, L., de Alencar Figueiredo, L. F., Celestino, S. M. C., Batista, R. D., & de Assis Ramirez Asquiere, E. M. (2022). Influence of climatic and geographical variations on the nutritional and antioxidant properties of baru mesocarp (*Dipteryx alata* Vog.) and the crystallization of sucrose by secondary nucleation. *Sugar Tech*, 24(3), 900–913. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01042-x>.
- González-Molina, E., Domínguez-Perles, R., Moreno, D. A., & García-Viguera, C. (2010). Natural bioactive compounds of Citrus limon for food and health. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 51(2), 327–345. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2009.07.027>.
- Guzman, J. D. (2014). Natural cinnamic acids, synthetic derivatives and hybrids with antimicrobial activity. In *Molecules* (Vol. 19, Issue 12, pp. 19292–19349), 19(12), 19292–19349. <https://doi.org/10.3390/molecules191219292>.
- Hadidi, M., Amoli, P. I., Jelyani, A. Z., Hasiri, Z., Rouhafza, A., Ibarz, A., Khaksar, F. B., & Tabrizi, S. T. (2020). Polysaccharides from pineapple core as a canning by-product: Extraction optimization, chemical structure, antioxidant and functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 2357–2364. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.092>.
- Hou, T., Sana, S. S., Li, H., Xing, Y., Nanda, A., Netala, V. R., & Zhang, Z. (2022). Essential oils and its antibacterial, antifungal and anti-oxidant activity applications: A review. *Food Bioscience*, 47, 101716. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101716>.
- International Fragrance Association (IFRA). (2024). IFRA Fragrance Ingredient Glossary (FIG), harmonized list of positive olfactory descriptors of fragrance ingredients. <https://ifrafragrance.org/priorities/ingredients/ifra-transparency-list>.
- Jiménez-Bremont, J. F., González-Pérez, E., Ortega-Amaro, M. A., Madrigal-Ortiz, S., Duque-Ortiz, A., & Mendoza-Mendoza, A. (2024). Volatile organic compounds emitted by Trichoderma: Small molecules with biotechnological potential. *Scientia Horticulturae*, 325, 112656. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112656>.
- King, A., & Young, G. (1999). Characteristics and occurrence of phenolic phytochemicals. *Journal of the American Dietetic Association*, 99(2), 213–218. [https://doi.org/10.1016/S0002-8223\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0002-8223(99)00051-6).
- Kolap, R. M., Kakade, P. S., Mankar, G. D., Barmukh, R. B., Gacche, R. N., & Zimare, S. B. (2022). Bioprospection of underutilized wild Cissus woodrowii fruits for nutritional value and characterization of green-extracted antioxidant phenolic compounds. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 29, 100371. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2022.100371>.
- Konstantinidis, N., Franke, H., Schwarz, S., & Lachenmeier, D. W. (2023). Risk assessment of trigonelline in coffee and coffee By-Products. *Molecules*, 28(8). <https://doi.org/10.3390/molecules28083460>.
- Korošec, B., Sova, M., Turk, S., Kraševc, N., Novak, M., Lah, L., Stojan, J., Podobnik, B.,

- Berne, S., Zupanec, N., Bunc, M., Gobec, S., & Komel, R. (2014). Antifungal activity of cinnamic acid derivatives involves inhibition of benzoate 4-hydroxylase (CYP 53). *Journal of Applied Microbiology*, *116*(4), 955–966. <https://doi.org/10.1111/jam.12417>.
- Kumar, H., Dhalaria, R., Guleria, S., Sharma, R., Kumar, D., Verma, R., Cruz-Martins, N., Dhanjal, D. S., Chopra, C., Kaur, T., Kumar, V., Siddiqui, S. A., Manickam, S., Cimler, R., & Kuca, K. (2023). Non-edible fruit seeds: Nutritional profile, clinical aspects, and enrichment in functional foods and feeds. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *0*(0), 1–20. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2264973>.
- Lee, J., Lee, D. G., Park, J. Y., Chae, S., & Lee, S. (2015). Analysis of the <i>trans</i>-Cinnamic Acid Content in <i>Cinnamomum</i> spp. <i>and Commercial Cinnamon Powder Using HPLC. Journal of Agricultural Chemistry and Environment</i>, *04*(4), 102–108. <https://doi.org/10.4236/jacen.2015.44011>
- Li, Y., Bao, T., Zhang, J., Li, H., Shan, X., Yan, H., Kimani, S., Zhang, L., & Gao, X. (2024). The coordinated interaction or regulation between floral pigments and volatile organic compounds. *Horticultural Plant Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2024.01.002>.
- Mahajan, R., Prasad, S., Gaikwad, S., & Itankar, P. (2023). Antioxidant phenolic compounds from seeds of *Hordeum vulgare* Linn. ameliorates diabetic nephropathy in streptozotocin-induced diabetic rats. *Journal of Traditional Chinese Medical Sciences*, *10*(3), 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.jtcms.2023.06.010>.
- Maugeri, A., Lombardo, G. E., Cirimi, S., Süntar, I., Barreca, D., Laganà, G., & Navarra, M. (2022). Pharmacology and toxicology of tannins. *Archives of Toxicology*, *96*(5), 1257–1277. <https://doi.org/10.1007/s00204-022-03250-0>.
- Meinhart, A. D., Damin, F. M., Caldeirão, L., de Jesus Filho, M., da Silva, L. C., da Silva Constant, L., Filho, J. T., Wagner, R., & Godoy, H. T. (2019). Chlorogenic and caffeic acids in 64 fruits consumed in Brazil. *Food Chemistry*, *286*(January), 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.004>.
- Mitreă, L., Calinoiu, L. F., Teleky, B. E., Szabo, K., Martău, A. G., Nemes, S. A., Plamada, D., Pascuta, M. S., Barta, G., Varvara, R. A., & Vodnar, D. C. (2023). Fruit and vegetable wastes for biobased chemicals. *Fruit and Vegetable Waste Utilization and Sustainability*, 43–76. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91743-8.00015-0>.
- Monteiro, G. M., Carvalho, E. E. N., & Boas, E. V. B. V. (2022). Baru (*Dipteryx alata* Vog.): Fruit or almond? A review on applicability in food science and technology. *Food Chemistry Advances*, *1*(August), 100103. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100103>.
- Muhaxi, M., Liu, F., & Ng, T. B. (2023). Structural characterization and in vitro hepatoprotective activity of a novel antioxidant polysaccharide from fruiting bodies of the mushroom *Pleurotus ferulae*. *International Journal of Biological Macromolecules*, *243*, 125124. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125124>.
- Muthu, N., Lee, S. Y., Phua, K. K., & Bhore, S. J. (2016). Nutritional, medicinal and toxicological attributes of Star-Fruits (*Averrhoa carambola* L.): A review. *Bioinformation*, *12*(12), 420–424. <https://doi.org/10.6026/97320630012420>.
- Naik, V. V., Patil, N. S., Aparadh, V. T., & Karadge, B. A. (2014). Methodology in determination of oxalic acid in plant tissue: A comparative approach. *Journal of Global*

Trends in Pharmaceutical Sciences Journal, 5(2), 1662–1672. ISSN: 2230-7346.
<https://www.researchgate.net/publication/260835371>.

National Center for Biotechnology Information (NCBI). (2022). PubChem database. *Accessed march, May 2024*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/Accesso>.

Naveed, M., Hejazi, V., Abbas, M., Kamboh, A. A., Khan, G. J., Shumzaid, M., Ahmad, F., Babazadeh, D., FangFang, X., Modarresi-Ghazani, F., WenHua, L., & XiaoHui, Z. (2018). Chlorogenic acid (CGA): A pharmacological review and call for further research. *Biomedicine and Pharmacotherapy = Biomédecine and Pharmacothérapie*, 97, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.10.064>.

Nguyen, Q.H., Nguyen, T.T., Truong Do, V., Chu, T.T.H., Tran, H.T., Nguyen, S.K., Nguyen, P.H., Nguyen, T.H., Le, N. D., Nguyen, D.T., Nguyen, T.P.T., Nguyen, V.P., Nguyen, T.A., Koshovyi, P., Raal, A. (2023). New insights into the chemical composition of Piper spp. collected in the northern region of Vietnam. *Biochemical Systematics and Ecology*, 112 (September 2023), 104770. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104770> ISSN 0305-1978.

Nguyen, V., Taine, E. G., Meng, D., Cui, T., & Tan, W. (2024). Pharmacological activities, therapeutic effects, and mechanistic actions of trigonelline. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(6). <https://doi.org/10.3390/ijms25063385>.

Oliveira de Veras, B., Melo de Oliveira, M. B., Granja da Silva Oliveira, F., Queiroz Dos Santos, Y., Saturnino de Oliveira, J. R., Lúcia de Menezes Lima, V., Guedes da Silva Almeida, J. R., Maria do Amaral Ferraz Navarro, D., Ribeiro de Oliveira Farias de Aguiar, J. C., Aguiar, J. D. S., Gorlach-Lira, K., Dias de Assis, C. R., Vanusa da Silva, M., & Catarina de Souza Lopes, A. (2020). Chemical composition and evaluation of the antinociceptive, antioxidant and antimicrobial effects of essential oil from *Hymenaea cangaceira* (Pinto, Mansano & Azevedo) native to Brazil: A natural medicine. *Journal of Ethnopharmacology*, 247, 112265. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112265>

Oliveira, J. P. L., Santos, I. A., Souza, L. R., Cândido, G. S., Franco, M., Vilas Boas, E. V. B., & Nunes, E. E. C. (2023). Evaluation of the antioxidant activity and total phenolic compounds of lychee pulp by different dehydration methods. *Revista Engenharia na Agricultura – REVENG*, 31(Contínua), 43–50. <https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.14699>.

Ong, K. W., Hsu, A., & Tan, B. K. H. (2013). Anti-diabetic and anti-lipidemic effects of chlorogenic acid are mediated by ampk activation. *Biochemical Pharmacology*, 85(9), 1341–1351. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2013.02.008>.

Palanisamy, S., Selvaraju, G. D., Selvakesavan, R. K., Venkatachalam, S., Bharathi, D., & Lee, J. (2024). Unlocking sustainable solutions: Nanocellulose innovations for enhancing the shelf life of fruits and vegetables – A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 261(1), 129592. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129592>.

Parra-Pacheco, B., Cruz-Moreno, B. A., Aguirre-Becerra, H., García-Trejo, J. F., & Feregrino-Pérez, A. A. (2024). Bioactive Compounds from Organic Waste. In *Molecules* (Vol. 29, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/molecules29102243>

Pateiro, M., Domínguez, R., Munekata, P. E. S., Nieto, G., Bangar, S. P., Dhama, K., &

- Lorenzo, J. M. (2023). Bioactive Compounds from Leaf Vegetables as Preservatives. In *Foods* (Vol. 12, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/foods12030637>.
- Pizzi, A. (2021). Tannins medical / pharmacological and related applications: A critical review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 22(April), 100481. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100481>
- Prasanna, V., Prabha, T. N., & Tharanathan, R. N. (2007). Fruit ripening phenomena-an overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/10408390600976841>.
- Rahim, F. A. M., Salleh, W. M. N. H. W., Ab Ghani, N., Salihu, A. S., & Arzmi, M. H. (2024). Chemical composition and biological activities of essential oil of the Malaysian endemic *Syzygium variolosum* (King) Chantar. & J.Parn. *Natural Product Research*, 1–6. <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2353914>.
- Rigotti, M., Facanali, R., Haber, L. L., Vieira, M. A. R., Isobe, M. T. C., Cavallari, M. M., Bajay, M. M., Zucchi, M. I., Pinheiro, J. B., & Marques, M. O. M. (2023). Chemical and genetic diversity of *Baccharis dracunculifolia* DC. (Asteraceae) from the Cerrado biome. *Biochemical Systematics and Ecology*, 111(September). <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104735>.
- Rodrigues, M. P., Tomaz, D. C., Ângelo de Souza, L., Onofre, T. S., Aquiles de Menezes, W., Almeida-Silva, J., Suarez-Fontes, A. M., Rogéria de Almeida, M., Manoel da Silva, A., Bressan, G. C., Vannier-Santos, M. A., Rangel Fietto, J. L., & Teixeira, R. R. (2019). Synthesis of cinnamic acid derivatives and leishmanicidal activity against *Leishmania braziliensis*. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 183, 111688. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2019.111688>.
- Rufino, M. S. M., Alves, R. E., de Brito, E. S., Pérez-Jiménez, J., Saura-Calixto, F., & Mancini-Filho, J. (2010). Bioactive compounds and antioxidant capacities of 18 non-traditional tropical fruits from Brazil. *Food Chemistry*, 121(4), 996–1002. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.037>.
- Ruwizhi, N., & Aderibigbe, B. A. (2020). Cinnamic acid derivatives and their biological efficacy. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(16). <https://doi.org/10.3390/ijms21165712>.
- Saldanha, A. A., Vieira, L., Ribeiro, R. I. M. A., Thomé, R. G., Santos, H. B. D., Silva, D. B., Carollo, C. A., Oliveira, F. M., Lopes, D. O., Siqueira, J. M., & Soares, A. C. (2019). Chemical composition and evaluation of the anti-inflammatory and antinociceptive activities of *Duguetia furfuracea* essential oil: Effect on edema, leukocyte recruitment, tumor necrosis factor alpha production, iNOS expression, and adenosinergic and opioidergic systems. *Journal of Ethnopharmacology*, 231, 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2018.11.017>.
- Santos, M. G., Carvalho, C. E. M., Kelecom, A., Ribeiro, M. L. R. C., de Freitas, C. V. C., da Costa, L. M., & Fernandes, L. V. G. (2005). Cianogênese em esporófitos de pteridófitas avaliada pelo teste do ácido pícrico [Cyanogenesis in pteridophyte sporophytes evaluated by the picric acid test] *Acta Botânica Brasileira*, 19(4), 783–788. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062005000400014>.

- Santos-Sánchez, N. F., Salas-Coronado, R., Villanueva-Cañongo, C., & Hernández-Carlos, B. (2019). Ch. 2). Antioxidant compounds and their antioxidant mechanism E. Shalaby (Ed.); p. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85270>.
- Schulz, M., Seraglio, S. K. T., Brugnerotto, P., Gonzaga, L. V., Costa, A. C. O., & Fett, R. (2020). Composition and potential health effects of dark-colored underutilized Brazilian fruits – A review. *Food Research International*, 137(June), 109744. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109744>.
- Seğmenoğlu, M. S., & Çenet, M. (2024). Biochemical properties of *Crataegus monogyna* jacq. Fruit extract and effect on the A549 lung cancer cell line. *Kuwait Journal of Science*, 51(1), 100146. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.10.013>.
- Shahrzad, S., & Bitsch, I. (1996). Determination of some pharmacologically active phenolic acids in juices by high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography. A*, 741(2), 223–231. [https://doi.org/10.1016/0021-9673\(96\)00169-0](https://doi.org/10.1016/0021-9673(96)00169-0).
- Siener, R., Seidler, A., & Hönow, R. (2021). Oxalate-rich foods. *Food Science and Technology*, 41, Suppl. 1 (June), 169–173. <https://doi.org/10.1590/fst.10620>.
- Strohecker and Henning, 1967. Strohecker, R., & Henning, H. M. (1967). *Análisis de vitaminas: Métodos comprobados* (1th ed.). Paz Montalvo.
- Suzuki, A., Kagawa, D., Ochiai, R., Tokimitsu, I., & Saito, I. (2002). Green coffee bean extract and its metabolites have a hypotensive effect in spontaneously hypertensive rats. *Hypertension Research*, 25(1), 99–107. <https://doi.org/10.1291/hypres.25.99>.
- Taguchi, H., Sakaguchi, M., & Shimabayashi, Y. (1985). Trigonelline content in coffee beans and the thermal conversion of trigonelline into nicotinic acid during the roasting of coffee beans. *Agricultural and Biological Chemistry*, 49(12), 3467–3471. <https://doi.org/10.1080/00021369.1985.10867295>.
- Taofiq, O., Calhella, R. C., Heleno, S., Barros, L., Martins, A., Santos-Buelga, C., Queiroz, M. J. R. P., & Ferreira, I. C. F. R. (2015). The contribution of phenolic acids to the anti-inflammatory activity of mushrooms: Screening in phenolic extracts, individual parent molecules and synthesized glucuronated and methylated derivatives. *Food Research International*, 76(3), 821–827. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.044>.
- Tomas, M. G., Rodrigues, L. J., Almeida Lobo, F., Takeuchi, K. P., de Paula, N. R. F., Pinto, D. M., Nhantumbo, N., Pizzatto, M., Oualmakran, Y., Machado, G. G. L., & Boas, E. V. B. V. (2023). Physicochemical characteristics and volatile profile of pitaya (*Selenicereus setaceus*). *South African Journal of Botany*, 154, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.01.020>
- Tomás-Barberán, F. A., & Clifford, M. N. (2000). Dietary hydroxybenzoic acid derivatives – Nature, occurrence and dietary burden. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(7), 1024–1032. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(20000515\)80:7<1024::AID-JSFA567>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(20000515)80:7<1024::AID-JSFA567>3.0.CO;2-S).
- Turkez, H., Togar, B., Tatar, A., Geyikoglu, F., & Hacimuftuoglu, A. (2014). Cytotoxic and cytogenetic effects of α -copaene on rat neuron and N2a neuroblastoma cell lines. *Biologia*, 69(7), 936–942. <https://doi.org/10.2478/s11756-014-0393-5>.

- Umezawa, K., Kojima, I., Simizu, S., Lin, Y., Fukatsu, H., Koide, N., Nakade, Y., & Yoneda, M. (2018). Therapeutic activity of plant-derived alkaloid conophylline on metabolic syndrome and neurodegenerative disease models. *Human Cell*, 31(2), 95–101. <https://doi.org/10.1007/s13577-017-0196-4>
- USEPA. (2017). Test methods for evaluation solid waste physical and chemical methods. *USEPA*, 235, 245. <https://www.epa.gov/>.
- Vinholes, J., Rudnitskaya, A., Gonçalves, P., Martel, F., Coimbra, M. A., & Rocha, S. M. (2014). Hepatoprotection of sesquiterpenoids: A quantitative structure–activity relationship (QSAR) approach. *Food Chemistry*, 146, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.039>.
- Wang, D., Yeats, T. H., Uluisik, S., Rose, J. K. C., & Seymour, G. B. (2018). Fruit softening: Revisiting the role of pectin. *Trends in Plant Science*, 23(4), 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.01.006>.
- Waseem, M., Majeed, Y., Nadeem, T., Naqvi, L. H., Khalid, M. A., Sajjad, M. M., Sultan, M., Khan, M. U., Khayrullin, M., Shariati, M. A., & Lorenzo, J. M. (2023). Conventional and advanced extraction methods of some bioactive compounds with health benefits of food and plant waste: A comprehensive review. *Food Frontiers*, 4(4), 1681–1701. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fft2.296>
- Wianowska, D., & Olszowy-Tomczyk, M. (2023). A concise profile of gallic acid-from its natural sources through biological properties and chemical methods of determination. *Molecules*, 28(3). <https://doi.org/10.3390/molecules28031186>.
- Wu, J.-G., Peng, W., Yi, J., Wu, Y.-B., Chen, T.-Q., Wong, K.-H., & Wu, J.-Z. (2014). Chemical composition, antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus* and a proapoptotic effect in SGC-7901 of the essential oil from *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. leaves. *Journal of Ethnopharmacology*, 154(1), 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.04.002>.
- Zaky, A. A., Akram, M. U., Rybak, K., Witrowa-Rajchert, D., & Nowacka, M. (2024). Bioactive compounds from plants and by-products: Novel extraction methods, applications, and limitations. *AIMS Molecular Science*, 11(2), 150–188. <https://doi.org/10.3934/molsci.2024010>
- Zhang, M., Zhang, H., Jia, L., Zhang, Y., Qin, R., Xu, S., & Mei, Y. (2024). Health benefits and mechanisms of theobromine. *Journal of Functional Foods*, 115, 106126. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106126>.
- Zhang, S., Zhao, X., He, X., Yang, L., Wang, Y., Liu, F., Wang, C., Hua, Q., Wu, Y., & Liu, Z. (2022). Metabolic engineering of *Escherichia coli* for the biosynthesis of α -copaene from glucose. *Biochemical Engineering Journal*, 186(July), 108561. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108561>.

CAPÍTULO 4

Artigo formatado para submissão à *Industrial Crops and Products*.

RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DE BARU COMO MATÉRIA-PRIMA PARA OBTENÇÃO DE FILMES BIODEGRADÁVEIS ATIVOS E NANOESTRUTURADOS

Gracieli de Miranda Monteiro^a *, Rafael Carvalho do Lago^b , Gustavo Henrique Denzin Tonoli^b, Marina Rocha Komerowski^c, Alessandro de Oliveira Rios^c, Elisângela Elena Nunes Carvalho^d, Eduardo Valério de Barros Vilas Boas^d.

^a Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, 74690-900, Goiânia, Go, Brasil.

^b Departamento de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras, 37203-202, Lavras, MG, Brasil.

^c Instituto de Ciências e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

^d Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, 37200-900, Lavras, MG, Brasil.

***Autor Correspondente:**

gracieli.nutri@gmail.com

DESTAQUES

- Géis lignocelulósicos nanoestruturados foram produzidos a partir do endocarpo de baru.
- Extrato de polpa de baru, rico em quercetina e ácido ferúlico, foi obtido com sucesso.
- Filmes biodegradáveis com gel e extrato de baru exibiram alta capacidade antioxidante.
- O extrato de baru reduziu a hidrofobicidade, mas comprometeu a barreira ao vapor.
- Filmes com gel e 6% de extrato de baru apresentaram melhor estabilidade térmica.

RESUMO

Este estudo investiga a valorização de resíduos da indústria da castanha do baru, particularmente o endocarpo, como fonte de celulose para a produção de filmes biodegradáveis ativos. Géis de micro/nanofibrilas lignocelulósicas (LCMNF) foram obtidos por pré-tratamento alcalino e refino mecânico (mesh 2832 e 4060), sendo o gel 2832 selecionado por apresentar maior uniformidade (83% das partículas $< 5\mu\text{m}^2$) e viscosidade ($k= 3,286 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$). Um extrato hidroalcoólico da polpa do baru, rico em ácidos fenólicos (quercetina e ácido ferúlico, 59,81 e 5,55 $\mu\text{g/g}$ de matéria integral, respectivamente) foi incorporado em concentrações de 3% (ACE3) e 6% (ACE6) em filmes à base de amido e LCMNF. Os filmes com maior concentração de extrato exibiram alto teor de fenólicos totais de 521,78 mg GAE/g e maior capacidade antioxidante nos ensaios fosfomolibdênio (81,7 mg AAE/g) e DPPH (24%). A hidrofiliçidade foi diminuída com aumento da concentração de extrato, com o ângulo de contato atingindo 79,58° no ACE6. Além de proporcionar maior estabilidade térmica a esses filmes. Entretanto, a resistência à tração (26,34 MPa) e barreira ao vapor de água (WVP 7,30 g mm/m² dia kPa) foram comprometidas com aumento do extrato. Esses resultados indicam que os filmes contendo amido, LCMNF e extrato da polpa do baru apresentam potencial promissor como revestimento antioxidante termicamente estável. O estudo destaca a utilização sustentável do endocarpo e polpa do baru, incentivando a valorização econômica e o reaproveitamento dos resíduos agroindustriais.

Palavras Chave:

Micro/Nanofibrilas celulósicas

Nanocelulose (CNF)

Lignina

Quercetina

Ácido ferúlico

1. INTRODUÇÃO

As embalagens alimentícias, embora essenciais para a proteção e conservação dos alimentos, representam um grave problema ambiental devido à predominância de materiais derivados de polímeros sintéticos, como os plásticos à base de petróleo (Kumar et al., 2023; Morcillo-Martín et al., 2023; Palanisamy et al., 2024). Esses materiais dependem de recursos não renováveis, contribuem para emissões de gases de efeito estufa durante sua produção e apresentam baixa biodegradabilidade, resultando em acúmulo de resíduos persistentes no ambiente (Vigneswari et al., 2024; Zhao et al., 2023). Esse cenário, agravado pelo uso indiscriminado e crescente consumo global, desafia as metas de sustentabilidade e combate às mudanças climáticas previstas nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (2024).

Como alternativa, biopolímeros de fontes renováveis têm sido amplamente estudados para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis, visando minimizar os impactos ambientais (do Val Siqueira et al., 2021; Gunawardene et al., 2021). Dentre eles, o amido destaca-se como um material de grande interesse devido à sua abundância, baixo custo e biodegradabilidade. Contudo, filmes produzidos exclusivamente com amido apresentam limitações significativas, como baixa resistência mecânica e alta hidrofiliabilidade, que restringem suas aplicações em condições de alta umidade (Bangar et al., 2024; Garuti et al., 2024).

Para superar essas limitações, a incorporação de nanomateriais em matrizes de amido tem se mostrado uma estratégia tecnológica promissora. A nanocelulose, derivada de resíduos lignocelulósicos, é especialmente atrativa por suas propriedades únicas, como alta resistência, grande área superficial e estabilidade térmica. Sua adição aos filmes pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas e de barreira, ampliando o desempenho desses materiais frente às embalagens convencionais (Garuti et al., 2024; Li et al., 2021). Entre as possíveis fontes de nanocelulose, os resíduos de frutos nativos do Cerrado destacam-se pelo seu potencial sustentável.

O Brasil, detentor de rica biodiversidade, apresenta vasto potencial para o aproveitamento de resíduos oriundos de frutos nativos, como o baru (*Dipteryx alata* Vogel). Esse fruto do Cerrado é economicamente valorizado por sua castanha comestível, que corresponde apenas 5% do fruto. Os 95% restantes – epicarpo, mesocarpo e endocarpo - são frequentemente descartados como resíduos pela indústria (Alves-Santos et al., 2021; Monteiro et al., 2022; Oliveira et al., 2024). Esses subprodutos, entretanto, são ricos em fibras

lignocelulósicas e compostos bioativos, como fenólicos e terpenoides, com propriedades antioxidantes e antimicrobianas amplamente exploradas nas indústrias alimentícia e farmacêutica (Naresh Kumar et al., 2019; Ritika et al., 2024).

Especificamente os compostos bioativos, explorados a partir desses potenciais resíduos oferecem oportunidade para o desenvolvimento de tecnologias aplicadas às embalagens ativas, adicionado funcionalidades como controle de sistemas de liberação ou absorção de sabor, ação antioxidante e antimicrobiana, essenciais para prolongar a vida útil dos alimentos (Carvalho et al., 2024).). E a nanotecnologia pode ser uma tecnologia eficiente para obtenção de géis de micro/nanofibrilas lignocelulósicas (LCMNF) a partir do endocarpo do baru, com potencial aplicação como reforços estruturais em filmes biodegradáveis, melhorando suas propriedades mecânicas e funcionais (Hewson et al., 2024; Li et al., 2021; Mascarenhas et al., 2024).

Essa estratégia de aproveitamento dos resíduos do baru contribui não apenas para redução de desperdícios, mas também promove a bioeconomia e a sustentabilidade, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável elencados para enfrentar os desafios do século, conforme apontado pelas Nações Unidas (2024)

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo desenvolver filmes biodegradáveis ativos a partir de uma matriz de amido, reforçada com gel de micro/nanofibrilas lignocelulósicas e extrato da polpa do baru. A pesquisa se destaca pela aplicação inédita dos resíduos do baru como matéria-prima para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis e funcionais, contribuindo para o avanço de tecnologias inovadoras na área de embalagens alimentícias.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais amostrais

Os resíduos do processamento da castanha do baru foram fornecidos pela filial da empresa multinacional Barukas (Carlsbad- Califórnia), localizada em Arinos, Minas Gerais, Brasil. O processamento das amostras foi realizado no laboratório de nanotecnologia e engenharia de biomateriais (UFLA). Após lavagem e sanitização, os resíduos foram processados para separação das partes constituintes: epicarpo, mesocarpo e endocarpo. O conjunto epicarpo-mesocarpo, chamado neste estudo de “polpa”, foi utilizado para extração de compostos bioativos, enquanto o endocarpo foi utilizado para obtenção de géis LCMNF.

2.2 Extrato Hidroalcoólico da Polpa do Baru

O extrato vegetal da polpa do baru foi preparado a partir de 2,5 g de amostra homogeneizados com 40 mL de etanol (40%), solvente definido em estudos anteriores, como o mais efetivo na extração de compostos fenólicos totais. A amostra foi agitada por 30 minutos, submetida ao banho ultrassônico por mais 30 minutos e centrifugada a 10142 g à 4°C, por 20 minutos. O extrato foi filtrado em papel filtro e o filtrado armazenado em frasco âmbar a -18°C, até utilização, conforme metodologia adaptada de Rufino et al. (2010).

2.3 Perfil de Fenólicos do Extrato Hidroalcoólico da Polpa do Baru

A análise do perfil fenólico foi realizada para o extrato vegetal hidroalcoólico da polpa do baru item 2.2. O perfil fenólico do extrato foi realizado por cromatografia HPLC utilizando um sistema Shimadzu (Kyoto, Japão), com coluna C18 (250 mm x 4,6 mm, 4 µm). A fase móvel A foi água com ácido fórmico (99,5:0,5% v/v), e a fase B, acetonitrila com ácido fórmico (99,5:0,5% v/v), em gradiente linear. Espectros foram obtidos entre 200-600 nm. Os compostos foram quantificados por HPLC-DAD utilizando onze curvas-padrão, nomeadamente (Ácido Cafeico, Catequina, Ácido Clorogênico, Ácido Cumárico, Galato de Epigallocatequina, Ácido ferúlico, Ácido Gálico, Ácido Hidroxibenzoico, Quercetina, Rutina e Ácido Vanílico. Os resultados foram expressos em µg/g de matéria integral e seca.

2.4 Composição lignocelulósica do endocarpo

O endocarpo foi caracterizado quanto ao teor de extrativos: Tappi T204 -97, lignina: Tappi T222-02; holocelulose (celulose + hemiceluloses): ASTM D1104-56; α -celulose: ASTM D1103-60; hemicelulose: é a diferença entre os valores de holocelulose e de α - celulose. Os valores médios para cada análise de componente foram obtidos a partir de triplicatas.

2.5 Produção do gel lignocelulósico micro/nanofibrilado (LCMNF)

Essa etapa da pesquisa foi realizada conforme metodologias adaptadas a partir Lago et al. (2021) e Mascarenhas et al. (2022). O endocarpo foi, inicialmente, fragmentado em uma prensa mecânica manual (RIBEIRO/15t). Em seguida, foi triturado em moinho de facas tipo Willey (STAR FT 50) e a farinha obtida foi peneirada e recolhida no conjunto de malhas/mesh

28/32 (amostra 1) e 40/60 (amostra 2), para uniformização amostral. Nesse estudo serão codificadas como 2832 e 4060. Foi realizado um tratamento alcalino com solução de NaOH 5% (m/v), contendo 5% (m/m) da farinha de endocarpo. A solução foi agitada (400 rpm) por 4 h em banho-maria (80°C) e depois lavada com água destilada até atingir pH neutro. Foi realizada uma análise de teor de sólidos da farinha tratada para preparo da suspensão aquosa 1% (m/v). Essa suspensão foi submetida a 12 passagens subsequentes no ultra refinador (Super Masscolloider®, modelo MKCA6/2J, Kawaguchi, Japão) obtendo-se ao final do processo géis de micro/nanofibrilas lignocelulósicas abreviados em LCMNF.

2.6 Caracterização dos géis LCMNF

2.6.1 Morfologia e Análise Microestrutural de LCMNF

A caracterização morfológica e microestrutural das micro/nanofibrilas lignocelulósicas (LCMNF) seguiu metodologia descrita por Mascarenhas et al. (2022). Para avaliação macroscópica das dimensões e homogeneidade das partículas, os géis foram diluídos em água deionizada na proporção de 0,1% (m/m) e gotas dessa suspensão foram depositadas em lâminas de vidro, coradas com azul de metileno e cobertas com lamínulas para observação em objetiva de 4x, 10x e 40x. As imagens foram adquiridas com microscópio de luz (Olympus BX41, Tóquio, Japão), tratadas em ImageJ® no formato 8 bits, e as partículas analisadas pelo comando “analyse particles” para obter a área média sob uma perspectiva macroscópica.

A homogeneidade das partículas foi calculada segundo Desmaisons et al. (2017) e expressa em frequência relativa em três classes de área: (1) $< 5 \mu\text{m}^2$, (2) $5\text{--}10 \mu\text{m}^2$, e (3) $> 10 \mu\text{m}^2$. Quanto maior o número de partículas em uma mesma classe, maior a homogeneidade do gel.

Para análise de morfologia e medição das partículas, os géis LCMNF foram diluídos em suspensão (0,1% m/m), agitados por 30 minutos e submetidos a banho ultrassônico por mais 30 minutos. Uma gota da suspensão foi então depositada em microgrades de cobre (400 mesh) e seca à temperatura ambiente. Após a remoção do excesso, aplicou-se uma gota de acetato de uranila a 2% para contraste, e as amostras foram dessecadas. As análises foram realizadas em Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET, modelo JEM-2100, Jeol) a 200 kV. O software ImageJ® foi empregado para medir o diâmetro médio das nanofibrilas a partir de 200 medições obtidas nas micrografias.

2.6.2 Estabilidade, Potencial Zeta e Viscosidade

A estabilidade foi avaliada conforme Mascarenhas et al. (2022). Suspensões de LCMNF a 0,25% (m/m) foram homogeneizadas em agitador magnético a 500 rpm por 1 hora e, em seguida, distribuídas em tubos de ensaio. Imagens foram capturadas a cada 60 minutos durante 8 horas, e o software ImageJ® foi usado para medir a altura total do líquido e a altura da porção de LCMNF suspensa. A estabilidade foi calculada com base na razão entre essas alturas, com cinco repetições.

Para avaliar a estabilidade eletrostática, foi medido o potencial zeta (ζ) das suspensões LCMNF em concentrações de 0,1 mg/mL. Amostras de 0,55 mL foram ajustadas com tampão fosfato (0,020 mol/L) em diferentes valores de pH (3 a 10) e analisadas em um Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments, Reino Unido).

A viscosidade do gel LCMNF foi determinada com um viscosímetro rotacional de tubo concêntrico (Brookfield DVIII Ultra, Brookfield Engineering Laboratories, EUA), com seis repetições. O spindle SC4-25 foi utilizado em uma rampa de taxa de deformação, variando de $3,30 \text{ s}^{-1}$ a $49,50 \text{ s}^{-1}$. A partir dos dados de tensão e taxa de cisalhamento obtidos, ajustou-se o modelo de Lei da Potência para caracterizar o perfil de fluxo do gel, permitindo a determinação dos parâmetros de consistência e comportamento de fluxo do material (Steffe, 1996).

2.7 Desenvolvimento dos Filmes

A metodologia foi adaptada de Lago et al. (2020), com ajustes para a incorporação do extrato hidroalcolico da polpa de baru, conforme descrito no item 2.2. Soluções filmogênicas de 300 g foram preparadas para moldar cinco filmes de 60 g em placas de acrílico. O amido de milho PA (3% m/m, 9g) foi solubilizado em água destilada por 24 h, plastificado com sorbitol (30% m/m em relação ao amido, 2,7 g). A mistura foi aquecida a 80 °C por 20 min. Formando uma matriz termoplástica. O gel de micro/nanofibrilas lignocelulósicas (Gel LCMNF 2832), previamente obtido conforme descrito no item 2.5 foram incorporados a três tratamentos.

Foram 90 g de gel LCMNF (30% m/m da solução filmogênica) incorporados, exceto no tratamento controle (AM) que foi preparado sem LCMNF. Nos tratamentos ACE3 e ACE6, 10 mL e 20 mL de extrato hidroalcolico líquido (item 2.2) foram acrescentados à solução filmogênica, correspondendo a 3% e 6% (m/m base líquida) ou 1% e 2% (m/m base seca), respectivamente. Após homogeneização em mesa agitadora e banho ultrassônico (30 minutos cada), 60 g da solução filmogênica foram vertidos em placas de acrílico e secas em estufa

ventilada a 40 °C por 24 h. Foram desenvolvidas quatro formulações: AM (controle) AC (amido e LCMNF), ACE3 (amido, LCMNF e 1% de extrato seco); ACE6 (amido, LCMNF e 2% de extrato seco). A composição dos filmes está detalhada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição dos filmes biodegradáveis desenvolvidos na pesquisa.

Componentes	AM	AC	ACE3	ACE6
Amido de milho (g)	9	9	9	9
Sorbitol (g)	2,7	2,7	2,7	2,7
Gel de LCMNF 2832 (g)	-	90	90	90
Extrato Hidroalcoólico líquido (mL)	-	-	10	20
Concentração do extrato em base seca (%)	-	-	1	2

Legenda: AM (amido), AC (amido e LCMNF), ACE3 (amido, LCMNF e 3% de extrato), ACE6 (amido, LCMNF e 6% de extrato).

2.8 Caracterização dos Filmes

2.8.1 Morfologia, superfície e rugosidade

A morfologia dos filmes foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Jeol JSM-6610). Amostras criofratadas em nitrogênio líquido foram fixadas em stubs e recobertas com ouro para captura de imagens de superfície (x2,500) e seção transversal (x500). A topografia e rugosidade foram avaliadas por microscopia de força atômica (AFM) (Nanosurf Flex), no modo de força dinâmica, em áreas de 60 × 60 μm. Imagens topográficas e gráficos de rugosidade média foram obtidos por meio do software Gwyddion seguindo a metodologia descrita por Sousa Arantes et al. (2024).

2.8.2 Propriedades ópticas e espessura

As propriedades ópticas foram avaliadas conforme Alves-Silva et al. (2022), Lago et al. (2020), e Silva et al. (2023a). A cor, diferença total de cor (ΔE) e opacidade foram analisadas com colorímetro Konica Minolta CR-400, utilizando parâmetros CIELab e HSL (L^* , a^* , b^* , h° , C^*) com seis leituras por repetição. ΔE foi calculado de acordo com Eq. 1, utilizando os valores padrão ($L^*=97,97$, $a^*=-2,46$, $b^*=9,99$).

$$\Delta E = [(L^*-L_0)^2 + (a^*-a_0)^2 + (b^*-b_0)^2]^{1/2} \quad \text{Equação (1)}$$

A opacidade (%) foi determinada pela razão Lp/Lb ajustada pela espessura do filme (x), medida com micrômetro de precisão 0,001 mm, a partir da Eq. 2.

$$Opacidade (\%) = \left(\frac{L * p}{x} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação (2)}$$

A transparência (T) foi analisada por espectrofotômetro UV-vis em 600 nm, usando a Eq. 3. T_{600} é a transmitância medida em 600 nm, e o x espessura do filme.

$$Transparência (T) = \left(\frac{-\log \% T_{600}}{x} \right) \quad \text{Equação (3)}$$

2.8.3 Avaliação da Atividade Antioxidante e Compostos Fenólicos Totais (TPC) dos Filmes

A atividade antioxidante dos filmes foi determinada pelos métodos de 2,2-Difenil-1-Picril-Hidrazil (DPPH), Complexo Fosfomolibdênio e Ferric Reduction Antioxidant Power (FRAP), além da quantificação de compostos fenólicos totais (TPC), conforme metodologia adaptada de Alves-Silva et al. (2022). Amostras de filme (125 mg) foram imersas em 15 mL de água destilada e mantida por 24 h a 25 °C. Em seguida, a solução foi agitada em mesa agitada por 30 minutos, centrifugada a 10,142 g por 10 minutos e filtrada em papel filtro, resultando nos extratos aquosos dos filmes. Todas as análises foram realizadas em triplicata, utilizando um leitor de microplacas de 96 poços (Biochrom EZ Read 2000).

A atividade antioxidante pelos métodos DPPH (Kolap et al., 2022; Oliveira Filho et al., 2023; Silva et al., 2023a), complexo fosfomolibdênio (Prieto et al., 1999) e FRAP (Rufino et al., 2006) foi expressa como % de eliminação de radicais (% RSA), mg de ácido ascórbico equivalente (AAE) 100 g^{-1} e μM de sulfato ferroso (FeSO_4) g^{-1} , respectivamente.

O teor de fenólicos totais foi determinado a partir da metodologia Fast Blue (Medina, 2011), adaptada para determinação em filmes. Os resultados foram expressos em miligramas de equivalente de ácido gálico (GAE) por gramas de filme (mg GAE/g filme).

2.8.4 Propriedades Mecânicas, Barreira ao Vapor de Água e Ângulo de contato

As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaio de tração (ASTM D882-18) em texturômetro TA-XT2 com célula de 500 N, em amostras de 50 × 25 mm, com distância inicial de 25 mm e velocidade de 0,8 mm/s, obtendo-se resistência à tração final UTS (MPa) e alongamento à ruptura EB (%).

A permeabilidade ao vapor d'água (PVA) foi determinada pelo método gravimétrico (ASTM E96M-16) em frascos com sílica em dessecador a 25 °C e 75% UR. O ganho de massa foi monitorado por 7 dias para calcular a taxa de permeabilidade ao vapor d'água (TPVA) (g/m²) e PVA (g mm/dia m² kPa), utilizando as Equações (4) e (5) com ajustes para espessura e pressão de saturação. No TPVA, m/t é a inclinação da reta (g/d) e A é a área de permeação (m²). E no PVA, x é a espessura do filme (mm), S é a pressão de saturação da água salina a 25 °C (3,16 kPa), RH1 é a umidade relativa dentro do dessecador (75%) e RH2 é a umidade relativa dentro da cápsula (0%).

$$TPVA (g/m^2) = \left(\frac{m}{t \cdot A} \right) \quad \text{Equação (4)}$$

$$PVA (g \text{ mm/dia m}^2 \text{ kPa}) = \left(\frac{TPVA \cdot x}{S \cdot (RH1 - RH2)} \right) \quad \text{Equação (5)}$$

O ângulo de contato (CA) dos filmes foi medido com goniômetro Krüss DSA25, depositando uma gota de água sobre amostras (25 mm × 10 mm) fixadas em lâminas de vidro. Seis medições foram realizadas por amostra, 1 segundo após o contato, conforme ASTM D7334 – 08 (2022). A molhabilidade (W) foi calculada pela média dos CA entre 5 e 55 s, usando a Eq. 6, onde A é o CA médio aos 5 s e a aos 60 s.

$$W (^\circ / s) = \left(\frac{A - a}{55} \right) \times 100 \quad \text{Equação (6)}$$

2.8.5 Análise de Estabilidade Térmica dos Filmes

Para avaliar a degradação térmica dos filmes foi realizada análise termogravimétrica (TGA) em um TGA Q500 (TA Instruments) com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Amostras de filme (7-10 mg) foram aquecidas de 25 a 600 °C em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de

50 mL/min. A temperatura inicial de degradação (T_{inicial}) foi determinada pela interseção das tangentes na curva de massa constante e na região linear após o ponto de deflexão. A perda de massa total foi identificada no ponto final da curva, e a temperatura máxima de degradação (T_{max}) foi determinada pelos picos na derivada (DTGA), conforme protocolo descrito por Paiva et al. (2024).

2.8.6 Caracterização Estrutural por Espectroscopia Raman

Espectros Raman dos filmes foram coletados com espectrômetro Horiba LabRAM HR Evolution, usando laser de 785 nm e potência de 92 mW. Amostras de filmes (20 x 30 mm) fixadas em placas de vidro foram analisadas em três pontos, com 20 acumulações e 10 s de integração, na faixa de 700-1100 cm^{-1} .

2.8.7 Biodegradabilidade em Solo

O ensaio de biodegradabilidade dos filmes em solo foi realizado conforme metodologia adaptada a partir de Alves-Silva et al. (2022). O ensaio foi realizado em temperatura ambiente, com solo tratado, devidamente manejado para fins de plantio, com terra úmida e adubada, sob temperatura ambiente. Os filmes foram cortados em retângulos (20 x 30 mm) do qual foram encaixados em suportes de tela e enterrados. As avaliações qualitativas e visuais foram registradas até a completa degradação dos filmes por meio da captura de imagens.

2.9 Análise Estatística

Os ensaios experimentais foram conduzidos em triplicata, e os dados obtidos foram analisados estatisticamente para garantir a robustez dos resultados. As médias dos dados experimentais foram calculadas e expressas como média \pm desvio padrão, utilizando planilhas do Microsoft Excel. Para avaliação das médias dos tratamentos dos filmes, considerando os quatro tratamentos testados, as análises estatísticas foram realizadas no software Sisvar. O teste de Tukey foi utilizado para comparação das médias, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Perfil Fenólico do Extrato Hidroalcoólico da Polpa do Baru

Quatro compostos fenólicos foram identificados no extrato hidroalcoólico da polpa do baru (Tabela 2). A quercetina foi o composto majoritário, com uma concentração média de 59,81 $\mu\text{g/g}$ de matéria integral, aproximadamente 10 vezes maior que o ácido ferúlico, o segundo composto mais abundante. Os ácidos gálicos e *p*-cumárico foram encontrados em menores concentrações, ambos inferiores a 1 $\mu\text{g/g}$ de matéria integral.

Tabela 2. Perfil fenólico do extrato hidroalcoólico da polpa do baru.

Composto Fenólico	$\mu\text{g/g}$ matéria integral	$\mu\text{g/g}$ matéria seca
Ácido gálico	0,68 \pm 0,09	0,83 \pm 0,10
Ácido <i>p</i> -cumárico	0,24 \pm 0,03	0,29 \pm 0,04
Ácido ferúlico	5,55 \pm 0,06	6,76 \pm 0,07
Quercetina	59,81 \pm 1,39	72,85 \pm 1,70

Os dados representam a média \pm desvio padrão. As análises foram realizadas em triplicata.

A maçã, reconhecida como uma fonte significativa de quercetina, apresenta concentrações médias de 3,7 mg/100g, chegando a até 7,5 mg/100g na variedade Fuji (Hoffmann-Ribani et al., 2009). Em comparação, o extrato da polpa de baru, com uma concentração de aproximadamente 5,98 mg/100g de quercetina, surge como uma fonte promissora desse composto fenólico. Esse valor indica o potencial do extrato de baru como um ingrediente funcional para a incorporação em filmes biodegradáveis, agregando propriedades bioativas.

A presença de quercetina no extrato de baru é especialmente relevante devido às suas propriedades antioxidantes e fotoprotetoras, que contribuem para a proteção contra radiação UV (Alizadeh Sani et al., 2024). Essas características são altamente desejáveis em filmes biodegradáveis destinados a embalagens alimentícias, onde o bloqueio de radiação UV pode auxiliar na preservação da qualidade do alimento embalado. Portanto, o uso do extrato de baru em matrizes poliméricas pode não apenas enriquecer o filme com compostos bioativos, mas também melhorar sua funcionalidade como barreira protetora, reforçando o valor do baru como um ingrediente funcional para aplicações sustentáveis em embalagens.

Da mesma forma, o ácido ferúlico, amplamente utilizado nas indústrias de alimentos e cosméticos por suas propriedades antioxidantes (da Costa et al., 2023), apresenta-se como

aliado a resistência estrutural em matrizes poliméricas, principalmente matriz de amido, contribuindo para o desenvolvimento de filmes com maior estabilidade e proteção contra processos oxidativos (Karunaratne & Zhu, 2016)

3.2 Composição lignocelulósica do endocarpo

O endocarpo do baru seco é composto majoritariamente pela fração lignocelulósica (75,77%), com uma relação lignina: celulose muito próxima a 1 (Fig. 2). Foram identificadas ainda as hemiceluloses e extrativos, cujas concentrações, embora menores, desempenham papéis importantes na determinação das propriedades dos materiais lignocelulósicos.

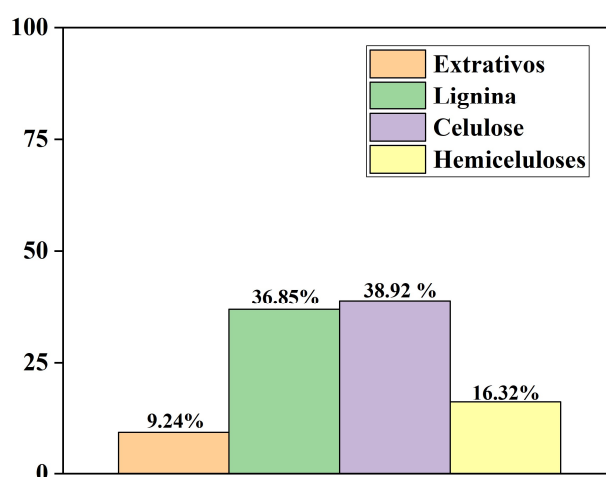


Figura 2. Composição do endocarpo do baru triturado e seco.

Comparativamente, o eucalipto, que é a principal fonte vegetal padrão de celulose utilizada para obtenção de nanocelulose., apresenta teor de celulose (38,2%) semelhante ao do endocarpo do baru, mas concentra menos lignina (20,2%) e mais hemiceluloses (27,1%) (Velvizhi et al., 2022). Essa composição evidencia o endocarpo do baru como uma fonte alternativa promissora de celulose, sobretudo devido a sua elevada proporção de frações lignocelulósicas.

A composição química do endocarpo do baru não apenas reflete sua viabilidade como matéria -prima, mas também influencia diretamente as propriedades das nanofibrilas de celulose obtidas (Ghaemi et al., 2019; Velvizhi et al., 2022). No entanto, altos teores de hemicelulose podem interferir no processo de fibrilação e nas propriedades finais das nanofibrilas, exigindo processos específicos de modificação ou remoção para aplicações que demandem alta pureza, como indicado por Xu et al. (2023a)

A lignina, presente em altas concentrações no endocarpo do baru, representa um material promissor para inúmeras aplicações, devido à sua estrutura rica em anéis aromáticos e unidades fenilpropano, que a tornam adequada para aplicações como polímeros termoendurecíveis, embalagens sustentáveis com propriedades antioxidantes e de barreira (Boarino & Klok, 2023; Diwan et al., 2020; Song et al., 2025, Sethupathy et al., 2022).

Elevados teores de lignina podem dificultar a fibrilação da celulose, exigindo maior consumo energético no processo de desfibrilação (Scatolino et al., 2022). Esses desafios destacam a necessidade de soluções tecnológicas que aproveitem seu potencial, ao mesmo tempo em que promovam o desenvolvimento sustentável e a substituição de recursos fósseis (Ortiz et al., 2020; Song et al., 2025).

Dessa forma, o aproveitamento do endocarpo do baru como fonte lignocelulósica exige estratégias integradas que explorem a celulose para a produção de nanofibrilas e valorizem as frações de hemicelulose e lignina em aplicações específicas. A compreensão de sua composição química viabiliza novas possibilidades, consolidando-o como uma alternativa estratégica para o desenvolvimento de aplicações renováveis e produtos de alto valor agregado, promovendo o uso sustentável dessa valiosa matéria-prima.

3.2 Caracterização dos géis LCMNF

3.2.1 Morfologia e Análise Microestrutural de LCMNF

As imagens de microscopia de luz a das suspensões diluídas (0,1% p/p) destacaram diferenças significativas na dispersão de partículas entre os géis LCMNF 2832 e 4060. O gel 2832 apresentou uma distribuição uniforme e menos aglomerada de partículas (Fig. 3A-C), enquanto o gel 4060 exibiu maior presença de aglomerados maiores (Fig. 3D-F).

A dispersão encontrada no gel 2832 sugere uma desfibrilação mais eficiente, inclusive com um gel mais espesso, sem grandes fragmentos fibrosos. Por outro lado, o gel 4060 apresentou fragmentos resistentes ao processo de desfibrilação (Fig. 3 D), comprometendo parcialmente a dispersão e estabilidade, conforme observado em estudos com microfibrilas de açai Scatolino et al. (2022).

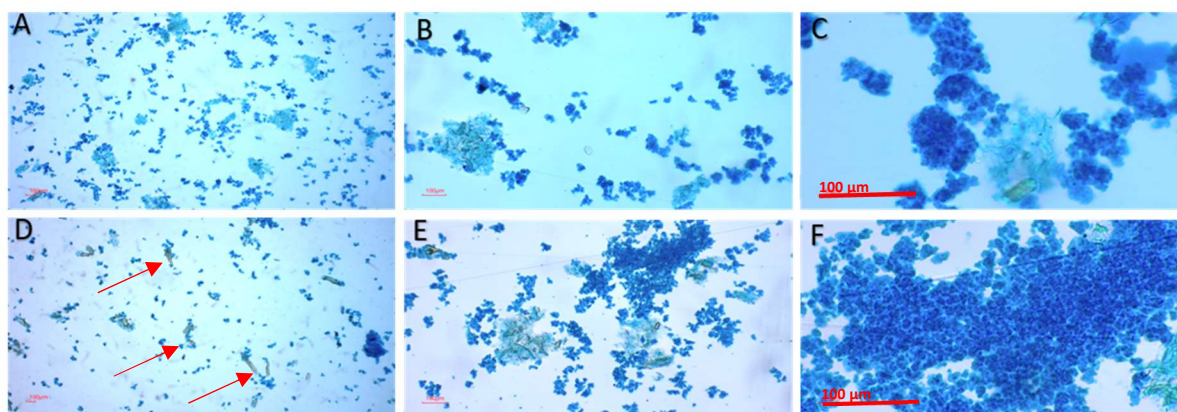


Figura 3. Imagens de microscopia de luz, suspensões 0,1% (p/p). Gel 2832, ampliações 4x (A), 10x (B) e 40x (C). Gel 4060, ampliações 4x (D), 10x (E) e 40x (F).

A análise de frequência relativa das áreas dos aglomerados confirmou a maior homogeneidade do gel 283, com $83 \pm 4,8\%$ das partículas na classe $<5 \mu\text{m}^2$, enquanto o gel 4060 apresentou $78 \pm 11,2\%$ nessa mesma classe, mas com uma proporção maior de aglomerados $>10 \mu\text{m}^2$ (Fig. 4).

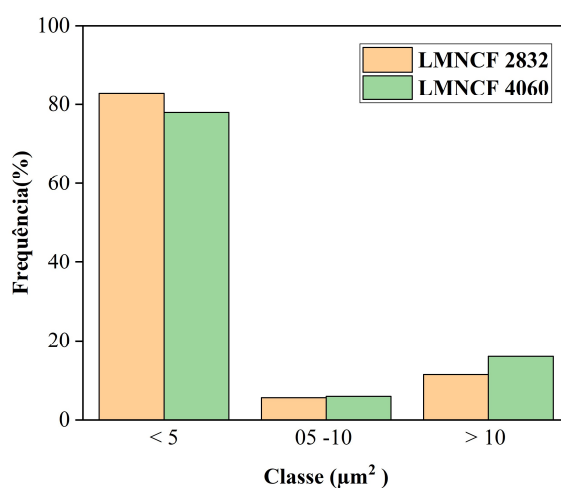


Figura 4. Frequência relativa da distribuição de área dos aglomerados em géis LCMNF, com base no tamanho dos aglomerados macroscópicos.

Esses resultados reforçam que o pré-tratamento com mesh 28/32 promoveu uma distribuição mais uniforme das partículas superando os índices de homogeneidade relatados por Paiva et al. (2022) em géis de nanocelulose obtidos de fontes não convencionais, *H flexuosa* (54%). Estudos indicam que uma distribuição homogênea de partículas contribui para a

integridade estrutural e funcionalidade dos géis, especialmente em aplicações que demandam uniformidade para otimizar propriedades do material (Desmaisons et al., 2017).

As análises morfológica e dimensional realizada por microscopia eletrônica de transmissão (MET) corroboraram com as observações macroscópicas, revelando diferenças marcantes nas características estruturais entre os géis (Fig. 5A-D). O gel 2832 apresentou uma faixa de diâmetros mais ampla (4,14–157,15 nm), com diâmetro médio de $27,08 \pm 18,60$ nm, enquanto o gel 4060 exibiu uma distribuição mais estreita (3,20–25,40 nm) e diâmetro médio menor ($9,89 \pm 4,37$ nm).

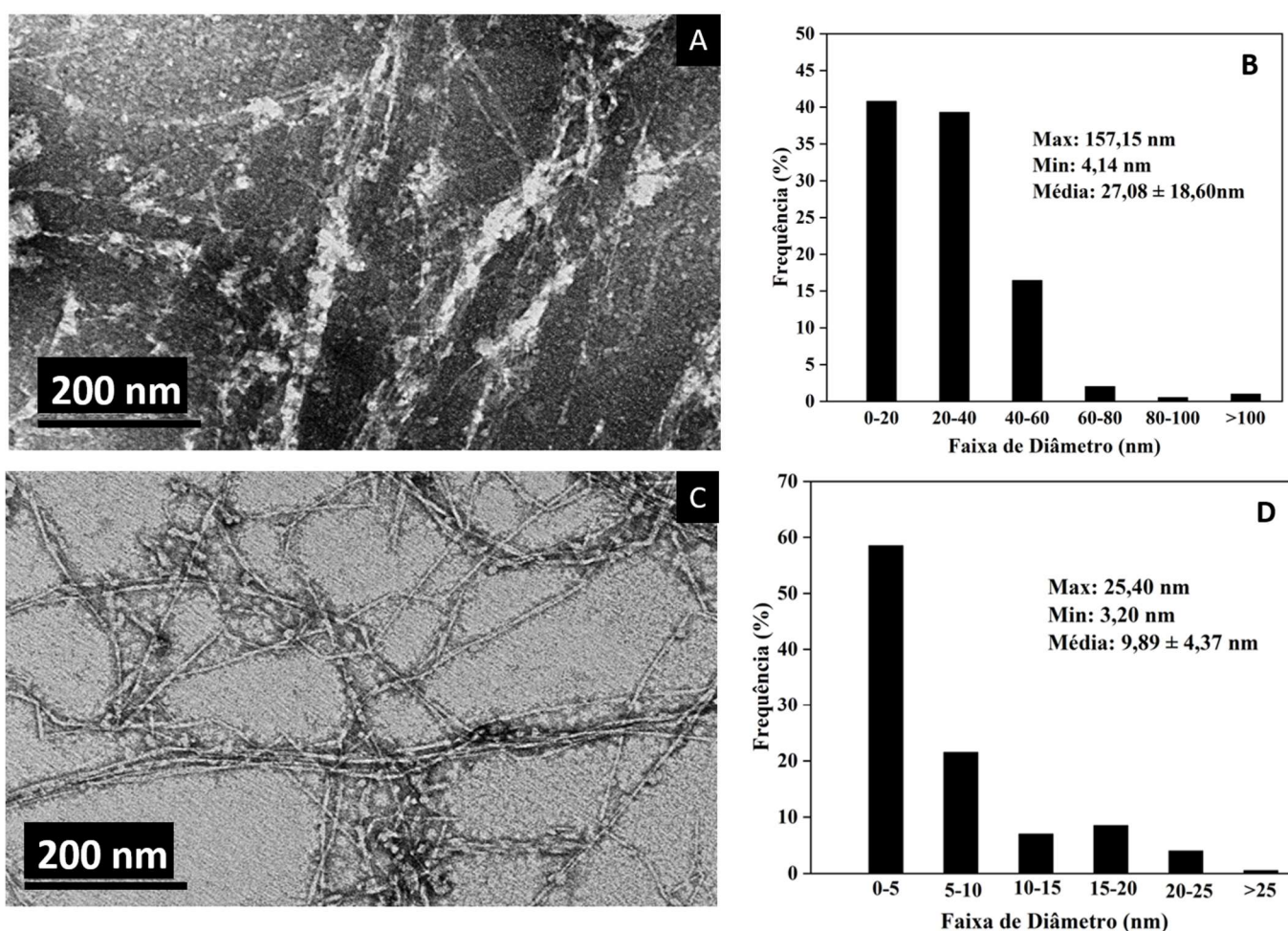


Figura 5. Micrografias MET e histograma de frequência relativa na distribuição de diâmetros das micro/ nanofibrilas presentes nos géis de micro/nanofibrilas lignocelulósicas (LCMNF). Gel LCMNF 2832 (A e B). Gel LCMNF 4060 (C e D).

As diferenças observadas nas nanoestruturas dos géis sugerem que o refinamento no mesh 40/60 favoreceu a produção de nanofibrilas mais uniformes e de menor diâmetro, características desejáveis para sistemas de reforço nanométrico (Paiva et al., 2024 e Scatolino

et al., 2022). Mas é necessário avaliar outros parâmetros como estabilidade e viscosidade do gel para maior compreensão das características intrínsecas de cada um.

As fibrilas com diâmetros superiores a 100 nm, observadas no gel 2832, são classificadas como microfibrilas (MFC), enquanto aquelas com diâmetros menores pertencem à escala nanométrica (CNF), conforme descrito por *International Organization for Standardization* (ISO, 2017) e Kargarzadeh et al. (2018). A combinação de MFC e CNF presente nos géis reforça sua caracterização como micro/nanofibrilas lignocelulósicas (MFC/CNF), conforme descrito por Mascarenhas et al. (2024). A presença de resíduos de lignina nos géis contribui para sua definição como sistemas lignocelulósicos, denominando-os como micro/nanofibrilas lignocelulósicas.

3.2.2 Estabilidade e Potencial Zeta

A estabilidade dos géis LCMNF 2832 e 4060 foi avaliada por meio de testes de sedimentação (Figura 6). Ambos os géis apresentaram uma rápida sedimentação nas primeiras duas horas, com o gel 2832 reduzindo sua estabilidade de 73,19% para 56,33%, enquanto o gel 4060 sedimentou de 58,71% para 42,43% no mesmo período.

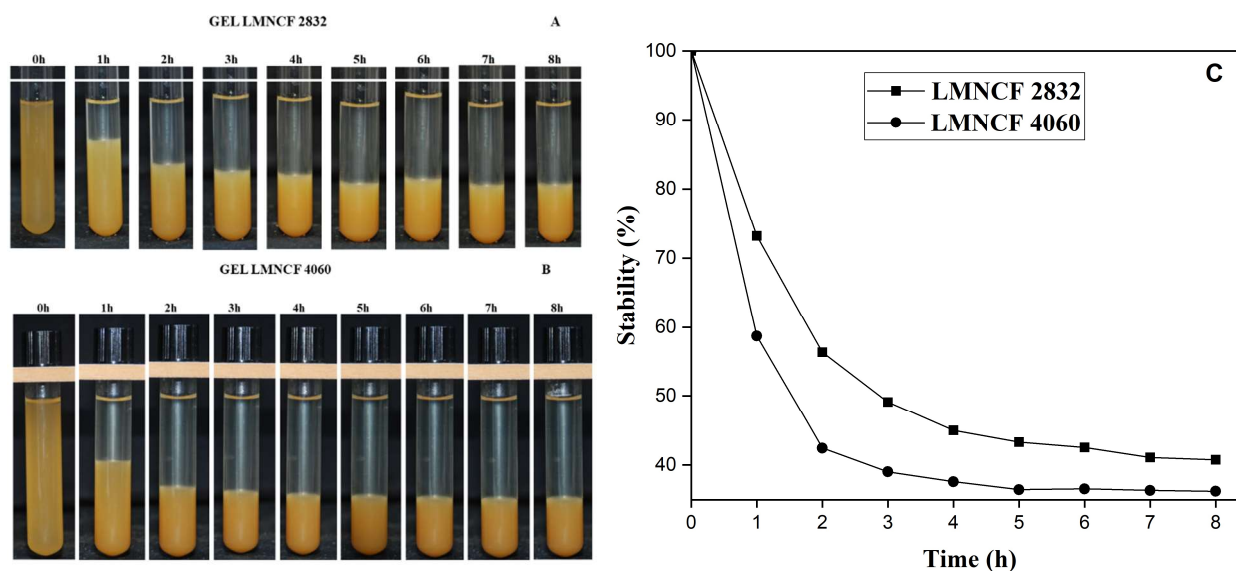


Figura 6. Estabilidade das dispersões dos géis LCMNF (0,25% p/p). Registro fotográfico da sedimentação ao longo do tempo para o gel LCMNF 2832 (A) e gel LCMNF 4060 (B). Gráfico da estabilidade percentual das dispersões ao longo de 8 horas (C).

Após 8 horas de teste as suspensões estabilizaram em aproximadamente 50,13% e 42,28% de partículas suspensas. As partículas sedimentadas sugerem baixa estabilidade coloidal dos géis atribuída à presença de aglomerados e/ou fibrilas de maior dimensão que não foram desfibriladas completamente, o que facilita a sedimentação sob ação da gravidade.

Esse resultado pode estar relacionado a composição lignocelulósica e aos processos de pré-tratamento químico, adotados nesse estudo limitando-se ao NaOH. Os géis do endocarpo do baru apresentam resíduos de lignina, componentes de alta massa molecular que promovem aglomeração, acelerando a sedimentação (Silva et al., 2023b).

Na análise estrutural e morfológica, verificou-se que o gel 2832 apresentou partículas predominantemente menores que 100 nm (Fig 5B), com uma proporção de aglomeração inferior a 5 μm^2 (Fig.4). Em contraste, o gel 4060, apesar de apresentar partículas menores que 25 nm (Fig.5D) exibiu maior aglomeração de partículas acima de 10 μm^2 (Fig. 4). Essa discrepância impactou diretamente a estabilidade das suspensões, conforme demonstrado na Figura 6, onde o gel 2832 apresentou maior estabilidade.

Outra questão a ser discutida seria o efeito combinado de menor aglomeração (Fig. 3 A-C) e maior homogeneidade (Fig.4) no gel 2832, promovida pelo movimento browniano. Esse fenômeno, caracterizado pelo movimento aleatório de partículas em meio aquoso, governa a dispersão das micro e nanofibrilas e é essencial para a manutenção da suspensão. Quando partículas são suficientemente pequenas, as colisões com as moléculas do meio geram forças de repulsão eletrostática que contrabalançam a gravidade, evitando a sedimentação (Fukuzumi et al., 2014; Silva et al., 2021).

No caso do gel 4060, embora as partículas individuais fossem menores, a maior aglomeração ($>10 \mu\text{m}^2$) (Fig. 4) comprometeu o efeito do movimento browniano, pois aglomerados maiores têm menor frequência de colisões com as moléculas do meio. Isso resulta em menor eficácia das forças de repulsão eletrostática, permitindo que a gravidade predomine, acelerando o processo de sedimentação (Mascarenhas et al., 2024). Por outro lado, a distribuição mais uniforme e as menores áreas de aglomeração no gel 2832 favoreceram a dispersão estável e reduziram a sedimentação.

Portanto, a análise revela que a estabilidade das suspensões está mais associada à homogeneidade na distribuição das partículas e à minimização de aglomerações do que ao tamanho individual das fibrilas. Esses resultados reforçam que, para obter géis estáveis, é essencial controlar não apenas o tamanho das fibrilas, mas também sua propensão à aglomeração e estrutura funcional.

A estabilidade eletrostática foi investigada por meio do potencial Zeta em diferentes valores de pH (Figura 7). Ambos os géis apresentaram maior estabilidade em meio alcalino, especialmente entre pH 8 e 9, com potenciais Zeta de -18 mV e -15 mV para os géis 2832 e 4060, respectivamente. Em condições naturais, os potenciais Zeta registrados foram mais negativos, -26 mV para o gel 2832 e -19 mV para o gel 4060, estabelecendo uma estabilidade moderada que, conforme Bhattacharjee (2016), é suficiente para evitar agregação desordenada de partículas. Estudos indicam que valores de potencial zeta entre -20 e -30 mV são desejáveis para evitar agregações indesejadas, enquanto valores abaixo de -10 mV apontam para possível instabilidade (Tibolla et al., 2020).

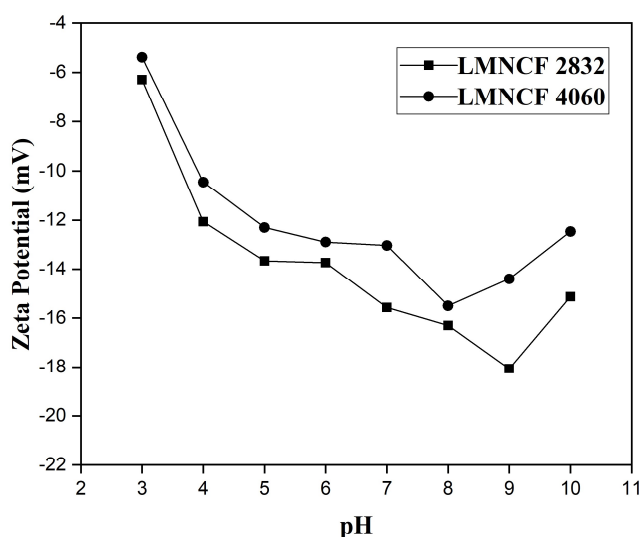


Figura 7. Potencial Zeta dos géis LCMNF em diferentes pH.

Para aplicações práticas, o controle do potencial Zeta, especialmente por meio do ajuste de pH, é fundamental para melhorar a estabilidade coloidal dos géis LCMNF. Em sistemas alimentares e biomateriais, potenciais Zeta abaixo de -30 mV são comuns e promovem estabilidade devido às cargas negativas presentes nas superfícies das partículas (Damodaran & Parkin, 2017; Bhattacharjee, 2016). Desta forma, o ajuste do pH e a modulação de íons na solução são essenciais para melhorar a estabilidade dos géis LCMNF. A modulação das propriedades eletrostáticas oferece uma estratégia promissora para o desenvolvimento de materiais coloidais avançados, permitindo ajustes específicos para melhorar a funcionalidade em diferentes aplicações.

3.2.3 Viscosidade

A avaliação de viscosidade dos géis LCMNF, conforme ilustrado na Figura 8, revela um comportamento não newtoniano típico desses materiais, com redução acentuada na viscosidade aparente à medida que a taxa de cisalhamento aumenta, caracterizando um comportamento pseudoplástico (Van Vliet & Walstra, 2017; Xu et al., 2023b).

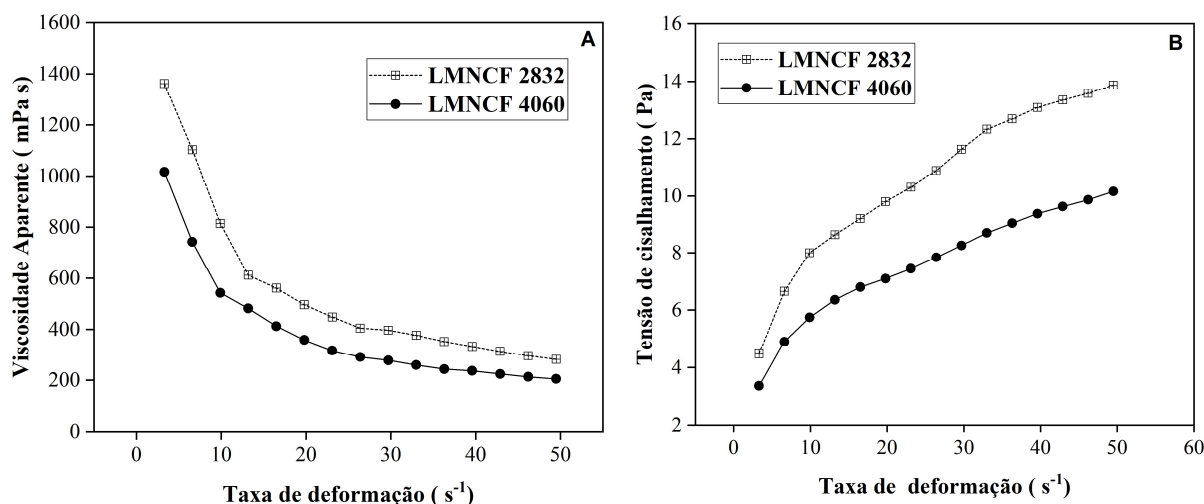


Figura 8. Curvas de escoamento dos géis LCMNF. (A) Relação entre viscosidade aparente e taxa de cisalhamento; (B) Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento.

Inicialmente, os géis 2832 e 4060 apresentam viscosidades aparentes de aproximadamente 1400 mPa·s e 1000 mPa·s, respectivamente, que diminuiriam à medida que a taxa de cisalhamento aumentou. Esse comportamento indica um alinhamento polimérico das nanofibrilas na direção do fluxo, o que facilita o escoamento com uma menor viscosidade (Oliveira Filho et al., 2022).

A modelagem dos dados pela Lei da Potência (Tabela 3) confirma a pseudoplasticidade dos géis LCMNF, evidenciada por índices de fluxo (n) menores que 1 e elevados coeficientes de determinação ($R^2 > 0,989$), indicando excelente adequação ao modelo reológico. O gel 2832 apresentou um índice de consistência (k) significativamente maior do que o gel 4060, sugerindo uma rede de nanofibrilas mais longas e com maior razão de aspecto, o que está em concordância com as características morfológicas previamente observadas (Fig.5).

Tabela 3. Variáveis reológicas do modelo de Lei da potência para géis LCMNF

Tratamentos	k	n	R^2	RMSE
gel 2832	3.286 ± 0.631^a	0.372 ± 0.039^a	0.989	0.299
gel 4060	2.344 ± 0.609^b	0.377 ± 0.036^a	0.994	0.163

R^2 = coeficiente de correlação, RMSE = raiz quadrada do erro médio, n = índice de fluxo (adimensional), k = índice de consistência (Pa s^n). Médias \pm desvio padrão seguidas de mesmas letras minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Baş et al. (2024) observaram que nanofibrilas mais curtas reduzem a estabilidade de suspensões, favorecendo a floculação e impactando negativamente as propriedades reológicas. Para os géis LCMNF, o elevado índice de consistência e a robustez estrutural do gel 2832 indicam uma matriz mais coesa e menos propensa à floculação, tornando-o ideal para aplicações que exigem estabilidade e integridade estrutural, como filmes biodegradáveis e revestimentos comestíveis.

Além disso, Li et al. (2021) destacam que a eficiência dos géis em matrizes poliméricas depende de fatores como a química de superfície e a morfologia das nanofibrilas, aspectos previamente discutidos na Seção 3.2.1. A capacidade do gel 2832 de manter uma estrutura viscoelástica estável reforça sua adequação para processos industriais em que o controle da viscosidade é fundamental para a dispersão uniforme do material (Stribiçaia et al., 2022).

Esses resultados evidenciam a superioridade do gel 2832, destacando-o como uma escolha promissora para o desenvolvimento de materiais avançados em aplicações industriais.

3.3 Caracterização dos filmes

3.3.1 Morfologia, superfície e rugosidade

O aspecto visual dos filmes de amido com gel LCMNF e diferentes concentrações de extrato hidroalcoólico da polpa de baru é apresentado na Fig 9.. Todos os tratamentos exibiram aparência visual de superfície sem bolhas ou rachaduras, indicando a miscibilidade dos componentes na matriz polimérica durante a produção dos filmes.

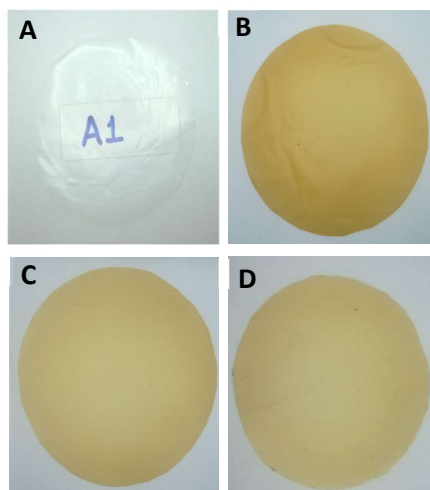


Figura 9. Aspecto visual dos filmes: AM – Amido (A); AC - Amido e LCMNF (B); ACE3 - Amido, LCMNF e 3% de extrato (C); ACE6 - Amido, LCMNF e 6% de extrato (D).

Para uma caracterização detalhada da morfologia e superfície dos filmes, foram realizadas análises de MEV e AFM, cujos resultados estão exibidos nas Fig. 10 e 11, respectivamente. O filme controle, composto apenas por amido (AM), apresentou superfície lisa e estrutura interna densa e coesa (Fig. 10A), corroborada pela rugosidade ($R_a = 2,615 \mu\text{m}$) medida por AFM (Fig. 11A). Essa compactação estrutural pode ser explicada pela boa compatibilidade entre o amido e o plastificante sorbitol (Oliveira et al., 2023).

A incorporação de LCMNF no filme (AC) gerou leve porosidade interna, visível na micrografia transversal (Fig. 10B), sem alterar significativamente a rugosidade superficial em relação ao controle, com R_a de $2,795 \mu\text{m}$ (Fig. 11B). Esses dados sugerem que a adição de LCMNF não impacta expressivamente a estrutura superficial do filme AC.

Por outro lado, a adição do extrato hidroalcoólico de baru nos filmes ACE3 e ACE6 resultou em alterações mais marcantes na morfologia e rugosidade. As micrografias (Fig. 10 C e D) mostram uma superfície mais áspera, com pontos brancos que indicam aglomerados de extrato. Tais ajustes refletem nos valores de rugosidade média, que aumentaram para $3,002 \mu\text{m}$ no ACE3 e $3,807 \mu\text{m}$ no ACE6 (Fig. 11 C e D). Esse aumento na rugosidade pode estar relacionado à distribuição heterogênea do extrato na matriz, influenciando as propriedades mecânicas dos filmes (Colivet et al., 2022).

De modo geral, os resultados indicam que a adição de LCMNF não altera significativamente a rugosidade dos filmes, enquanto a incorporação de 6% de extrato de baru aumenta consideravelmente a rugosidade superficial. Isso pode afetar a resistência mecânica dos filmes, mas, ao mesmo tempo, pode proporcionar benefícios funcionais, como propriedades antioxidantes e antimicrobianas, úteis em aplicações como revestimentos funcionais.

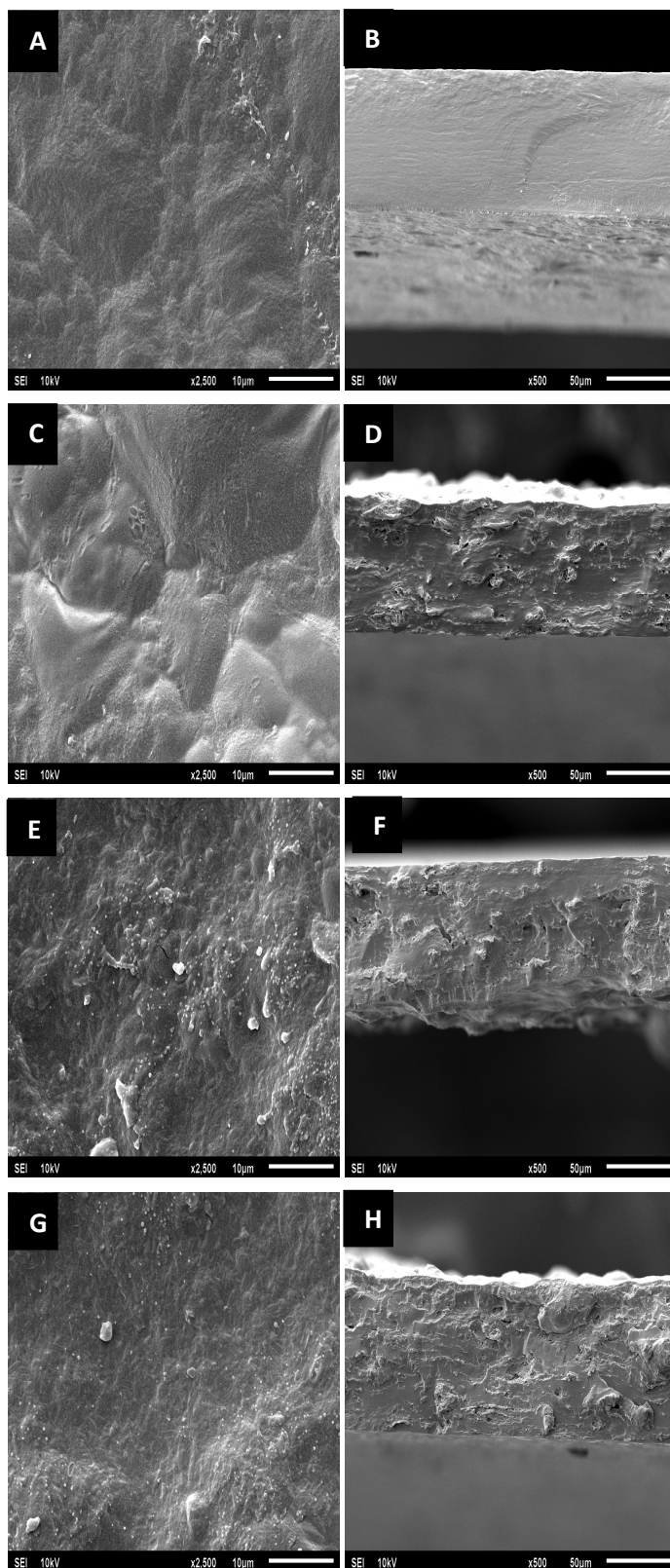


Figura 10. Micrografias MEV das superfícies e seções transversais dos filmes. Filmes AM – Amido (A,B); AC - Amido e LCMNF (C, D); ACE3 -Amido, LCMNF e 3% de extrato (E, F); ACE6 - Amido, LCMNF e 6% de extrato (G-H).

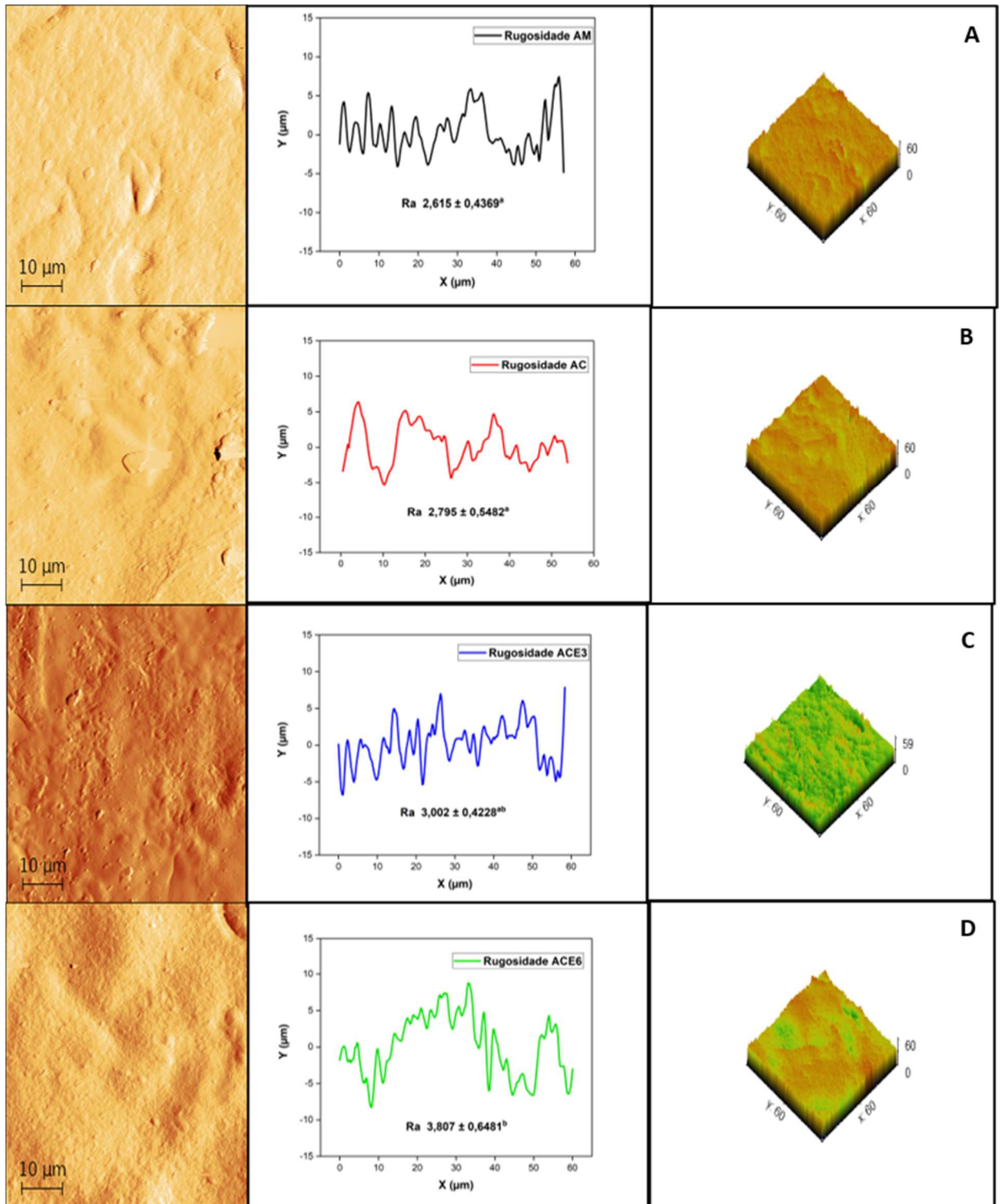


Figura 11. Análise de Microscopia de Força Atômica (AFM): imagem superficial, gráfico de rugosidade média (Ra) e imagem topográfica dos filmes. Filmes: AM – Amido (A); AC - Amido e LCMNF (B); ACE3 -Amido, LCMNF e 3% de extrato (C); ACE6 - Amido, LCMNF e 6% de extrato (D). Médias \pm desvio padrão seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.3.2 Propriedades ópticas e espessura

Na Tabela 4 são apresentados os dados relativos à espessura, transparência, opacidade e coloração dos filmes ativos de amido e LCMNF com a adição de extrato hidroalcoólico de baru. Entre as propriedades avaliadas, a espessura dos filmes não foi significativamente afetada pela incorporação de LCMNF ou do extrato vegetal, mantendo valores próximos entre os diferentes tratamentos. Esse comportamento é semelhante ao observado por Lago et al. (2020) em filmes à base de fécula de mandioca suplementados com nanofibrilas de palha de aveia, onde a relação massa/volume das formulações foi indicada como responsável pela ausência de variação significativa na espessura.

Tabela 4. Valores médios e desvios-padrão para espessura, transparência, opacidade e coloração dos filmes ativos de amido, LCMNF e extrato de baru.

Filmes	Espessura (μm)	Transparência (%)	Opacidade (%)	ΔE	C*	h*
AM	76 \pm 0,008 ^{a*}	26,21 \pm 0,04 ^d	0,530 \pm 0,006 ^b	0,00 ^a	10,24 \pm 0,06 ^a	103,85 \pm 0,06 ^c
AC	88 \pm 0,005 ^a	17,89 \pm 0,24 ^b	0,574 \pm 0,025 ^c	23,90 \pm 3,51 ^c	52,11 \pm 2,28 ^c	83,88 \pm 1,66 ^a
ACE3	94 \pm 0,009 ^a	15,80 \pm 0,37 ^a	0,514 \pm 0,009 ^b	19,08 \pm 1,25 ^b	45,42 \pm 1,65 ^b	86,66 \pm 0,57 ^b
ACE6	96 \pm 0,006 ^a	15,60 \pm 0,07 ^a	0,486 \pm 0,015 ^a	16,39 \pm 2,85 ^b	44,34 \pm 0,90 ^b	88,16 \pm 1,54 ^b

* Médias seguidas da mesma letra, por coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Legenda: AM (amido), AC (amido e LCMNF), ACE3 (amido, LCMNF e 3% de extrato), ACE6 (amido, LCMNF e 6% de extrato).

A transparência dos filmes foi reduzida pela adição de LCMNF e pelo extrato vegetal, com os tratamentos ACE3 e ACE6 apresentando valores de transparência entre 15-17%, significativamente inferiores ao filme controle de amido (AM), que apresentou transparência de 26,21% (Tabela 4). Esses resultados são inferiores aos reportados por Paiva et al. (2024), que encontrou transparência entre 24-26% em filmes à base de nanofibrilas de cipó titica. A opacidade dos filmes, que está inversamente relacionada à transparência, aumentou com a adição de LCMNF, mas foi reduzida pela incorporação do extrato vegetal, especialmente no tratamento ACE6, que apresentou menor opacidade em comparação ao filme controle.

Esses resultados podem estar relacionados à formação de aglomerados ou floculações, visíveis nas micrografias MEV (Fig. 11), que causam irregularidades na superfície dos filmes, impactando a passagem de luz, como sugerido por Paiva et al. (2024). A menor opacidade do filme ACE6, comparada ao filme controle, sugere uma formação de interações mais eficientes entre o amido e o LCMNF, resultando em uma estrutura menos refratária à luz. Portanto, infere-

se que os resultados observados no filme ACE6 em relação à opacidade e transparência estão relacionados às características da estrutura do material e às interações presentes entre seus componentes.

A coloração dos filmes também foi significativamente alterada com a adição de LCMNF e do extrato de baru, conforme indicado pelos valores de ΔE , que possibilita avaliar uma variação visual da cor (Oliveira Filho et al., 2023). O tratamento AC apresentou o maior valor de ΔE (23,90), proporcionando uma diferença notável de cor em relação ao filme controle. A inclusão do extrato vegetal atenuou a mudança de cor nos tratamentos ACE3 e ACE6, que apresentaram valores de ΔE menores (Tabela 4).

Em relação a tonalidade (h^*) os filmes alteraram do tom amarelo-esverdeado (103,85) para amarelo-avermelhado (83,88). O filme com nanocelulose que não recebeu extrato, apresentou maior alteração de cor, com o aumento de cromaticidade (52,11). Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores que demonstraram que a adição de nanofibrilas altera significativamente a coloração de filmes biodegradáveis, especialmente em materiais à base de fibras lignocelulósicas não convencionais (Paiva et al., 2024; Scatolino et al., 2022). A mudança na cor e nas propriedades ópticas dos filmes, observada nos tratamentos com extrato de baru, tem implicações diretas no desenvolvimento de embalagens funcionais, onde o controle de opacidade e coloração é essencial para proteger o conteúdo contra fatores como luz UV e oxidação, sem comprometer o apelo visual.

Os resultados encontrados sugerem que a alteração de cor e das propriedades ópticas dos filmes com a adição de extrato de baru não só melhorou sua funcionalidade, como também agrega um apelo estético importante. O tom terroso conferido pelos pigmentos do extrato oferece uma identidade visual natural, alinhada às tendências de sustentabilidade e inovação. Esse diferencial estético pode ser um atrativo comercial significativo, especialmente em embalagens de alimentos artesanais, orgânicos e gourmet, onde a aparência visual e a percepção de naturalidade são fundamentais para conquistar a preferência dos consumidores que buscam alternativas ecológicas.

3.3.3 Atividade Antioxidante e Fenólicos Totais dos Filmes

A adição do extrato hidroalcoólico de baru a 3% e 6% aumentou significativamente ($p < 0,05$) os teores de fenólicos totais e a atividade antioxidante dos filmes, evidenciados nos métodos Fast Blue, fosfomolibdênio (POMo) e DPPH (Tabela 5). O filme ACE6 (6% de extrato) destacou-se com os maiores valores de fenólicos totais (521,78 mg GAE/g) e atividade

antioxidante, especialmente nos ensaios POMo (81,7 mg AAE/g) e DPPH (24%), exceto no FRAP, onde a diferença entre ACE3 e ACE6 não foi significativa.

Tabela 5. Valores médios e desvios-padrão de fenólicos totais (TPC, atividades antioxidantes DPPH, fosfomolibdênio (POMo) e FRAP dos filmes ativos de amido, LCMNF e extrato de baru.

FILMES	TPC (FB) (mg GAE/ g)	DPPH (%)	POMo (mg AAE/ g)	FRAP (μ M FeSO ₄ /g)
AM	0,00 ^a	5,94 \pm 1,92 ^a	4,86 \pm 0,30 ^a	627,83 \pm 18,08 ^a
AC	63,66 \pm 6,89 ^{ab}	5,23 \pm 0,83 ^a	6,24 \pm 0,39 ^a	653,30 \pm 13,1 ^a
ACE3	122,95 \pm 0,87 ^b	9,97 \pm 3,97 ^a	47,87 \pm 1,27 ^b	853,96 \pm 12,94 ^b
ACE6	521,78 \pm 1,58 ^c	24,52 \pm 4,20 ^b	81,7 \pm 4,99 ^c	865,08 \pm 38,22 ^b

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Legenda: AM (amido), AC (amido e LCMNF), ACE3 (amido, LCMNF e 3% de extrato), ACE6 (amido, LCMNF e 6% de extrato).

A atividade antioxidante observada nos filmes ACE3 e ACE6 está diretamente relacionada ao perfil fenólico do extrato de baru, especialmente pela presença de compostos antioxidantes como a quercetina (Tabela 1) Estudos anteriores, como os de Al Kateeb et al. (2024) e Tapia et al. (2024), destacam uma correlação positiva entre o teor de fenólicos específicos, incluindo flavonoides e ácidos fenólicos, e a elevada atividade antioxidante de extratos vegetais. A incorporação desses compostos nos filmes reforça a hipótese de que o aumento da concentração de extrato no filme ACE6 aumenta sua capacidade antioxidante, potencializando suas propriedades protetoras e demonstrando sua promissora aplicabilidade na extensão da vida útil de produtos embalados.

A atividade antioxidante dos filmes medida pelo DPPH foi particularmente elevada em ACE6, com 24,52% de eliminação de radicais livres, o que pode estar associado à presença de compostos lipofílicos, como a quercetina, que demonstra alta eficiência no método DPPH (Mirza et al., 2023; Alves-Silva et al., 2022). A diferença observada entre ACE6 e ACE3 reforça a importância de ajustar a concentração do extrato de baru para otimizar a bioatividade dos filmes.

Os valores de atividade antioxidante medidos pelo FRAP nos filmes foram consistentes com estudos que utilizaram fontes naturais em filmes comestíveis e biodegradáveis, como os trabalhos de Oliveira Filho et al. (2023), que analisaram filmes com polpa de mangaba, e Paiva et al. (2024), que incorporaram óleo de andiroba em filmes de nanofibrilas de cipó titica.

Além disso, a presença de lignina residual nas LCMNF pode ter contribuído para a atividade antioxidante observada no filme AC, já que a lignina possui propriedades antioxidantes (Brenelli et al., 2016; Tramontina et al., 2023).

Esses resultados indicam que filmes biodegradáveis formulados com amido, LCMNF e extrato de baru, especialmente com 6% de extrato, possuem um potencial bioativo significativo. A inclusão de extratos vegetais em materiais biodegradáveis é promissora para aprimorar as propriedades antioxidantes dos filmes, sugerindo aplicações em embalagens sustentáveis com potencial para prolongar a vida útil dos alimentos. Estudos adicionais são recomendados para otimizar as concentrações do extrato, os métodos de incorporação e avaliar a aplicabilidade prática desses filmes em diferentes contextos.

3.3.4 Propriedades mecânicas, Barreira ao Vapor de Água e Ângulo de contato

Na Tabela 6 são apresentadas as propriedades mecânicas e de barreira dos filmes de amido, LCMNF e extrato de baru, incluindo resistência à tração final (UTS), alongamento à ruptura (EB), taxa de transmissão de vapor de água (TPVA), permeabilidade ao vapor de água (PVA), ângulo de contato (CA°) e molhabilidade. Essas características são cruciais para avaliar a adequação dos filmes como embalagens biodegradáveis, especialmente em relação à resistência mecânica e propriedades de barreira.

Tabela 6. Propriedades mecânicas (resistência à tração final - UTS, alongamento à ruptura – EB), de barreira (TPVA e PVA), e de molhabilidade (ângulo de contato - CA e taxa de molhabilidade) dos filmes ativos de amido com LCMNF e extrato de baru.

Filmes	UTS (MPa)	EB (%)	TPVA (g/m ² dia)	PVA (g mm/m ² dia kPa)	CA (°)	Molhabilidade (°/s)
AM	29.79 ± 9.36 ^a	5.25 ± 1.62 ^a	193.09 ± 27.95 ^b	6.22 ± 0.90 ^{ab}	69.34 ± 0.45 ^a	0.05 ± 0.01 ^a
AC	25.89 ± 6.89 ^a	3.04 ± 1.20 ^a	128.13 ± 26.71 ^a	4.80 ± 1.00 ^a	72.76 ± 1.82 ^a	0.05 ± 0.006 ^a
ACE3	29.40 ± 4.06 ^a	4.40 ± 1.81 ^a	188.83 ± 23.46 ^b	7.55 ± 0.94 ^b	74.52 ± 3.45 ^{ab}	0.06 ± 0.01 ^a
ACE6	26.34 ± 4.80 ^a	4.66 ± 1.61 ^a	178.61 ± 19.51 ^b	7.30 ± 0.80 ^b	79.58 ± 0.95 ^b	0.06 ± 0.009 ^a

Médias seguidas da mesma letra, por coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Legenda: AM (amido), AC (amido e LCMNF), ACE3 (amido, LCMNF e 3% de extrato), ACE6 (amido, LCMNF e 6% de extrato).

Os valores de UTS variaram de 25,89 MPa (filme AC) a 29,79 MPa (filme AM), sem diferenças entre os tratamentos ($p > 0,05$) (Tabela 6). Esses valores são superiores aos relatados nos filmes de amido com nanofibrilas de palha de trigo (12,68 MPa) e de amido com emulsão

de óleo de melancia (6,7 MPa) (Lago et al., 2021; Colivet et al., 2022). A maior resistência dos filmes de baru pode ser atribuída à sinergia entre a matriz de amido, o gel LCMNF e o extrato hidroalcoólico de baru, formando uma estrutura mais robusta, em contraste com as emulsões oleosas de melancia que reduziram a resistência dos filmes (Colivet et al., 2022).

Para o alongamento (EB%), não houve diferença significativa entre os filmes ($p > 0,05$), com valores entre 3,04% (AC) e 4,66% (ACE6). Embora esses valores sejam menores que os de filmes de amido de mandioca com nanofibrilas ou emulsões oleosas (Lago et al., 2021; Colivet et al., 2022), refletem a menor flexibilidade dos filmes de baru, sugerindo uma estrutura menos maleável.

Os resultados da taxa de permeabilidade ao vapor d'água mostraram que o filme AC apresentou o menor valor de TPVA (128,13 g/m²·dia), indicando melhor resistência à transmissão de vapor d'água. Esse comportamento pode ser atribuído à dispersão homogênea das micro/nanofibrilas (LCMNF) na matriz polimérica, formando uma estrutura emaranhada de fibrilas dispersas que promovem um caminho tortuoso para moléculas de água, conforme relatado por Bangar & Whiteside (2021) e Guivier et al. (2024). Em contrapartida, os filmes ACE 3 e ACE6, contendo extrato de baru apresentaram valores TPVA maiores (188,83 e 178,61 g/m²·dia, respectivamente). Isso sugere que o extrato de baru introduziu descontinuidades estruturais como porosidade e maior rugosidade, conforme evidenciado por análises MEV e AFM (Fig. 10 e Fig.11) comprometendo a barreira ao vapor.

A permeabilidade ao vapor d'água (PVA) seguiu uma tendência semelhante, com o filme AC exibindo o menor valor (4,80 g/mm·m²·dia·kPa), enquanto os filmes ACE3 e ACE6 apresentaram valores mais elevados (7,55 e 7,30 g/mm·m²·dia·kPa, respectivamente). Ainda assim, os valores de PVA dos filmes com extrato se mantiveram na faixa de materiais sintéticos como poliestireno (PE) (4 – 10,8 g/mm·m²·dia·kPa), o que reforça seu potencial para aplicações em embalagens com controle moderado de umidade (Alves-Silva et al., 2022).

O ângulo de contato (CA°) revelou um comportamento de redução da hidrofobicidade do filme com maior concentração de extrato (ACE6), alcançando 79,58°. (Tabela 6). Esse valor é superior ângulos de contato relatados na literatura para filmes com açaí (~67°), amido e emulsão com óleo de melancia (~62,37°) e fibras de palha de trigo (~68,68°) (Paiva et al., 2024; Colivet et al., 2022; Lago et al., 2021). Embora o filme ACE6 tenha apresentado menor hidrofobicidade, a molhabilidade (°/s) não variou significativamente entre os tratamentos, indicando que o extrato de baru aumentou a repelência superficial sem afetar a taxa de absorção à umidade. Embora os filmes biodegradáveis com extrato de baru demonstrem potencial para embalagens sustentáveis, enfrentam desafios críticos quanto às suas propriedades mecânicas que

impulsionam a busca por novas abordagens. O estudo evidencia limitações nos resultados quanto a metodologia utilizada e sugere a utilização da matriz polimérica desenvolvida não apenas como filmes, mas principalmente como revestimentos inovadores. Esses revestimentos poderiam não apenas reforçar a integridade mecânica de embalagens de papel já consolidadas no mercado, mas também adicionar funcionalidades ativas, como ação antioxidante e antimicrobiana, essenciais para prolongar a vida útil de produtos perecíveis.

Especificamente, os revestimentos à base de extrato de baru podem oferecer uma barreira eficaz contra a proteção de microrganismos e processos oxidativos em frutas e vegetais. O rico perfil de compostos bioativos no extrato do baru comprovado em estudos anteriores, incluindo fenólicos, taninos, vitamina C e sesquiterpenos, sustenta a previsão dessa aplicação. Recomenda-se a realização de investigações adicionais sobre a eficácia desses revestimentos sob diversas condições de armazenamento para validar a funcionalidade e segurança das embalagens, desafiando os paradigmas das aplicações convencionais de materiais biodegradáveis.

3.3.5 Análise de Estabilidade Térmica dos Filmes

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada para avaliar a estabilidade térmica e os perfis de decomposição dos filmes biodegradáveis. As curvas de TGA e a primeira derivada (DTG) estão apresentadas na Figura 12. Observa-se nos termogramas uma perda inicial de massa entre 100°C e 200°C em todos os filmes (Figura 12A), atribuída à evaporação de água e plastificantes, o que confirma a natureza hidrofílica do material.

O filme controle (AM) apresentou maior resistência térmica inicial, com temperatura de início de degradação ($T_{inicial}$) registrada em 285,76°C (Tabela 7). Em contraste, os filmes com extrato de baru (ACE3 e ACE6) mostraram temperaturas iniciais de decomposição mais baixas (253,61°C e 259,17°C, respectivamente), indicando que o extrato antecipou o início da degradação térmica dos filmes.

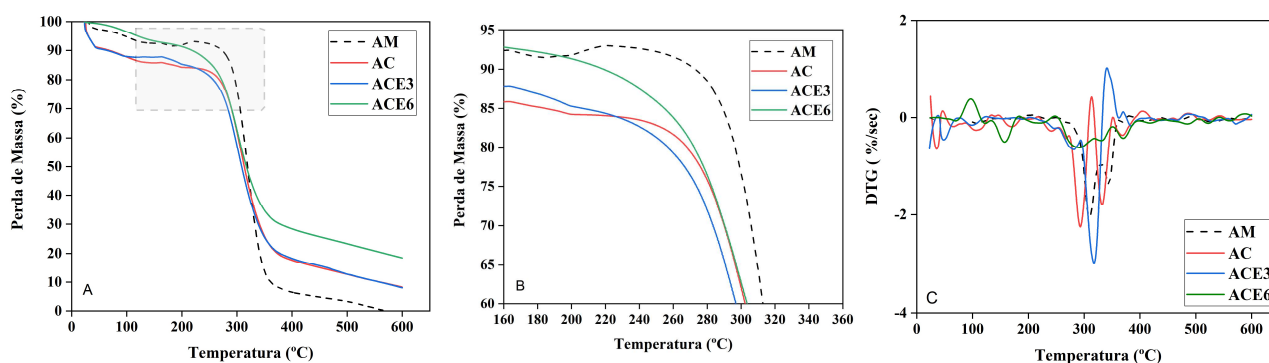


Figura 12. Análise de degradação térmica dos filmes de amido com LCMNF e extrato de baru. (A) Curva de perda de massa com o aumento da temperatura; (B) aproximação da curva de perda de massa; (C) curva da primeira derivada do TGA (DTG). Filmes analisados: AM – controle (amido); AC – amido e LCMNF; ACE3 – amido, LCMNF e 3% de extrato de baru; ACE6 – amido, LCMNF e 6% de extrato de baru.

A análise da primeira derivada das curvas TGA (DTG) (Figura 12C) evidenciou um comportamento térmico distinto para o filme ACE6. Este filme apresentou uma taxa de degradação menos acentuada entre 250°C e 350°C, com um pico de decomposição menor em $T_{m\acute{a}x}$ de 301,43°C, como mostrado na Figura 12C e na Tabela 7. A maior concentração de extrato de baru em ACE6 parece exercer um efeito estabilizador na matriz polimérica, provavelmente devido à presença de compostos antioxidantes no extrato, conforme relatado por Braga et al. (2019).

Tabela 7 Temperaturas iniciais, máximas e resíduos da análise TGA dos filmes ativos de amido com LCMNF e extrato hidroalcolico do baru.

Filmes	T inicial	T máx.	Resíduos (%)
AM	285.76	309.75	6.67
AC	266.19	293.68	15.19
ACE3	253.61	316.82	15.46
ACE6	259,17	301.43	18.39

Após 350°C, o filme ACE6 continuou a perder massa de forma mais lenta, reforçando sua maior estabilidade térmica em comparação aos outros filmes. Essa característica sugere que ACE6 é mais adequado para aplicações onde o filme pode ser exposto a temperaturas

moderadamente elevadas, mantendo parte de sua integridade estrutural, o que é desejável para maior durabilidade em condições de processamento ou armazenamento prolongado.

Os resíduos remanescentes após a degradação térmica também fornecem informações sobre a estabilidade do material (Brand et al., 2018). Os filmes ACE3 e ACE6 exibiram maiores quantidades de resíduos (15,46% e 18,39%, respectivamente), indicando que o extrato vegetal contribuiu para uma maior formação de material carbonizado, conferindo resistência a temperaturas mais elevadas.

Estudos de El-Sayed e Mostafa (2014) e Gea et al. (2020) relataram que nanofibrilas de materiais lignocelulósicos e extratos vegetais apresentam diferentes comportamentos térmicos, atribuídos à cristalinidade das nanofibrilas e à presença de compostos bioativos. Esses achados corroboram a hipótese de que a inclusão de extratos naturais, como o de baru, pode melhorar a termoestabilidade de biocompósitos, aumentando seu potencial em materiais sustentáveis e biodegradáveis.

Em resumo, o filme ACE6 apresentou o melhor desempenho térmico entre os filmes ativos, com um perfil de degradação mais controlado e maior resistência ao calor. Esse efeito estabilizador, fornecido pela sinergia entre o LCMNF e o extrato hidroalcoólico de baru, não apenas melhora as propriedades do filme, mas também pode desempenhar um papel crucial na qualidade e conservação dos alimentos. O extrato de baru, rico em compostos bioativos com propriedades antioxidantes e antimicrobianas, atua como um aditivo funcional, conferindo ao filme a capacidade de interagir com o alimento, protegendo-o contra o crescimento de microrganismos e a oxidação. Essa abordagem inovadora abre novas possibilidades para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis que, além de melhorar as propriedades do filme, estão empenhadas em tecnologias que otimizem a preservação dos alimentos.

3.3.6 Caracterização Estrutural por Espectroscopia Raman

Na Figura 13 são apresentados os espectros Raman dos filmes de amido incorporados com LCMNF e extrato hidroalcoólico de baru nas concentrações de 3% e 6%. Os espectros apresentam uniformidade com sete picos principais entre 850 e 900 cm^{-1} , atribuídos às vibrações de estiramento das ligações glicosídicas (COC), que conectam as unidades de glicose na estrutura dos polissacarídeos, como amilose e amilopectina. Essas vibrações são essenciais para a manutenção da conformação helicoidal do amido, influenciando diretamente suas

propriedades de solubilidade e biodegradabilidade (Ildiz et al., 2019; Wiercigroch et al., 2017; Yu et al., 2002).

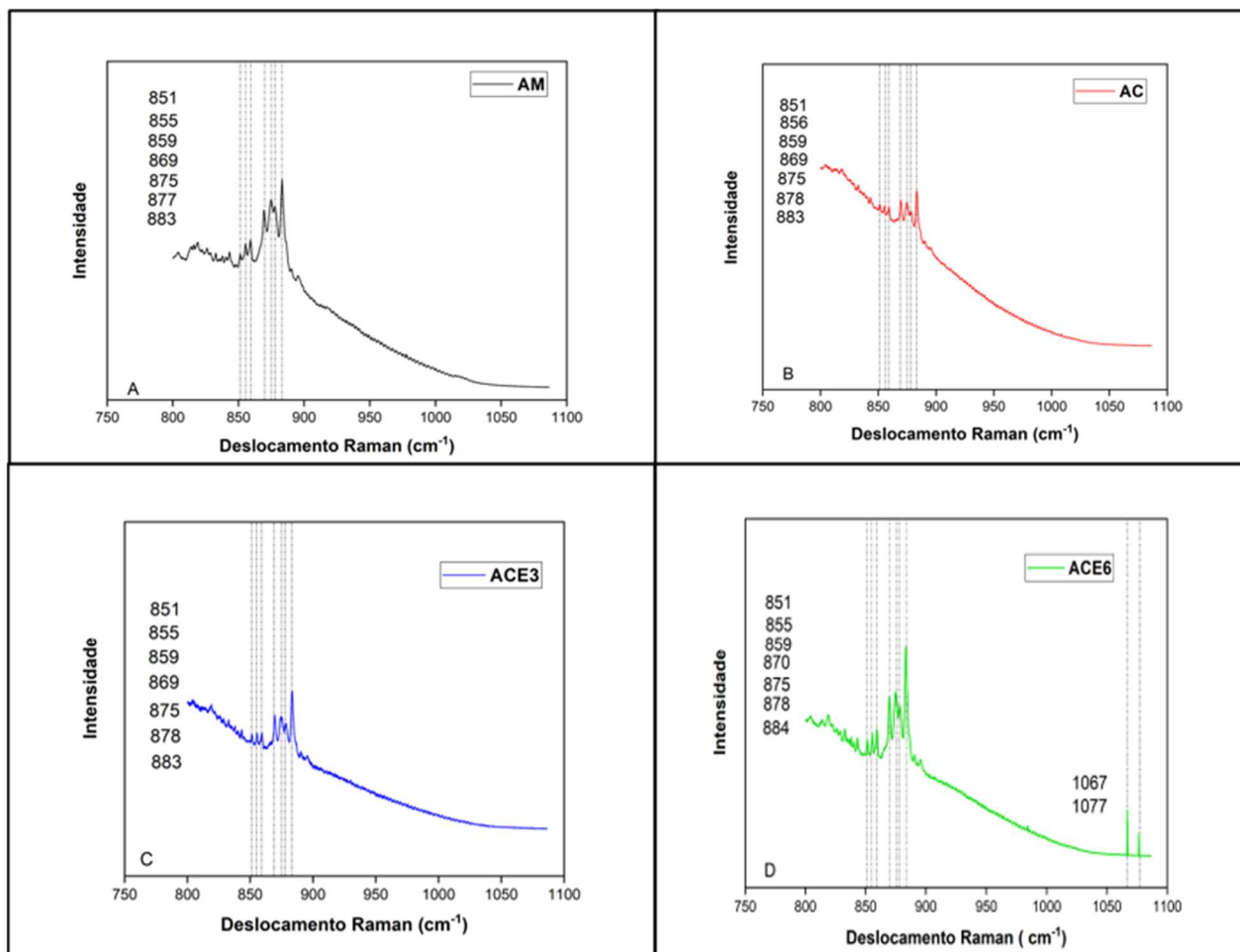


Figura 13. Espectros Raman de filmes biodegradáveis de amido com LCMNF e extrato hidroalcoólico de baru na faixa de 750–1100 cm^{-1} . Filmes Analisados: AM – controle; AC – amido e LCMNF; ACE3 – amido, LCMNF e 3% de extrato de baru; ACE6 – amido, LCMNF e 6% de extrato de baru.

O espectro do filme AM (controle) apresenta os picos esperados entre 850 e 900 cm^{-1} , indicando a estrutura típica de um filme de amido puro. Sem a adição de LCMNF ou extrato de baru, a conformação do amido permanece estável, com interações moleculares bem definidas que influenciam a intensidade dos picos Raman. Nos filmes AC e ACE3, observa-se uma redução na intensidade desses picos e um estreitamento das bandas, sugerindo que a adição de LCMNF e 3% de extrato de baru promoveu uma reorganização estrutural restritiva, afetando a mobilidade das cadeias poliméricas e suas interações intermoleculares. Essa diminuição na

intensidade Raman pode indicar um ajuste conformacional do amido devido à interação com as micro/nanofibrilas (Agarwal, 2019), embora a concentração de 3% do extrato não tenha sido suficiente para induzir mudanças estruturais significativas. Este comportamento sugere interações limitadas entre os compostos bioativos do extrato de baru e a matriz de amido com LCMNF (Ptak et al., 2021).

No espectro do filme ACE6, observa-se uma intensificação dos picos, e o surgimento de novos picos em 1067 e 1077 cm^{-1} (Figura 13 - ACE6). Esses picos, situados na região de impressão digital (1000–1500 cm^{-1}), são característicos das vibrações de grupos funcionais como CO, CH, CH₂, CH₃ e OH, indicando uma reorganização molecular robusta e a formação de novas interações químicas (Jurasekova et al., 2006; Tahir et al., 2017). Estudos anteriores sugerem que interações nessa região espectral estão associadas à presença de compostos fenólicos no extrato de baru, como quercetina, *p*-cumárico e ácido ferúlico, que podem interagir com grupos hidroxila presentes nas nanofibrilas e no amido, atuando como agentes reticuladores ou plastificantes, promovendo uma maior estabilização estrutural em filmes (Choi et al., 2018; de Angelis et al., 2025; Xiao et al., 2025).

A reorganização estrutural observada no filme ACE6 reflete a capacidade dos compostos fenólicos em formar ligações intermoleculares com a matriz de amido e LCMNF, resultando em um filme estruturado, com propriedades funcionais aprimoradas e maior estabilidade antioxidante (Choi et al., 2018). O estudo de Ptak et al. (2021) corrobora essa observação, demonstrando que amostras contendo compostos pigmentados, como os presentes no extrato de baru, exibem maior intensidade nos picos Raman devido à absorção do laser e subsequente emissão intensificada.

Esses resultados indicam que o filme ACE6 apresenta um potencial significativo para uso em embalagens biodegradáveis de alto desempenho, sendo especialmente adequado para aplicações que exigem elevada estabilidade antioxidante e durabilidade estrutural. A reorganização molecular promovida pela interação entre o extrato de baru e a matriz de amido com LCMNF confere ao filme propriedades funcionais superiores, posicionando-o como uma escolha promissora para embalagens sustentáveis e ativas.

3.3.7 Biodegradabilidade em Solo

A biodegradabilidade dos filmes foi monitorada ao longo de 30 dias, até sua completa decomposição, conforme ilustrado na Figura 14. Nos primeiros sete dias, o acompanhamento foi diário com registros fotográficos detalhados; após esse período, o monitoramento passou a ser feito a cada cinco dias até o término do ensaio.

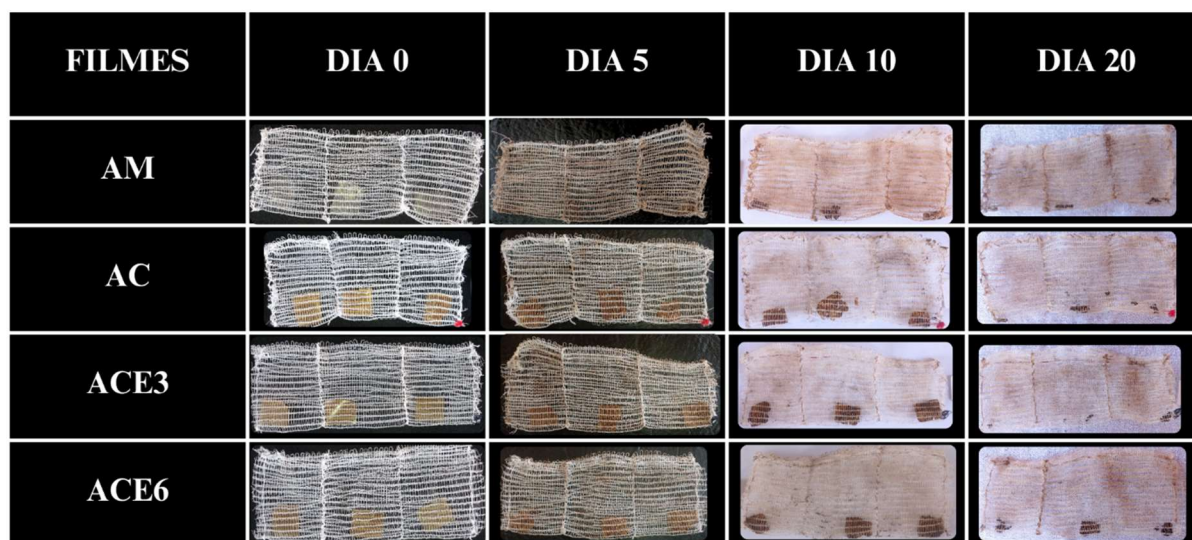


Figura 14. Ensaio de biodegradabilidade dos filmes em solo. AM – Amido; AC – amido e LCMNF; ACE3 – amido, LCMNF e 3% de extrato de baru; ACE6 – amido, LCMNF e 6% de extrato de baru.

O teste revelou que o filme AM apresentou as maiores taxas de biodegradabilidade, mostrando sinais visíveis de enrugamento já no quinto dia. Esse comportamento foi significativamente mais intenso em comparação com os outros filmes. No décimo dia, todos os filmes, com exceção do ACE6, apresentaram sinais de degradação visível, como redução de tamanho e surgimento de furos. O filme ACE6, embora tenha exibido enrugamento progressivo, demonstrou maior resistência à desconstrução da matriz polimérica, mantendo sua integridade estrutural sem rasgos ou furos até fases mais avançadas do ensaio.

A partir do décimo quinto dia, todos os filmes perderam sua coloração original, adquirindo tonalidades semelhantes ao solo, o que dificultou a distinção visual entre os fragmentos dos filmes e o material orgânico incorporado. No vigésimo dia, os filmes AM e ACE3 estavam quase totalmente degradados, enquanto o filme ACE6 ainda apresentava pequenos fragmentos visíveis, alcançando a biodegradação completa apenas ao trigésimo dia. Esse comportamento confirma a maior resistência à degradação do ACE6 em comparação com os demais filmes.

A maior resistência do filme ACE6 corrobora com os resultados previamente observados, como maior poder antioxidante, redução da hidrofiliidade e maior estabilidade térmica. Esses fatores são importantes para uma estrutura mais robusta e estável, retardando sua biodegradabilidade. Importante citar que além da reconhecida atividade antioxidante reportada aos fenólicos e compostos bioativos presentes no extrato de baru, eles também são conhecidos por sua capacidade de inibir o crescimento microbiano, que podem estar associados aos resultados de biodegradabilidade em solo retardada dos filmes com 6% de extrato

Esses resultados ressaltam o potencial do filme ACE6 para aplicações que requerem um equilíbrio entre durabilidade e biodegradabilidade controlada, sendo ideais para embalagens biodegradáveis e sustentáveis. A resistência mecânica protege o conteúdo durante o uso, enquanto a decomposição ambientalmente amigável após o descarte, contribui para um ciclo de vida mais sustentável.

4. CONCLUSÃO

Este estudo comprova o potencial dos resíduos agroindustriais do baru como uma fonte sustentável para o desenvolvimento de filmes biodegradáveis ativos. A utilização do gel lignocelulósico micro/nanofibrilado (LCMNF) e do extrato hidroalcoólico da polpa de baru, rico em compostos fenólicos como quercetina e ácido ferúlico, permitiu a produção de filmes com alta atividade antioxidante e estabilidade térmica, destacando o filme com 6% de extrato. Apesar do aumento na hidrofobicidade com concentrações mais elevadas do extrato, as propriedades mecânicas e de barreira ao vapor de água dos filmes necessitam de ajustes para otimização, sugerindo uma possível aplicação como revestimentos funcionais em vez de filmes estruturais.

A pesquisa destaca a valorização de resíduos do baru como fonte de aditivos bioativos, contribuindo para o desenvolvimento de materiais de embalagem sustentáveis e funcionais. A otimização da extração e novos ajustes na formulação podem ampliar o uso desses filmes biodegradáveis em aplicações industriais, promovendo alternativas ecologicamente responsáveis e reforçando a reutilização de resíduos agroindustriais. Esses achados incentivam o uso de componentes naturais e sustentáveis, abrindo caminho para o desenvolvimento de materiais com propriedades melhoradas e impacto ambiental reduzido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPEMIG, UFG, UFLA, IFNMG, UNIFAL, UFSCar, UFRGS, BARUKAS. Esta pesquisa não recebeu nenhum subsídio específico de agências de financiamento dos setores público, comercial ou sem fins lucrativos.

REFERÊNCIAS

- Agarwal, U. P. (2019). Analysis of Cellulose and Lignocellulose Materials by Raman Spectroscopy: A Review of the Current Status. In *Molecules* (Vol. 24, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/molecules24091659>
- Al Kateeb, A. I. M., Tüfekci, E. F., Altunoglu, Y. C., Baloglu, M. C., Nilofar, N., Yıldıztuğay, E., Jekő, J., Cziáky, Z., & Zengin, G. (2024). Multidirectional research for the therapeutic potential of *Phlomis molucelloides* (Bunge) Salmaki: LC-MS/MS, antioxidant, enzyme inhibition, and antiproliferative characteristics. *Process Biochemistry*, *143*, 302–314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.05.011>
- Alizadeh Sani, M., Khezerlou, A., Tavassoli, M., Abedini, A. H., & McClements, D. J. (2024). Development of sustainable UV-screening food packaging materials: A review of recent advances. *Trends in Food Science & Technology*, *145*, 104366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104366>
- Alves-Santos, A. M., Fernandes, D. C., & Naves, M. M. V. (2021). Baru (*Dipteryx alata* Vog.) fruit as an option of nut and pulp with advantageous nutritional and functional properties: A comprehensive review. *NFS Journal*, *24*(June), 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.07.001>
- Alves-Silva, G. F., Romani, V. P., & Martins, V. G. (2022). Jatobá (*Hymenaea stigonocarpa*) pulp films: Properties, antioxidant potential and biodegradability. *Food Packaging and Shelf Life*, *34*(August), 0–3. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100923>
- ASTM D 882-18. (2018). Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, ASTM International. *Www.Astm.Org*, August, 1–12. <https://doi.org/10.1520/D0882-18>.
- ASTM D7334 – 08. (2022). *Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement*. 08, 1–2. <https://doi.org/10.1520/C1709-18>.
- ASTM E96M-16. (2016). Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. *ASTM International*, i(October), 1–8. <https://doi.org/10.1520/E0096>
- Bangar, S. P., Balakrishnan, G., Navas, M., & Sunooj, K. V. (2024). Recent advancements on barnyard millet starch: A sustainable alternative to conventional starch. *Starch - STÄRKE*, *v.76*, 9-10. Article e2300232. <https://doi.org/10.1002/star.202300232>
- Bangar, S. P., & Whiteside, W. S. (2021). Nano-cellulose reinforced starch bio composite films: A review on green composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, *185*, 849–860. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.017>
- Baş, Y., Berglund, L., Niittylä, T., Zattarin, E., Aili, D., Sotra, Z., Rinklake, I., Junker, J., Rakar, J., & Oksman, K. (2024). Preparation and Characterization of Softwood and Hardwood Nanofibril Hydrogels: Toward Wound Dressing Applications.

- Biomacromolecules*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.biomac.3c00596>
- Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, 235, 337–351. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
- Boarino, A., & Klok, H.-A. (2023). Opportunities and Challenges for Lignin Valorization in Food Packaging, Antimicrobial, and Agricultural Applications. *Biomacromolecules*, 24(3), 1065–1077. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c01385>
- Braga, L. R., Pérez, L. M., Soazo, M. del V., & Machado, F. (2019). Evaluation of the antimicrobial, antioxidant and physicochemical properties of Poly(Vinyl chloride) films containing quercetin and silver nanoparticles. *LWT*, 101, 491–498. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.082>
- Brand, M. A., Barnasky, R. R. de S., Carvalho, C. A., Buss, R., Waltrick, D. B., & Jacinto, R. C. (2018). Thermogravimetric analysis for characterization of the pellets produced with different forest and agricultural residues. In *Ciência Rural* (Vol. 48). scielo .
- Brenelli, L. B., Mandelli, F., Mercadante, A. Z., Rocha, G. J. de M., Rocco, S. A., Craievich, A. F., Gonçalves, A. R., Centeno, D. da C., de Oliveira Neto, M., & Squina, F. M. (2016). Acidification treatment of lignin from sugarcane bagasse results in fractions of reduced polydispersity and high free-radical scavenging capacity. *Industrial Crops and Products*, 83, 94–103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.013>
- Carvalho, A. P. A., Értola, R., & Conte-Junior, C. A. (2024). Nanocellulose-based platforms as a multipurpose carrier for drug and bioactive compounds: From active packaging to transdermal and anticancer applications. *International Journal of Pharmaceutics*, 652, 123851. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.123851>
- Choi, I., Lee, S. E., Chang, Y., Lacroix, M., & Han, J. (2018). Effect of oxidized phenolic compounds on cross-linking and properties of biodegradable active packaging film composed of turmeric and gelatin. *LWT*, 93, 427–433. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.065>
- Colivet, J., Garcia, V. A., Lourenço, R. V., Yoshida, C. M., Oliveira, A. L., Vanin, F. M., & Carvalho, R. A. (2022). Characterization of Films Produced with Cross-Linked Cassava Starch and Emulsions of Watermelon Seed Oils. In *Foods* (Vol. 11, Issue 23). <https://doi.org/10.3390/foods11233803>
- da Costa, C. A. R., Machado, G. G. L., Rodrigues, L. J., de Barros, H. E. A., Natarelli, C. V. L., & Boas, E. V. de B. V. (2023). Phenolic compounds profile and antioxidant activity of purple passion fruit's pulp, peel and seed at different maturation stages. *Scientia Horticulturae*, 321(May). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112244>
- Damodaran, S., & Parkin, K. (Eds. . (2017). Fennema's Food Chemistry (5ed). In *Fennema's Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1201/9781315372914>
- de Angelis, M., Amicucci, C., Banchelli, M., D'Andrea, C., Gori, A., Agati, G., Brunetti, C., & Matteini, P. (2025). Rapid determination of phenolic composition in chamomile (*Matricaria recutita* L.) using surface-enhanced Raman spectroscopy. *Food Chemistry*, 463, 141084. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141084>
- Desmaisons, J., Boutonnet, E., Rueff, M., Dufresne, A., & Bras, J. (2017). A new quality index for benchmarking of different cellulose nanofibrils. *Carbohydrate Polymers*, 174, 318–329. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.06.032>
- Diwan, B., Mukhopadhyay, D., & Gupta, P. (2020). *Chapter 11 - Recent trends in biorefinery-based valorisation of lignocellulosic biomass* (N. Krishnaraj Rathinam & R. K. B. T.-B. of W. to R. C. and B. Sani (eds.); pp. 219–242). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817951-2.00011-0>
- do Val Siqueira, L., Arias, C. I. L. F., Maniglia, B. C., & Tadini, C. C. (2021). Starch-based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspectives.

- Current Opinion in Food Science*, 38, 122–130.
<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.020>
- El-Sayed, S. A., & Mostafa, M. E. (2014). Pyrolysis characteristics and kinetic parameters determination of biomass fuel powders by differential thermal gravimetric analysis (TGA/DTG). *Energy Conversion and Management*, 85, 165–172.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.068>.
- Fukuzumi, H., Tanaka, R., Saito, T. *et al.* Dispersion stability and aggregation behavior of TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils in water as a function of salt addition. *Cellulose* 21, 1553–1559 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0180-z>
- Garuti, G. L., Freitas, R. R. M. de ., Lima, V. H. de ., Carmo, K. P. do ., Pádua, F. A. de ., & Botaro, V. R.. (2024). Nanocellulose reinforced starch biocomposite films via tape-casting technique. *Polímeros*, 34(1), e20240004. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20230084>
- Gea, S., Siregar, A. H., Zaidar, E., Harahap, M., Indrawan, D. P., & Perangin-Angin, Y. A. (2020). Isolation and Characterisation of Cellulose Nanofibre and Lignin from Oil Palm Empty Fruit Bunches. In *Materials* (Vol. 13, Issue 10).
<https://doi.org/10.3390/ma13102290>
- Ghaemi, F., Abdullah, L. C., & Ariffin, H. (2019). *Chapter 2 - Lignocellulose Structure and the Effect on Nanocellulose Production* (H. Ariffin, S. M. Sapuan, & M. A. B. T.-L. for F. B. Hassan (eds.); pp. 17–30). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816354-2.00002-5>
- Guivier, M., Chevigny, C., Domenek, S. . Water vapor transport properties of bio-based multilayer materials determined by original and complementary methods. *Sci Rep* 14, 50 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50298-8>
- Gunawardene, O. H. P., Gunathilake, C., Amaraweera, S. M., Fernando, N. M. L., Wanninayaka, D. B., Manamperi, A., Kulatunga, A. K., Rajapaksha, S. M., Dassanayake, R. S., Fernando, C. A. N., & Manipura, A. (2021). Compatibilization of Starch/Synthetic Biodegradable Polymer Blends for Packaging Applications: A Review. In *Journal of Composites Science* (Vol. 5, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/jcs5110300>
- Hewson, D., Gee, K., Koptasikova, L., Hacker, C., & Skuse, D. (2024). EU nano or not nano: An unbiased approach to classifying FiberLean microfibrillated cellulose. *Cellulose*.
<https://doi.org/10.1007/s10570-024-05980-z>
- Hoffmann-Ribani, R., Huber, L. S., & Rodriguez-Amaya, D. B. (2009). Flavonols in fresh and processed Brazilian fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(4), 263–268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.12.004>
- Ildiz, G. O., Kabuk, H. N., Kaplan, E. S., Halimoglu, G., & Fausto, R. (2019). A comparative study of the yellow dent and purple flint maize kernel components by Raman spectroscopy and chemometrics. *Journal of Molecular Structure*, 1184, 246–253.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.02.034>
- International Organization for Standardization, I. (2017). *ISO/TS 20477:2017(en). Nanotechnologies — Standard terms and their definition for cellulose nanomaterial*.
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:20477:ed-1:v1:en>
- Jurasekova, Z., Garcia-Ramos, J. V, Domingo, C., & Sanchez-Cortes, S. (2006). Surface-enhanced Raman scattering of flavonoids. *Journal of Raman Spectroscopy*, 37(11), 1239–1241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jrs.1634>
- Kargarzadeh, H., Mariano, M., Gopakumar, D., Ahmad, I., Thomas, S., Dufresne, A., Huang, J., & Lin, N. (2018). Advances in cellulose nanomaterials. *Cellulose*, 25(4), 2151–2189.
<https://doi.org/10.1007/s10570-018-1723-5>
- Karunaratne, R., & Zhu, F. (2016). Physicochemical interactions of maize starch with ferulic acid. *Food Chemistry*, 199, 372–379.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.033>
- Kolap, R. M., Kakade, P. S., Mankar, G. D., Barmukh, R. B., Gacche, R. N., & Zimare, S. B. (2022). Bioprospection of underutilized wild *Cissus woodrowii* fruits for nutritional value and characterization of green-extracted antioxidant phenolic compounds. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 29, 100371. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2022.100371>
- Kumar, N., Pratibha, Prasad, J., Yadav, A., Upadhyay, A., Neeraj, Shukla, S., Petkoska, A. eena, Suri, S., Gniewosz, M., & Kieliszek, M. (2023). Recent Trends in Edible Packaging for Food Applications — Perspective for the Future. *Food Engineering Reviews*, 15(4), 718–747. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09358-y>
- Lago, R. C., de Oliveira, A. L. M., Cordasso Dias, M., de Carvalho, E. E. N., Denzin Tonoli, G. H., & de Barros Vilas Boas, E. V. (2020). Obtaining cellulosic nanofibrils from oat straw for biocomposite reinforcement: Mechanical and barrier properties. *Industrial Crops and Products*, 148, 112264. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112264>
- Lago, R. C., de Oliveira, A. L. M., de Amorim dos Santos, A., Zitha, E. Z. M., Nunes Carvalho, E. E., Tonoli, G. H. D., & de Barros Vilas Boas, E. V. (2021). Addition of wheat straw nanofibrils to improve the mechanical and barrier properties of cassava starch-based bionanocomposites. *Industrial Crops and Products*, 170(February). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113816>
- Li, Z., Zhang, Y., Anankanbil, S., & Guo, Z. (2021). Applications of nanocellulosic products in food: Manufacturing processes, structural features and multifaceted functionalities. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 277–300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.027>
- Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., Melo, R. R. De, Damásio, R. A. P., Mendonça, M. C., & Tonoli, G. H. D. (2022). Fibers pre-treatments with sodium silicate affect the properties of suspensions, films, and quality index of cellulose micro/nanofibrils: Effect of Na₂SiO₃. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 1–19. <https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0037>
- Mascarenhas, A. R., Setter, C., Scatolino, M. V., Lago, R. C., Batista, F. G., Medeiros, D. T., Santos, C. A., Vale, A. R., Melo, R. R., & Tonoli, G. H. (2024). Valorization of *Coffea arabica* Wood Waste to Obtain Suspensions of Lignocellulose Microfibrils and Lignocellulose Nanofibrils (LCMF/LCNF) and Production of Eco-Friendly Films for Packaging. In *Forests* (Vol. 15, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/f15101834>
- Medina, M. B. (2011). Determination of the total phenolics in juices and superfruits by a novel chemical method. *Journal of Functional Foods*, 3(2), 79–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.02.007>
- Mirza, M. A., Mahmood, S., Hilles, A. R., Ali, A., Khan, M. Z., Zaidi, S. A. A., Iqbal, Z., & Ge, Y. (2023). Quercetin as a Therapeutic Product: Evaluation of Its Pharmacological Action and Clinical Applications-A Review. *Pharmaceuticals (Basel, Switzerland)*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/ph16111631>
- Monteiro, G. de M., Carvalho, E. E. N., & Boas, E. V. B. V. (2022). Baru (*Dipteryx alata* Vog.): Fruit or almond? A review on applicability in food science and technology. *Food Chemistry Advances*, 1(August), 100103. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100103>
- Morcillo-Martín, R., Rabasco-Vílchez, L., Espinosa, E., Pérez-Rodríguez, F., & Rodríguez, A. (2023). Raspberry (*Rubus idaeus* L.) waste-derived nanocellulose for circular application in edible films and coatings. *LWT*, 188, 115438. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115438>
- Nações Unidas. (2024). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)* Disponível em <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.
- Naresh Kumar, S., Hebbar, K. B., Kasturi Bai, K. V., & Rajagopal, V. (2019). Physiology and

- biochemistry. In *The Coconut Palm (Cocos nucifera L.) - Research and Development Perspectives*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2754-4_9
- Oliveira, A. C., Rodrigues, C. A., de Almeida, M. C., Mársico, E. T., Scalize, P. S., de Oliveira, T. F., Solar, V. A., & Valdés, H. (2024). Ethylene Elimination Using Activated Carbons Obtained from Baru (*Dipteryx alata* vog.) Waste and Impregnated with Copper Oxide. In *Molecules* (Vol. 29, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/molecules29122717>
- Oliveira, A. L. M., Bento, J. A. C., Fidelis, M. C., Dias, M. C., de Barros, H. E. A., Natarelli, C. V. L., do Lago, R. C., Barbosa, J. W., Ossani, P. C., Caliari, M., Júnior, M. S. S., Tonoli, G. H. D., Carvalho, E. E. N., Franco, M., Cirillo, M. Â., & de Barros Vilas Boas, E. V. (2023). Effect of pine, eucalyptus, and corn straw nanofibers on the structural properties of rice flour-based biodegradable films. *Industrial Crops and Products*, *191*, 115929. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115929>
- Oliveira Filho, J. G. de, Albiero, B. R., Calisto, Í. H., Bertolo, M. R. V., Oldoni, F. C. A., Egea, M. B., Bogusz Junior, S., de Azeredo, H. M. C., & Ferreira, M. D. (2022). Bio-nanocomposite edible coatings based on arrowroot starch/cellulose nanocrystals/carnauba wax nanoemulsion containing essential oils to preserve quality and improve shelf life of strawberry. *International Journal of Biological Macromolecules*, *219*(May), 812–823. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.049>
- Oliveira Filho, J. G. de, de Sousa, T. L., Bertolo, M. R. V., Bogusz Junior, S., Mattoso, L. H. C., Pimentel, T. C., & Egea, M. B. (2023). Next-generation food packaging: Edible bioactive films with alginate, mangaba pulp (*Hancornia speciosa*), and *Saccharomyces boulardii*. *Food Bioscience*, *54*, 102799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102799>
- Ortiz, P., Vendamme, R., & Eevers, W. (2020). Fully Biobased Epoxy Resins from Fatty Acids and Lignin. In *Molecules* (Vol. 25, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/molecules25051158>
- Paiva, C. S., Batista, F. G., Silva, D. W., Scatolino, M. V, Medeiros, D. T., Mascarenhas, A. R., Lago, R. C., Setter, C., Borges, I. O., Tonoli, G. H., Souza, T. M., Mendes, L. M., Bufalino, L., Alves Junior, F. T., Felix, F. D., & Dias, M. V. (2024). Andiroba Oil (*Carapa guianensis* Aubletet) as a Functionalizing Agent for Titica Vine (*Heteropsis flexuosa*) Nanofibril Films: Biodegradable Products from Species Native to the Amazon Region. In *Sustainability* (Vol. 16, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/su16114395>
- Palanisamy, S., Selvaraju, G. D., Selvakesavan, R. K., Venkatachalam, S., Bharathi, D., & Lee, J. (2024). Unlocking sustainable solutions: Nanocellulose innovations for enhancing the shelf life of fruits and vegetables – A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *261*, 129592. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129592>
- Prieto, P., Pineda, M., & Aguilar, M. (1999). Spectrophotometric Quantitation of Antioxidant Capacity through the Formation of a Phosphomolybdenum Complex: Specific Application to the Determination of Vitamin E. *Analytical Biochemistry*, *269*(2), 337–341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/abio.1999.4019>
- Ptak, S. H., Sanchez, L., Fretté, X., & Kurouski, D. (2021). Complementarity of Raman and Infrared spectroscopy for rapid characterization of fucoidan extracts. *Plant Methods*, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00830-6>
- Ritika, Rizwana, Shukla, S., Sondhi, A., Tripathi, A. D., Lee, J.-K., Patel, S. K. S., & Agarwal, A. (2024). Valorisation of fruit waste for harnessing the bioactive compounds and its therapeutic application. *Trends in Food Science & Technology*, *144*, 104302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104302>
- Rufino, M. do S. M., Alves, R. E., de Brito, E. S., Pérez-Jiménez, J., Saura-Calixto, F., & 4040 Mancini-Filho, J. (2010). Bioactive compounds and antioxidant capacities of 18

- non-4041 traditional tropical fruits from Brazil. *Food Chemistry*, 121(4), 996–1002. 4042 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.037>
- Rufino, M. do S. M., Alves, R. E., Brito, E. S. de, Morais, S. M. de, Sampaio, C. de G., Pérez-Jiménez, J., & Saura-Calixto, F. D. (2006). *Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas pelo Método de Redução do Ferro (FRAP)*. 3–6. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/664098/metodologia-cientifica-determinacao-da-atividade-antioxidante-total-em-frutas-pelo-metodo-de-reducao-do-ferro-frap>
- Scatolino, M. V., Bufalino, L., Dias, M. C., Mendes, L. M., da Silva, M. S., Tonoli, G. H. D., de Souza, T. M., & Junior, F. T. A. (2022). Copaiba oil and vegetal tannin as functionalizing agents for açai nanofibril films: valorization of forest wastes from Amazonia. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(44), 66422–66437. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20520-7>
- Sethupathy, S., Morales, G. M., Gao, L., Wang, H., Yang, B., Jiang, J., Sun, J., & Zhu, D. (2022). Lignin valorization: Status, challenges and opportunities. *Bioresour Technology*, 347, 126696. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126696>
- Silva, D. W., Batista, F. G., Scatolino, M. V., Mascarenhas, A. R. P., De Medeiros, D. T., Tonoli, G. H. D., Lazo, D. A. Á., Caselli, F. de T. R., de Souza, T. M., & Alves Junior, F. T. (2023). Developing a Biodegradable Film for Packaging with Lignocellulosic Materials from the Amazonian Biodiversity. *Polymers*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/polym15173646>
- Silva, K. F., Marques, C. S., de Freitas Junior, A., Dias, M. V., & Mori, F. A. (2023a). Whey protein isolate and kraft lignin multifunctional films for potential food packaging application: UV block and antioxidant potential. *Food Bioscience*, 53, 102581. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102581>
- Silva, L. E., Santos, A. A., Torres, L., McCaffrey, Z., Klamczynski, A., Glenn, G., Sena Neto, A. R., Wood, D., Williams, T., & Orts, W. (2021). Redispersion and structural change evaluation of dried microfibrillated cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 252, 117165. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117165>
- Song, F., Du, K., Yang, H., Luo, Q., Liu, Y., Qiang, Q., Ding, Y., An, Q., & Li, C. (2025). Depolymerization of lignin over heterogeneous Co-NC catalyst. *Journal of Environmental Sciences*, 152, 654–663. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.05.025>
- Sousa Arantes, L. de, Mascarenhas, A. R. P., Borges, I. O., do Lago, R. C., da Silva, C. H., de Mello Innocentini, M. D., Mendes, L. M., & Tonoli, G. H. D. (2024). Use of carbonated cellulose micro/nanofibrils in the coating of sack kraft paper. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82(4), 1049–1059. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02068-0>
- Steffe, J. F. (1996). *Rheological methods in food process engineering* (2nd ed.). Freeman Press. Retrieved in March 2023, from <https://oldversion.stu.edu.vn/uploads/documents/030509-214140.pdf>
- Stribiçaia, E., Blundell, J., You, K. M., Finlayson, G., Gibbons, C., & Sarkar, A. (2022). Viscosity of food influences perceived satiety: A video based online survey. *Food Quality and Preference*, 99(December 2021), 104565. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104565>
- Tahir, H. E., Xiaobo, Z., Zhihua, L., Jiyong, S., Zhai, X., Wang, S., & Mariod, A. A. (2017). Rapid prediction of phenolic compounds and antioxidant activity of Sudanese honey using Raman and Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy. *Food Chemistry*, 226, 202–211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.024>
- Tapia, P. E., Silva, A. M., Delerue-Matos, C., Moreira, M., Rodrigues, F., Torres Carro, R., Santi, M. D., Ortega, M. G., Blázquez, M. A., Arena, M. E., & Alberto, M. R. (2024).

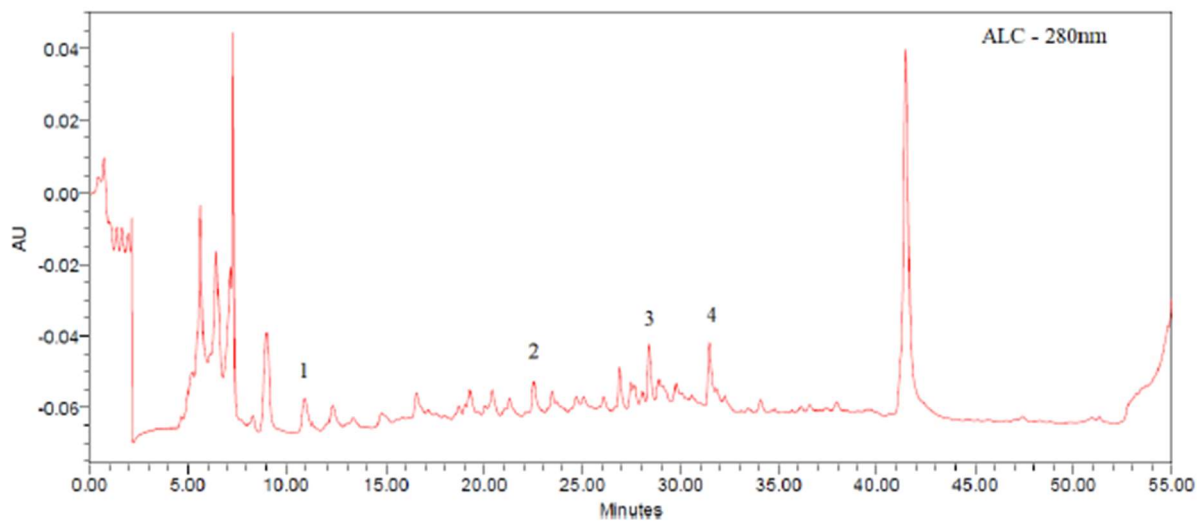
- Exploring the Phytochemical Composition and the Bioactive Properties of Malbec and Torrontés Wine Pomaces from the Calchaquíes Valleys (Argentina) for Their Sustainable Exploitation. In *Foods* (Vol. 13, Issue 12).
<https://doi.org/10.3390/foods13121795>.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1997). *Solvent extractives of wood and pulp* (TAPPI Standard T 204 cm-97). TAPPI Press. Retrieved February 2023, from
<https://www.tappi.org/content/sarg/t204.pdf>
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002). *Acid-insoluble lignin in wood and pulp* (TAPPI Standard T222 om-02). TAPPI Press. Retrieved February 2023, from
<https://www.tappi.org/content/SARG/T222.pdf>.
- Tibolla, H., Czaikoski, A., Pelissari, F. M., Menegalli, F. C., & Cunha, R. L. (2020). Starch-based nanocomposites with cellulose nanofibers obtained from chemical and mechanical treatments. *International Journal of Biological Macromolecules*, *161*, 132–146.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.194>
- Tramontina, R., Ciancaglini, I., Roman, E. K. B., Chacón, M. G., Corrêa, T. L. R., Dixon, N., Bugg, T. D. H., & Squina, F. M. (2023). Sustainable biosynthetic pathways to value-added bioproducts from hydroxycinnamic acids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *107*(13), 4165–4185. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12571-8>
- Van Vliet, T., & Walstra, P. (2017). Dispersed systems basic considerations. In *Fennema's Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1201/9781315372914>
- Velvizhi, G., Goswami, C., Shetti, N. P., Ahmad, E., Kishore Pant, K., & Aminabhavi, T. M. (2022). Valorisation of lignocellulosic biomass to value-added products: Paving the pathway towards low-carbon footprint. *Fuel*, *313*(October 2021), 122678.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122678>.
- Vigneswari, S., Kee, S. H., Hazwan, M. H., Ganeson, K., Tamilselvan, K., Bhubalan, K., Amirul, A. A., & Ramakrishna, S. (2024). Turning agricultural waste streams into biodegradable plastic: A step forward into adopting sustainable carbon neutrality. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *12*(2), 112135.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112135>.
- Wiercigroch, E., Szafraniec, E., Czamara, K., Pacia, M. Z., Majzner, K., Kochan, K., Kaczor, A., Baranska, M., & Malek, K. (2017). Raman and infrared spectroscopy of carbohydrates: A review. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *185*, 317–335. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.05.045>
- Xiao, L., Liu, J., Hua, M. Z., & Lu, X. (2025). Rapid determination of total phenolic content and antioxidant capacity of maple syrup using Raman spectroscopy and deep learning. *Food Chemistry*, *463*, 141289.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141289>
- Xu, D., Shang, J., Wang, J., Li, Y., Peng, Y., Li, X., & Zhou, J. (2023a). Effect of hemicellulose content on the solution properties of cellulose carbamates in NaOH/ZnO aqueous system. *International Journal of Biological Macromolecules*, *246*, 125649.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125649>
- Xu, H., Fan, Q., Huang, M., Cui, L., & Gao, Z. (2023b). Combination of carrageenan with sodium alginate, gum arabic, and locust bean gum: Effects on rheological properties and quiescent stabilities of partially crystalline emulsions. *International Journal of Biological Macromolecules*. *International Journal of Biological Macromolecules*.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127561>.
- Yu, S., Blennow, A., Bojko, M., Madsen, F., Olsen, C. E., & Engelsen, S. B. (2002). Physico-chemical Characterization of Floridean Starch of Red Algae. *Starch - Stärke*, *54*(2), 66–74. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200202\)54:2<66::AID-STAR66>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200202)54:2<66::AID-STAR66>3.0.CO;2-B).

Zhao, X., Wang, Y., Chen, X., Yu, X., Li, W., Zhang, S., Meng, X., Zhao, Z.-M., Dong, T., Anderson, A., Aiyedun, A., Li, Y., Webb, E., Wu, Z., Kunc, V., Ragauskas, A., Ozcan, S., & Zhu, H. (2023). Sustainable bioplastics derived from renewable natural resources for food packaging. *Matter*, 6(1), 97–127. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2022.11.006>

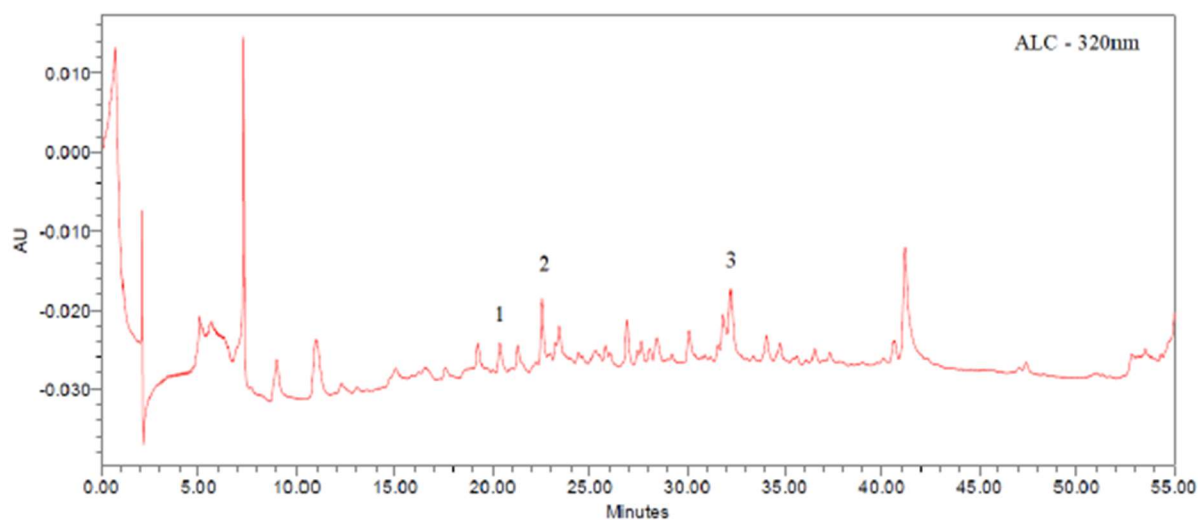
APÊNDICES

Apêndice A - Table Supplementary. Work range, determination coefficients (r^2), the limit of quantification (LOQ), the limit of detection (LOD) of phenolics compounds.

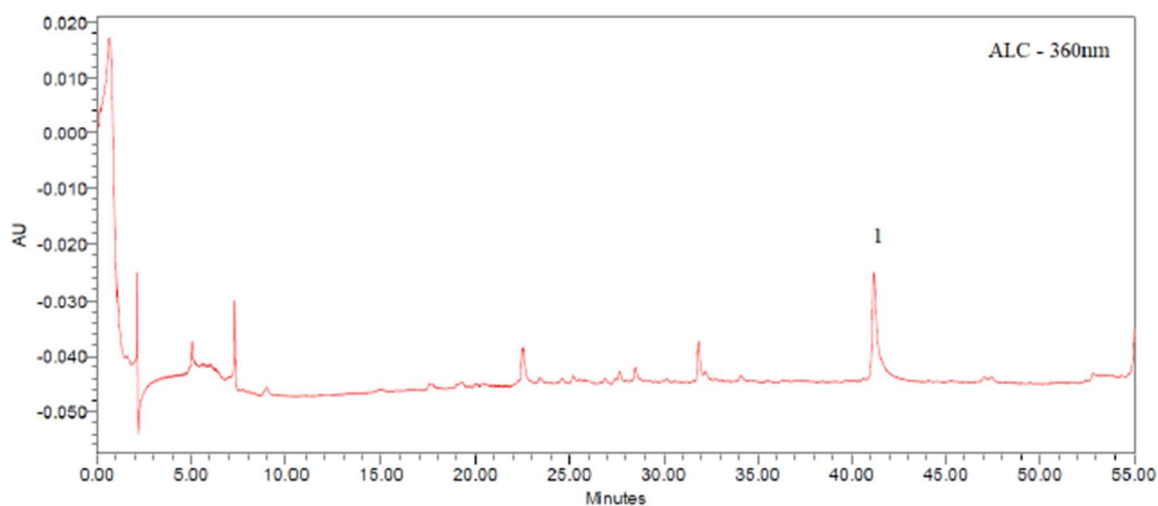
Standards	Work range	r^2	LOD	LOQ
Caffeic acid	0.36 - 12	0.9961	0.97	2.94
Catechin	0.70 – 70	0.9905	1.50	4.53
Chlorogenic acid	0.75 – 24	0.9960	0.77	2.34
Coumaric acid	0.05 – 12	0.9935	0.28	0.86
Epigallocatechin gallate	0.10 – 70	0.9964	0.09	0.26
Ferulic acid	0.05 – 12	0.9940	0.85	2.56
Gallic acid	0.75 – 24	0.9963	0.62	1.87
Hidroxybenzoic acid	0.10 – 20	0.9918	0.30	0.91
Quercetin	0.40 – 50	0.9942	0.71	2.15
Rutin	0.11 – 15	0.9931	0.18	0.54
Vanillic acid	0.10 – 20	0.9968	0.81	2.47

Apêndice B - Cromatogramas do extrato de baru hidroalcoólico a 280, 320 e 360 nm.

Número do pico	Tempo de retenção	Nome do pico
1	10.942	Ácido Gálico
2	22.523	Catequina
3	26.893	Galato de Epicatequina
4	31.452	Ácido p-Cumárico



Número do pico	Tempo de retenção	Nome do pico
1	21.277	Ácido Clorogênico
2	23.425	Ácido Cafeico
3	32.235	Ácido Ferrúlico



Número do pico	Tempo de retenção	Nome do pico
1	41.181	Quercitina

7. CONCLUSÃO DA TESE

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o reaproveitamento da polpa e do endocarpo do baru para aplicação tecnológica em alimentos representa uma abordagem sustentável e inovadora. Os estudos realizados confirmam o potencial industrial e tecnológico desses subprodutos agroindustriais, evidenciando suas propriedades bioativas, antioxidantes e funcionais. A polpa do baru, rica em compostos fenólicos, vitaminas e minerais, se destaca como fonte promissora de ingredientes funcionais para o setor alimentício, enquanto o endocarpo, com alta composição lignocelulósica, demonstra ser uma excelente matéria-prima para a produção de micro e nanofibrilas aplicadas em filmes biodegradáveis ativos.

A produção de filmes com atividade antioxidante, utilizando esses subprodutos, reforça a importância do desenvolvimento de tecnologias ecoeficientes e sustentáveis que agreguem valor a resíduos agroindustriais. A valorização do baru não apenas contribui para a geração de renda e a mitigação dos impactos ambientais, mas também promove a diversificação de matérias-primas e o fortalecimento da sustentabilidade na cadeia produtiva de alimentos.

Portanto, é essencial que futuras pesquisas continuem a explorar e aprimorar as aplicações tecnológicas do baru, promovendo o seu potencial comercial e aplicabilidade na ciência e tecnologia de alimentos. A presente tese conspira a favor do avanço do conhecimento científico, fornecendo bases para o desenvolvimento de novos produtos e processos inovadores, alinhados com as demandas de um mercado que valoriza práticas sustentáveis e produtos com menor impacto ambiental. Assim, o aproveitamento integral do baru reafirma seu valor como recurso sustentável e comercialmente viável, que pode desempenhar um papel relevante na preservação ambiental e no desenvolvimento de uma economia mais sustentável.

8. PERSPECTIVAS E SUGESTÃO PARA FUTURAS PESQUISAS

Para o avanço e consolidação do uso de subprodutos do baru em aplicações tecnológicas, algumas frentes de pesquisa se mostram promissoras:

1. **Eficiência Energética na Produção de Micro/Nanofibrilas:** dado o alto consumo de energia envolvido no processo de obtenção de micro/nanofibrilas, é recomendada a incorporação de fontes alternativas de energia, como painéis solares, para reduzir o impacto energético e tornar o processo mais sustentável.
2. **Alternativas Verdes para Extração de Compostos Bioativos:** a substituição de solventes convencionais por alternativas verdes, como solventes eutéticos, deve ser explorada tanto no isolamento da celulose quanto na extração de compostos bioativos, visando minimizar o uso de solventes e promover práticas mais sustentáveis.
3. **Aplicação do Filme ACE6 como Revestimento Antioxidante:** testes adicionais são recomendados para avaliar o desempenho do filme ACE6 como revestimento antioxidante para frutas, como o pequi, que apresenta alta susceptibilidade à oxidação quando armazenado "in natura". Essa aplicação pode expandir o uso do filme, agregando valor ao mercado de embalagens ativas.
4. **Escalabilidade do Gel LCMNF para Processos Industriais:** considerando a estabilidade térmica do gel LCMNF, sua aplicação em processos industriais, como a moldagem por extrusão, deve ser investigada. Esse tipo de processamento em larga escala pode viabilizar o uso comercial dos filmes de baru, atendendo às exigências industriais de resistência e durabilidade.

Essas e outras pesquisas são incentivadas para ampliar o valor agregado dos resíduos do baru, transformando-os em co-produtos valiosos e relevantes para a indústria. A exploração dos compostos bioativos e das propriedades tecnológicas desses subprodutos agroindustriais oferece novas oportunidades para setores que buscam matéria-prima sustentável, promovendo um modelo de produção mais verde e alinhado com os princípios de economia circular.