

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS

DAIANA ALVES MACHADO

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E OTIMIZAÇÃO DE EXTRAÇÃO DE
COMPOSTOS BIOATIVOS DE BUTIÁ (*Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc.)
ASSISTIDA POR ULTRASSOM UTILIZANDO SOLVENTE EUTÉTICO PROFUNDO
NATURAL

PONTA GROSSA
2025

DAIANA ALVES MACHADO

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E OTIMIZAÇÃO DE EXTRAÇÃO DE
COMPOSTOS BIOATIVOS DE BUTIÁ (*Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc.)
ASSISTIDA POR ULTRASSOM UTILIZANDO SOLVENTE EUTÉTICO PROFUNDO
NATURAL

Dissertação apresentada para obtenção
do título de Mestra em Ciência e
Tecnologia de Alimentos no Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia
de Alimentos da Universidade Estadual de
Ponta Grossa.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Renata Dinnies
Santos Salem

PONTA GROSSA

2025

M149 Machado, Daiana Alves

Caracterização físico-química e otimização de extração de compostos bioativos de *Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc. assistida por ultrassom utilizando solvente eutético profundo natural / Daiana Alves Machado. Ponta Grossa, 2025.

93 f.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Área de Concentração: Ciências e Tecnologia de Alimentos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Renata Dinnies Santos Salem.

1. Arecaceae. 2. Solventes Eutéticos Profundos Naturais (NADES). 3. *Butia eriospatha*. 4. Frutas nativas. 5. Antioxidantes. I. Salem, Renata Dinnies Santos. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ciências e Tecnologia de Alimentos. III.T.

CDD: 664

TERMO DE APROVAÇÃO

DAIANA ALVES MACHADO

“Caracterização físico-química e otimização de extração de compostos bioativos de butiá (*Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc.) assistida por ultrassom utilizando solvente eutético profundo natural”

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de Mestre(a) no Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Profa. Dra. Renata Dinnies Santos Salem - UEPG-PR

Documento assinado digitalmente
 **RENATA DINNIES SANTOS SALEM**
Data: 05/12/2025 11:06:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Renata Dinnies Santos Salem - UEPG-PR - Presidente

Documento assinado digitalmente
 **MICHELE ROSSET**
Data: 05/12/2025 11:54:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Michele Rosset - IF-PR - Membro Titular Externo

Documento assinado digitalmente
 **ALESSANDRO NOGUEIRA**
Data: 05/12/2025 11:13:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alessandro Nogueira - UEPG-PR - Membro Titular Interno

Ponta Grossa, 05 de dezembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jair Alves Machado e Dulce Massaneiro Alves Machado, por todo o amor, apoio e paciência em cada etapa da minha vida.

À minha irmã, Larissa Alves Machado, pela paciência, amor, cumplicidade e apoio essenciais durante esta jornada.

À minha gata Blue Black Birdle, por todo suporte emocional.

Aos meus avós, João Massaneiro e Lúcia Massaneiro, por todo o amor e pelas bênçãos sempre direcionadas a mim.

Aos demais membros da família, pelo constante apoio e torcida.

Aos meus colegas Josiéli de Oliveira dos Santos Veiga e João Vítor Tischler Nizer, pela parceria e pelo suporte nas idas a Ponta Grossa (PR).

Aos meus colegas de trabalho, pelo auxílio nas dificuldades e por celebrarem comigo cada conquista.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Renata Dinnies Santos Salem, pela confiança, orientação, paciência e por todos os conhecimentos compartilhados.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, à Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, pela oportunidade, infraestrutura e suporte ao longo do mestrado.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Canoinhas, pela disponibilidade de espaço para o desenvolvimento da pesquisa, pelo apoio e pelas oportunidades fundamentais na minha trajetória profissional e acadêmica.

Aos meus amigos, pelo incentivo, carinho e parceria em todos os momentos.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram e apoiaram minhas conquistas, o meu sincero agradecimento.

“Quando se entristecer ou se
acovardar, lembre-se que o
fluxo do tempo nunca para.”

Kyojuro Rengoku

RESUMO

Butia eriospatha (Mart. ex Drude) Becc. é uma palmeira nativa do sul do Brasil cujos frutos se destacam pelo sabor característico e pela elevada concentração de compostos bioativos, como fenólicos, flavonoides, carotenoides e ácido ascórbico. Em um cenário de crescente interesse por ingredientes naturais e processos sustentáveis, solventes eutéticos profundos naturais (NADES) aliados à extração assistida por ultrassom (UAE) têm se consolidado como alternativas promissoras aos solventes orgânicos convencionais. Este trabalho teve como objetivo caracterizar físico-quimicamente e otimizar a extração de compostos bioativos da polpa e casca de *B. eriospatha* utilizando NADES e ultrassom. Frutos maduros foram coletados em Canoinhas (SC), selecionados, despulpados e divididos em amostras *in natura*, destinadas à caracterização físico-química, e amostras desidratadas (60 °C/≈15 h), trituradas e padronizadas a 60 *mesh* para testes preliminares e extrações. As análises incluíram pH, sólidos solúveis totais, acidez, cor e composição centesimal. A extração foi conduzida com planejamentos Box–Behnken e fatorial 3². Os extratos foram avaliados quanto aos teores de compostos fenólicos totais (CFT), flavonoides totais (FT), carotenoides totais (CT) e ácido ascórbico (AA), além da atividade antioxidante (DPPH, ABTS e FRAP). Modelos quadráticos foram ajustados e aplicados na otimização por desejabilidade. O extrato otimizado também foi avaliado quanto à estabilidade térmica (60–80 °C/120 min) e fotoquímica (0–96 h). Os frutos apresentaram características típicas da espécie: massa média entre 8,19 e 9,36 g, rendimento de polpa próximo de 60%, sólidos solúveis entre 11,3–11,8 °Brix, acidez de 1,01 g/100 g e pH de 3,74, além de composição centesimal marcada por alta umidade (85,9%), carboidratos (9,75%) e fibras (2,15%). Nos testes preliminares, o NADES ChCl–Gly (1:2) extraiu cerca do dobro de FT (8,85 mg QE/g) em relação aos NADES ácidos, sendo selecionado para as etapas seguintes. No planejamento fatorial, o sistema NADES–UAE apresentou teores de CFT entre 122,97 e 166,45 mg GAE/g, FT entre 5,20 e 8,32 mg QE/g, CT entre 32,48 e 93,48 mg β-caroteno/100 g e AA entre 4,30 e 5,47 mg/100 g, superando ou igualando o etanol 50% (v/v). A atividade antioxidante atingiu até 114,59 mg TE/g (DPPH), 141,47 mg TE/g (ABTS) e 1013,48 mg TE/g (FRAP), demonstrando extração eficiente de compostos hidrofílicos e lipofílicos. As condições otimizadas (41 °C e 60 min) apresentaram alta desejabilidade global e forte concordância entre valores preditos e experimentais. O extrato otimizado manteve CFT praticamente constante ($CFT/CFT_0 \approx 1,0$) após aquecimento a 60–80 °C por 120 min e exposição contínua à luz por até 96 h, indicando excelente estabilidade térmica e fotoquímica. Essa resistência sugere a atuação do NADES como meio estabilizante, preservando a integridade química dos fenólicos. Os resultados demonstram que a combinação NADES ChCl–Gly/UAE constitui estratégia eficiente, ambientalmente segura e tecnicamente viável para a extração e estabilização de compostos bioativos de *B. eriospatha*. A elevada eficiência extrativa, a estabilidade dos extratos e o uso de solvente biodegradável reforçam o potencial da espécie como fonte de ingredientes funcionais e evidenciam a relevância de tecnologias alinhadas à química verde e à valorização de frutíferas nativas.

Palavras-chave: Arecaceae; NADES; butiá-da-serra; frutas nativas; antioxidantes.

ABSTRACT

Butia eriospatha (Mart. ex Drude) Becc. is a palm species native to southern Brazil whose fruits stand out for their characteristic flavor and high concentrations of bioactive compounds, such as phenolics, flavonoids, carotenoids, and ascorbic acid. In the context of increasing interest in natural ingredients and sustainable processes, natural deep eutectic solvents (NADES) combined with ultrasound-assisted extraction (UAE) have emerged as promising alternatives to conventional organic solvents. This study aimed to perform physicochemical characterization and optimize the extraction of bioactive compounds from the pulp and peel of *B. eriospatha* using NADES and ultrasound. Ripe fruits were collected in Canoinhas (SC), selected, depulped, and divided into fresh samples for physicochemical characterization and dehydrated samples (60 °C/≈15 h), ground and standardized to 60 mesh for preliminary tests and subsequent extractions. Analyses included pH, total soluble solids, titratable acidity, color, and proximate composition. Extraction was conducted using Box–Behnken and 3² factorial designs. Extracts were evaluated for total phenolic content (TPC), total flavonoids (TF), total carotenoids (TC), and ascorbic acid (AA), as well as antioxidant activity (DPPH, ABTS, and FRAP). Quadratic models were fitted and applied to optimization through the desirability function. The optimized extract was also assessed for thermal (60–80 °C/120 min) and photochemical stability (0–96 h). The fruits showed typical characteristics of the species: average weight of 8.19–9.36 g, pulp yield of approximately 60%, total soluble solids of 11.3–11.8 °Brix, titratable acidity of 1.01 g/100 g, pH of 3.74, and proximate composition marked by high moisture (85.9%), carbohydrates (9.75%), and fiber (2.15%). In preliminary tests, the NADES ChCl–Gly (1:2) extracted about twice as many flavonoids compared to acidic NADES (8.85 mg QE/g), thus being selected for subsequent stages. In the factorial design, the NADES–UAE system yielded TPC values ranging from 122.97 to 166.45 mg GAE/g, TF from 5.20 to 8.32 mg QE/g, TC from 32.48 to 93.48 mg β-carotene/100 g, and AA from 4.30 to 5.47 mg/100 g, outperforming or equaling 50% ethanol (v/v). Antioxidant activity reached up to 114.59 mg TE/g (DPPH), 141.47 mg TE/g (ABTS), and 1013.48 mg TE/g (FRAP), indicating efficient extraction of both hydrophilic and lipophilic compounds. The optimized conditions (41 °C and 60 min) resulted in high overall desirability and strong agreement between predicted and experimental values. The optimized extract maintained nearly constant TPC ($TPC/TPC_0 \approx 1.0$) after heating at 60–80 °C for 120 min and continuous light exposure for up to 96 h, indicating excellent thermal and photochemical stability. This resistance suggests that the NADES acts as a stabilizing medium, preserving the chemical integrity of phenolics. Overall, the results demonstrate that the NADES ChCl–Gly/UAE system is an efficient, environmentally safe, and technically feasible strategy for extracting and stabilizing bioactive compounds from *B. eriospatha*. The high extraction efficiency, extract stability, and use of a biodegradable solvent reinforce the species' potential as a natural source of functional ingredients and highlight the relevance of technologies aligned with green chemistry and the valorization of native fruit species.

Keywords: Arecaceae; NADES; sour coconut; native fruits; antioxidants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Palmeira de <i>Butia eriospatha</i> (Mart. ex Drude) Becc.	15
Figura 2 - Frutos de butiá em diferentes estádios de maturação.	16
Figura 3 - Classificação morfológica das camadas do fruto de butiá.	17
Figura 4 - Número de artigos publicados sobre extração de compostos bioativos assistida por ultrassom entre 2015 e 2025.....	22
Figura 5 - HBAs e HBDs usados em formulações de DES.	23
Figura 6 - Número de artigos publicados sobre extração de compostos bioativos utilizando NADES entre 2015 e 2025.....	26
Figura 7 - Número de artigos publicados sobre extração de compostos bioativos assistida por ultrassom utilizando NADES entre 2015 e 2025.	27
Figura 8 - Fluxograma das etapas experimentais.	31
Figura 9 – Etapas do processamento do butiá para obtenção da polpa com casca e da farinha.	32
Figura 10 - Temperatura e precipitação diárias registradas em Canoinhas, SC, entre dezembro de 2023 e fevereiro de 2024, comparadas às médias históricas.....	46
Figura 11 - Aspecto visual dos extratos de <i>Butia eriospatha</i>	62
Figura 12 - Superfícies de resposta e gráficos de contorno no ponto ótimo de extração de compostos bioativos de <i>Butia eriospatha</i>	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – NADES testados para avaliação de eficiência de extração de compostos bioativos de butiá.	35
Tabela 2 – Planejamento Box-Behnken aplicado para a extração de compostos bioativos de <i>Butia eriospatha</i>	36
Tabela 3 – Planejamento fatorial 3 ² aplicado para a otimização da extração de compostos bioativos de <i>Butia eriospatha</i>	37
Tabela 4 – Caracterização física e química de frutos de butiá por palmeira.	47
Tabela 5 – Parâmetros colorimétricos dos frutos e polpas de butiá por palmeira.....	50
Tabela 6 – Rendimento e perda de massa (<i>Yield</i>) dos frutos de <i>Butia eriospatha</i> por palmeira e nas etapas de processamento.....	52
Tabela 7 – Composição centesimal de polpa e casca de <i>Butia eriospatha</i> em base úmida.	54
Tabela 8 – Concentração de flavonoides totais em extratos de butiá obtidos com diferentes NADES.	56
Tabela 9 – Concentração de compostos bioativos em extratos de <i>Butia eriospatha</i> obtidos no planejamento Box-Behnken.....	58
Tabela 10 – Concentração de compostos bioativos e atividade antioxidante em extratos de <i>Butia eriospatha</i> obtidos com NADES e etanol.	60
Tabela 11 - Coeficientes de regressão significativos dos modelos ajustados para as variáveis dependentes.	66
Tabela 12 – Comparação entre valores preditos e experimentais de compostos bioativos e atividade antioxidante em extratos otimizados de <i>Butia eriospatha</i> , considerando as respostas individuais.....	67
Tabela 13 – Comparação entre valores preditos e experimentais de compostos bioativos e atividade antioxidante em extratos otimizados de <i>Butia eriospatha</i> , considerando a resposta global.....	68
Tabela 14 – Teor de compostos fenólicos totais (CFT) do extrato obtido nas condições ótimas de extração, após aquecimento em diferentes temperaturas e tempos de exposição.	71
Tabela 15 – Parâmetros cinéticos e termodinâmicos da degradação térmica dos compostos fenólicos totais entre 60 e 80 °C.	72

Tabela 16 – Teor de compostos fenólicos totais (CFT) do extrato obtido nas condições ótimas de extração, após exposição à luz, em diferentes tempos de armazenamento.

.....74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	<i>Butia eriospatha</i> (Mart. ex Drude) Becc.	14
3.2	COMPOSTOS BIOATIVOS	18
3.3	EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM (UAE)	20
3.4	SOLVENTES EUTÉTICOS PROFUNDOS NATURAIS (NADES)	22
3.5	APLICAÇÃO COMBINADA DE NADES E ULTRASSOM NA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1	MATERIAIS	30
4.2	MÉTODOS	30
4.2.1	Obtenção Da Polpa Com Casca E Da Farinha De Butiá	31
4.2.2	Caracterização Físico-Química Dos Frutos	33
4.2.2.1	Massa e diâmetro	33
4.2.2.2	Sólidos solúveis totais (SST), pH e acidez total titulável (ATT)	33
4.2.3	Análise Colorimétrica	33
4.2.4	Composição Centesimal	34
4.2.5	Obtenção Dos Extratos E Análise De Compostos Bioativos	34
4.2.5.1	Síntese do solvente eutético profundo natural (NADES)	34
4.2.5.2	Preparo dos extratos	35
4.2.5.3	Planejamentos experimentais	35
4.2.5.4	Flavonoides totais (FT)	38
4.2.5.5	Compostos fenólicos totais (CFT)	39
4.2.5.6	Atividade antioxidante	39
4.2.5.7	Carotenoides totais (CT)	40
4.2.5.8	Ácido ascórbico (AA)	41
4.2.6	Estabilidade Dos Extratos	41
4.2.6.1	Estabilidade térmica	41

4.2.6.2	Estabilidade fotoquímica.....	43
4.2.7	Análise Estatística	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E CENTESIMAL DOS FRUTOS	45
5.2	TESTES PRELIMINARES E SELEÇÃO DO NADES	56
5.3	CARACTERIZAÇÃO BIOATIVA DOS EXTRATOS	57
5.4	OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO	65
5.5	ESTABILIDADE DOS EXTRATOS OTIMIZADOS	70
6	CONCLUSÃO.....	76
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Butia eriospatha (Mart. ex Drude) Becc. é uma palmeira nativa do sul da América do Sul, amplamente distribuída na região Sul do Brasil e considerada espécie emblemática dos butiazais. Seus frutos, de coloração amarelo-alaranjada e polpa carnosa e levemente ácida, são consumidos *in natura* e utilizados na produção de sucos, geleias, licores, doces artesanais, polpas congeladas e sorvetes. Além do valor sensorial, o butiá possui forte relevância cultural e histórica, integrando práticas alimentares tradicionais e compondo a identidade paisagística de diversas comunidades sulistas.

Do ponto de vista nutricional, destaca-se pela riqueza em compostos bioativos, como fenólicos, flavonoides, carotenoides e ácido ascórbico, metabólitos associados à proteção contra estresse oxidativo, doenças degenerativas e fortalecimento da resposta imunológica. Esse perfil químico diversificado torna o fruto uma matriz promissora para aplicações nutracêuticas e no desenvolvimento de produtos com propriedades funcionais.

Diante desse potencial, torna-se essencial empregar métodos de extração eficientes e sustentáveis. A busca por alternativas aos solventes orgânicos convencionais tem impulsionado técnicas capazes de maximizar o rendimento, reduzir resíduos e minimizar impactos ambientais. Nesse contexto, a extração assistida por ultrassom (UAE) se destaca por acelerar a liberação dos compostos intracelulares por meio da cavitação acústica.

A eficiência da UAE pode ser ampliada pelo uso de solventes eutéticos profundos naturais (NADES), que apresentam baixo custo, biodegradabilidade e propriedades ajustáveis, configurando alternativas verdes aos solventes tradicionais. Embora o uso conjunto de NADES e ultrassom seja recente, essa combinação tem apresentado resultados promissores para a extração seletiva de metabólitos de interesse.

Diante desse contexto, o objetivo geral deste trabalho foi realizar a caracterização físico-química e otimizar a extração de compostos bioativos de *Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc. assistida por ultrassom utilizando solvente eutético profundo natural.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a caracterização físico-química e otimizar a extração de compostos bioativos da polpa e da casca de *Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc. assistida por ultrassom utilizando solvente eutético profundo natural (NADES).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o butiá quanto à composição físico-química.
- Otimizar as condições de extração de compostos bioativos por ultrassom e com NADES, utilizando a metodologia de superfície de resposta.
- Quantificar o teor de compostos fenólicos totais, carotenoides totais, flavonoides totais e ácido ascórbico dos extratos.
- Avaliar a atividade antioxidante dos extratos por meio da captura dos radicais DPPH e ABTS e da redução do ferro (FRAP).
- Investigar a estabilidade térmica e fotoquímica dos extratos obtidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc.

O gênero *Butia* Becc. pertence à família Arecaceae e reúne 20 espécies nativas do sul da América do Sul, distribuídas entre Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai. Entre elas, destacam-se: *Butia archeri* (Glassman) Glassman, *B. campicola* (Barb. Rodr.) Noblick, *B. capitata* (Mart.) Becc., *B. catarinensis* Noblick & Lorenzi, *B. eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc., *B. exilata* Deble & Marchiori, *B. exospadix* Noblick, *B. lallemantii* Deble & Marchiori, *B. leiospatha* (Barb. Rodr.) Becc., *B. lepidotispatha* Noblick & Lorenzi, *B. leptospatha* (Burret) Noblick, *B. marmorii* Noblick, *B. matogrossensis* Noblick & Lorenzi, *B. microspadix* Burret, *B. odorata* (Barb. Rodr.) Noblick & Lorenzi, *B. paraguayensis* (Barb. Rodr.) Bailey, *B. pubispatha* Noblick & Lorenzi, *B. purpurascens* Glassman, *B. witeckii* K. Soares & S. Longhi e *B. yatay* (Mart.) Becc. (Deble *et al.*, 2011; Leitman *et al.*, 2015; Lorenzi *et al.*, 2010; Noblick, 2011; Soares; Longhi, 2011).

No Brasil, 18 dessas espécies ocorrem espontaneamente, com distribuição no sudeste da Bahia, leste de Goiás e nos estados da região Sul, sendo o Rio Grande do Sul o principal centro de ocorrência (Hoffmann *et al.*, 2014).

Butia eriospatha (Mart. ex Drude) Becc. (Figura 1) é uma palmeira de caule simples e ereto, cuja base das bainhas foliares é parcialmente recoberta por um tomento marrom, formado por fibras finas e densas. Os exemplares podem alcançar até 7 metros de altura e cerca de 70 centímetros de diâmetro à altura do peito (DAP) quando adultos. Possui folhas pinadas e arqueadas, de coloração verde-acinzentada, com pecíolos armados de espinhos formados por fibras rígidas e achatadas. Suas inflorescências são amarelas, ramificadas e podem conter até 150 ramos (Carvalho, 2014). O butiazeiro pode produzir dez ou mais cachos de frutos por planta (Kinupp, 2014), alcançando produtividade de até 29 quilos de frutos por árvore, mesmo sem manejo agrícola (Pinto, 2019).

Figura 1 - Palmeira de *Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc.



Fonte: A autora.

Nota: A planta observada no caule não constitui uma característica morfológica da espécie, tratando-se de uma epífita, que utiliza o tronco da palmeira como suporte e se desenvolve em ambientes úmidos.

Além disso, *B. eriospatha* é considerada uma espécie símbolo da paisagem sul-brasileira, compondo formações conhecidas como butiazais, que desempenham papel ecológico fundamental como abrigo e fonte alimentar para aves, insetos e mamíferos nativos. Esses ambientes também são reconhecidos por sua elevada heterogeneidade estrutural e pela criação de micro-habitats que favorecem o estabelecimento de outras espécies vegetais, contribuindo para a estabilidade ecológica e aumentando a resiliência ambiental. Em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, os butiazais têm sido identificados como áreas prioritárias para conservação devido à sua relevância biológica, cultural e paisagística (Nazareno; Reis, 2013; Eslabão *et al.*, 2022).

A palmeira também possui valor histórico e cultural relevante, estando presente na culinária, no extrativismo familiar e em festividades regionais, como eventos gastronômicos, rotas turísticas e feiras de produtos derivados do butiá, que promovem a valorização da sociobiodiversidade local. Povos indígenas e comunidades tradicionais já utilizavam o fruto, suas sementes e fibras muito antes da colonização, incorporando-o em práticas alimentares, artesanato e usos domésticos (Rivas; Barbieri, 2018; Wagner *et al.*, 2022b; Eslabão *et al.*, 2022).

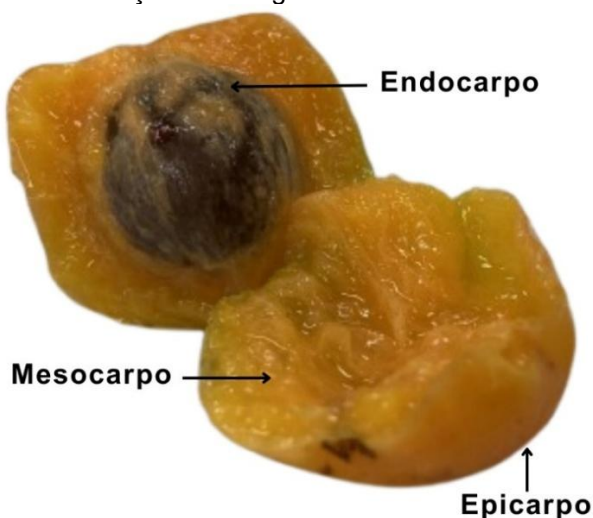
Os frutos do butiazeiro são ovóides a globosos, de coloração amarelada-alaranjada, com polpa carnosa, suculenta, doce e ácida, podendo ser consumidos *in natura* ou utilizados na produção de sucos, licores, geleias e sorvetes (Figura 2). A polpa (mesocarpo) representa entre 64 e 71% do fruto, sendo o restante composto pelo coquinho (endocarpo) que protege a semente e pela película externa (epicarpo) (Figura 3). As sementes variam entre 1 e 8% da massa total do fruto e cada fruto pode conter de uma a três sementes (Rivas; Barbieri, 2018). O butiá apresenta comportamento respiratório não-climatérico e sua colheita é predominantemente manual. Por possuir vida pós-colheita reduzida, a colheita ocorre no estágio amarelo-esverdeado, seguida de armazenamento imediato a 0 °C para preservação da textura e prevenção da podridão (Amarante; Megguer, 2008; Hoffmann *et al.*, 2014).

Figura 2 - Frutos de butiá em diferentes estádios de maturação.



Fonte: A autora.

Figura 3 - Classificação morfológica das camadas do fruto de butiá.



Fonte: A autora.

Quanto às características físico-químicas, o fruto apresenta pH entre 2,88 e 3,49, sólidos solúveis totais de 9,20 a 15,96 °Brix e acidez total titulável entre 1,07 e 2,26% (m/m) de ácido cítrico (Beskow *et al.*, 2015; Ferrão *et al.*, 2013; Hoffmann *et al.*, 2017; Wagner *et al.*, 2022a). A polpa é rica em minerais como cálcio, potássio, fósforo, manganês, enxofre, ferro, magnésio, sódio, alumínio, cobre e zinco, além de ser fonte de provitamina A e vitamina C (Hoffmann *et al.*, 2014).

O butiá é amplamente reconhecido por seu alto teor de compostos fenólicos, antioxidantes, carotenoides, ácido ascórbico e flavonoides, incluindo ácido gálico, ácido ferúlico, ácido oxálico, epicatequina, quercetina, licopeno, luteína e zeaxantina (Hoffmann *et al.*, 2014; Beskow *et al.*, 2015; Denardin *et al.*, 2015; Hoffmann *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2022; Wagner *et al.*, 2022a). Esses metabólitos conferem elevada capacidade antioxidante e potenciais efeitos anti-inflamatórios, cardioprotetores e hepatoprotetores ao fruto, reforçando seu interesse funcional (Denardin *et al.*, 2015; Rodrigues *et al.*, 2022; Wagner *et al.*, 2022a).

Além disso, o butiá apresenta expressiva variabilidade morfológica e fitoquímica entre populações, evidenciada por diferenças no tamanho do fruto, na espessura da polpa, no rendimento de mesocarpo e nos teores de carotenoides e compostos fenólicos. Essa heterogeneidade também se reflete no perfil aromático, que pode variar em intensidade e composição. Em conjunto, essas características ampliam o potencial tecnológico da espécie, favorecendo o desenvolvimento de produtos com propriedades sensoriais e funcionais diferenciadas e reforçando a importância de conservar múltiplas populações naturais para preservar sua

diversidade genética (Wagner *et al.*, 2022a; Zaccari Veiga *et al.*, 2021; Hoffmann *et al.*, 2017).

Apesar de sua ampla importância ecológica e socioeconômica, *Butia eriospatha* encontra-se em expressivo risco de extinção. A expansão agropecuária, a fragmentação dos butiazais, o corte de indivíduos adultos e a baixa regeneração natural contribuem para o declínio populacional da espécie. Estudos apontam populações envelhecidas e de elevada diferenciação genética entre fragmentos, indicando vulnerabilidade e potencial redução drástica ao longo das próximas décadas (Nazareno; Reis, 2013; Eslabão *et al.*, 2022; Azambuja *et al.*, 2024). Em 2022, a espécie foi oficialmente incluída na Lista Nacional de Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção pela Portaria MMA nº 148, de 7 de junho de 2022 (Brasil, 2022), reforçando a urgência de estratégias de conservação.

A degradação desses ecossistemas compromete não apenas a produção dos frutos, mas também a biodiversidade associada, uma vez que os butiazais funcionam como habitats essenciais para diversas espécies da fauna (Azambuja *et al.*, 2024). A valorização científica e econômica do butiá, aliada a práticas extrativistas sustentáveis e ao fortalecimento de cadeias produtivas locais, constitui estratégia fundamental para a proteção da espécie e de seu ecossistema (Eslabão *et al.*, 2022).

Além de sua relevância ecológica e conservacionista, o butiá também apresenta perfil químico diversificado que amplia seu potencial de uso e reforça a importância de sua preservação. A combinação dos metabólitos especializados presentes no fruto resulta em elevada capacidade antioxidante e em efeitos fisiológicos benéficos, como a modulação do estresse oxidativo, contribuindo para reduzir o risco de doenças crônicas (Carvalho; Conte-Júnior, 2021).

Essa versatilidade tem impulsionado o interesse por seus frutos nas indústrias alimentícias, nutracêuticas e cosméticas, especialmente diante da crescente demanda por ingredientes naturais e sustentáveis. Nesse contexto, a valorização de frutos nativos como o butiá assume papel estratégico tanto para a inovação quanto para o fortalecimento da biodiversidade e das cadeias produtivas regionais.

3.2 COMPOSTOS BIOATIVOS

O sistema biológico das plantas é composto por metabólitos primários e secundários. Os metabólitos primários estão diretamente envolvidos nos processos

de crescimento e desenvolvimento vegetal e incluem carboidratos, proteínas e aminoácidos. Já os metabólitos secundários são produzidos em resposta a estímulos ambientais, contribuindo para a defesa contra estresses bióticos e abióticos (Azmir *et al.*, 2013).

Dentre os compostos bioativos mais conhecidos e estudados quanto aos seus efeitos benéficos à saúde estão os antioxidantes, compostos fenólicos, flavonoides e carotenoides (Zhang *et al.*, 2016; Jha; Sit, 2022).

Os antioxidantes são substâncias capazes de capturar ou neutralizar os radicais livres, reduzindo os danos oxidativos às células e moléculas (Niki, 2014; Kurutas, 2016). Os radicais livres são moléculas instáveis e altamente reativas, com número ímpar de elétrons na camada de valência. Em excesso, essas moléculas podem atacar as membranas celulares, proteínas e ácidos nucleicos, contribuindo para o envelhecimento precoce, desenvolvimento de doenças crônicas e até carcinogênese (Zaric; Macvanin; Isenovic, 2023; Halliwell, 2024). Os antioxidantes estabilizam essas moléculas doando elétrons, reduzindo sua reatividade (Flieger *et al.*, 2021). Também podem estimular os sistemas antioxidantes endógenos, fortalecendo a defesa celular (Hu *et al.*, 2024).

Entre os antioxidantes naturais mais conhecidos está o ácido ascórbico, ou vitamina C. Essa vitamina hidrossolúvel é abundante nas frutas cítricas e atua doando elétrons a radicais livres, participando de reações de oxirredução (Cárcamo *et al.*, 2004; Hunyadi, 2019). Além de sua função antioxidante, auxilia na absorção de ferro (Du; Cullen; Buettner, 2012), manutenção da rede de colágeno (Minor *et al.*, 2013), fortalecimento do sistema imunológico (Moser; Chun, 2016), prevenção do envelhecimento celular e câncer (Valko *et al.*, 2016), além de atuar na regulação gênica (Carr; Maggini, 2017) e na prevenção da aterosclerose (Schoenfeld *et al.*, 2018; Doseděl *et al.*, 2021; Basak; Shaik; Chakraborty, 2023). A demanda por alimentos ricos em vitamina C e antioxidantes tem crescido, acompanhando a tendência do consumidor por dietas mais saudáveis (Valero-Mendoza *et al.*, 2023).

Os compostos fenólicos e flavonoides são derivados das vias do ácido chiquímico e do fenilpropanoide e/ou da via do acetato-malonato, resultando em fenóis simples, polifenóis e flavonoides (Sim; Ong; Nyam, 2019). Essas substâncias possuem estrutura molecular com anéis aromáticos e grupos hidroxila que lhes conferem alta capacidade antioxidante, sendo capazes de quelar íons metálicos, interromper cadeias de oxidação e proteger contra o estresse oxidativo (Pereira *et al.*,

2013). Estudos clínicos e epidemiológicos demonstraram que os compostos fenólicos podem reduzir a incidência de doenças crônicas, diabetes e distúrbios cardiovasculares (Yigit; Yigit; Mavi, 2009; Carvalho; Conte-Júnior, 2021; Moraes *et al.*, 2022; Halliwell, 2024). Já os flavonoides apresentam, além da ação antioxidante, efeitos antimicrobianos (Sim; Ong; Nyam, 2009; Carvalho; Conte-Júnior, 2021; Flieger *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2024).

Os carotenoides são pigmentos naturais pertencentes ao grupo dos terpenoides, produzidos por plantas, alguns microrganismos e artrópodes. Como os seres humanos não sintetizam esses compostos, é necessário ingeri-los por meio da alimentação (Rodriguez-Concepcion *et al.*, 2018). A literatura científica descreve mais de 750 tipos de carotenoides com estruturas químicas e propriedades distintas, predominando as colorações amarela, laranja e vermelha (Arathi *et al.*, 2015). Esses compostos têm despertado grande interesse da ciência e da indústria devido aos seus efeitos benéficos à saúde, como ação antioxidante, atividade provitamina A, propriedades anticancerígenas e potencial antiobesidade (Da Costa; Mercadante, 2018; Das; Nayak; Kesavan, 2022).

3.3 EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM (UAE)

A busca por métodos de extração mais eficientes e eficazes tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas modernas, como a extração assistida por ultrassom, que se destacam por reduzir o uso de solventes orgânicos tóxicos e o tempo de processamento (Da Silva *et al.*, 2022). Essa técnica é reconhecida como um método verde, pois diminui o consumo de solventes e de energia, além de reduzir a geração de resíduos e a poluição ambiental, mantendo altos rendimentos de extração (Daud *et al.*, 2022).

Além dos benefícios ambientais, a extração assistida por ultrassom contribui para a preservação dos compostos presentes na amostra devido aos efeitos da cavitação acústica, que promovem a ruptura celular e facilitam a liberação dos analitos de interesse, aumentando a eficiência do processo sem exigir temperaturas elevadas. Dessa forma, a técnica tende a preservar melhor compostos sensíveis em comparação aos métodos convencionais (Jha; Sit, 2022), o que a torna particularmente promissora para a obtenção de compostos bioativos em diferentes matrizes vegetais.

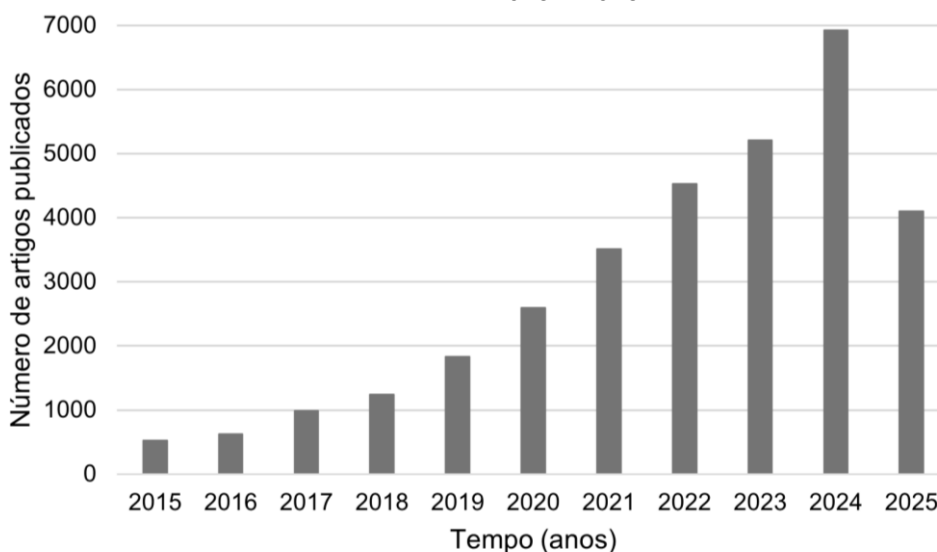
Essa técnica utiliza ondas sonoras de 20 kHz a 100 kHz, baseando-se no princípio da cavitação acústica. Nesse processo, a propagação de ondas ultrassônicas gera a formação de bolhas de gás e vapor em meio líquido, por meio de variações sequenciais de pressão. As bolhas permanecem estáveis até que a pressão interna ultrapasse sua tensão superficial, levando à sua expansão e colapso. O rompimento violento dessas bolhas resulta em temperaturas de até 5000 K e pressões de até 1000 atm (Patist; Bates, 2008), promovendo danos às paredes celulares, redução do tamanho das partículas e melhora na transferência de massa. As fissuras geradas nas paredes celulares aumentam a permeabilidade dos tecidos vegetais, facilitando a penetração do solvente e, conseqüentemente, a extração dos compostos desejados (Jha; Sit, 2022; Fernandes; Rodrigues, 2023).

Os equipamentos mais comuns utilizados para essa técnica são o banho ultrassônico e ultrassom com sonda. O banho ultrassônico é considerado um sistema mais simples, no qual transdutores instalados na base geram ondas ultrassônicas que se propagam pelo líquido até atingir a amostra. Esse sistema opera frequentemente nas faixas de 25, 33 e 45 kHz, com densidade de potência inferior a 200 W/L. Entre os principais parâmetros ajustáveis estão o tempo de extração, a carga da amostra (kg/L) e o nível do líquido (Fernandes; Rodrigues, 2023; Xu *et al.*, 2022).

O ultrassom com sonda, por sua vez, é mais potente, atingindo densidades acima de 1000 W/L. Esse sistema é composto por um controlador, um transdutor e uma sonda, sendo o ultrassom transmitido diretamente por meio da imersão da sonda em um líquido contendo a amostra. As frequências de operação variam de 18 a 24 kHz, e podem ser utilizadas sondas de diferentes diâmetros, permitindo o controle preciso da potência e da amplitude das ondas (Fernandes; Rodrigues, 2023; Xu *et al.*, 2022).

A extração assistida por ultrassom tem sido amplamente empregada para a recuperação de compostos bioativos em diversas matrizes vegetais, com resultados expressivos na literatura (Figura 4) (Das; Nayak; Kesavan, 2022).

Figura 4 - Número de artigos publicados sobre extração de compostos bioativos assistida por ultrassom entre 2015 e 2025.



Fonte: Elaborado pela autora, com base em dados da base Scopus.

Nota: Palavras-chave pesquisadas: “ultrasound-assisted extraction”, “bioactive compounds”. Total de 32.065 resultados. Acesso em: 11/06/2025.

Entre as variáveis cruciais que influenciam o rendimento do processo, destacam-se a potência ultrassônica, a razão sólido-líquido, a temperatura e o tempo de extração. Com base em múltiplos estudos, a UAE se mostra uma ferramenta promissora e eficiente na obtenção de compostos biologicamente ativos (Zhu *et al.*, 2016; Chen; Zhao; Yu, 2015; Altemimi *et al.*, 2017; Sim; Ong; Nyam, 2019; Silva *et al.*, 2023; Tebbi *et al.*, 2023; Xia; Ahmmed; Rashidinejad, 2023).

3.4 SOLVENTES EUTÉTICOS PROFUNDOS NATURAIS (NADES)

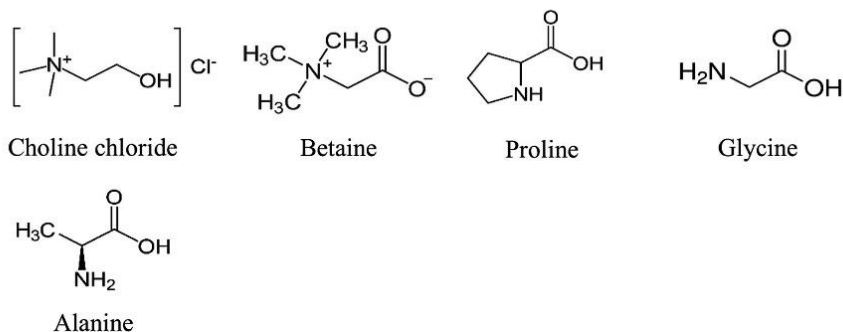
Os solventes eutéticos profundos (DES) pertencem a uma nova classe de solventes, que surgiu a partir da demanda por um solvente sustentável e economicamente viável, proposta inicialmente por Abbott *et al.* (2003). O termo ‘eutético’ tem origem no grego antigo *εὐτήκτος* (*eútēktos*), que significa ‘facilmente fundido’, sendo empregado para destacar a facilidade de fusão dessas misturas em relação aos componentes puros (Tarahi *et al.*, 2025).

O DES é produzido a partir da mistura de dois ou mais compostos que atuam como aceptor de ligações de hidrogênio (HBA) ou como doador de ligações de hidrogênio (HBD) (Figura 5), em proporções molares específicas. A interação específica entre HBAs e HBDs resulta em uma queda acentuada do ponto de fusão,

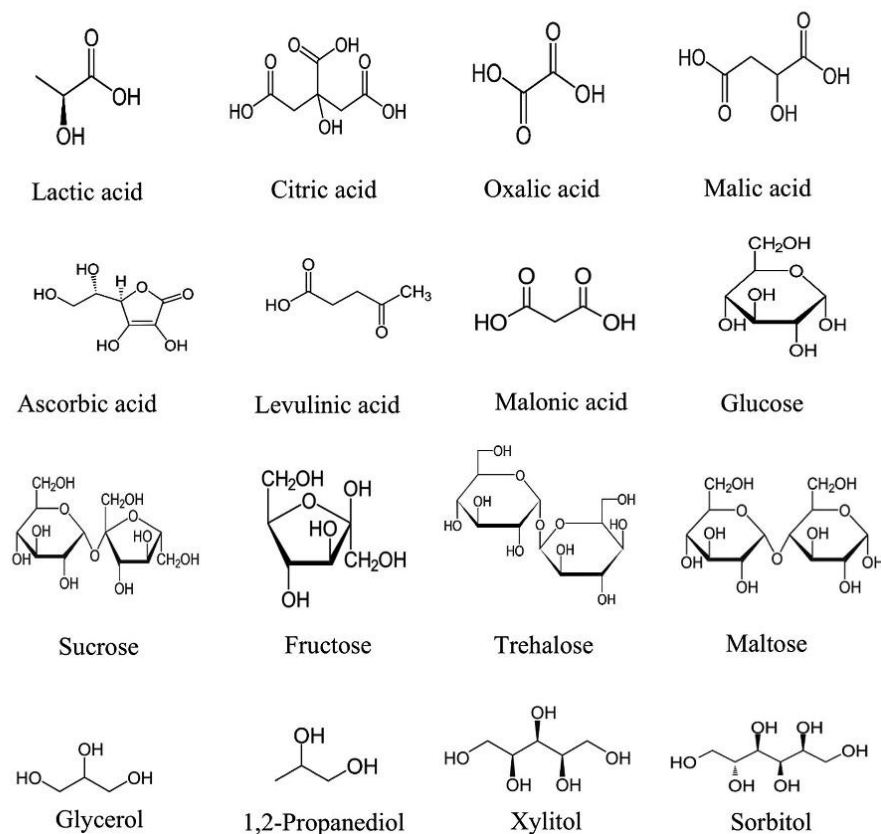
originando uma mistura eutética com características diferentes das apresentadas por cada componente isoladamente (Abranches; Coutinho, 2022).

Figura 5 - HBAs e HBDs usados em formulações de DES.

Hydrogen bond acceptors (HBA)



Hydrogen bond donors (HBD)



Fonte: Fuad; Nadzir; Kamaruddin (2021).

O primeiro DES sintetizado foi à base de cloreto de colina (ChCl) e ureia (Abbott *et al.*, 2003). Nos anos seguintes, os ácidos carboxílicos (ácido oxálico, ácido malônico, ácido succínico, ácido fenilacético, ácido fenilpropionico, ácido tricarbálico,

ácido cítrico) e o glicerol também foram adicionados como componentes do DES (Abbott *et al.*, 2004; Abbott *et al.*, 2011).

A síntese desses compostos pode ser realizada por meio de aquecimento e agitação, moagem, liofilização e evaporação, combinados ou não com técnicas emergentes, como síntese assistida por micro-ondas, assistida por ultrassom ou de dupla rosca, dependendo das propriedades físico-químicas e da pureza desejada e da finalidade pretendida (Tarahi *et al.*, 2025).

Os solventes eutéticos profundos naturais (NADES) surgiram após Choi *et al.* (2011) descobrirem a possibilidade de sintetizar DES utilizando metabólitos primários de plantas, como açúcares (glicose, frutose, sacarose, trealose), aminoácidos (prolina) e ácidos orgânicos (ácido málico, ácido cítrico, ácido maleico, ácido aconítico). Tais NADES pertencem à categoria dos hidrofílicos, que representam os tipos mais comuns de solventes eutéticos aplicados em diversas áreas, como reações químicas, eletroquímica, farmacologia e processos de separação. Já os NADES hidrofóbicos foram introduzidos pela primeira vez em 2015. Sua síntese envolve a combinação de mentol com ácidos pirúvico, acético, láctico e láurico; timol com mentol e cumarina; e borneol com ácido decanoico, ácido oleico e timol. Embora NADES hidrofóbicos já tenham sido aplicados com sucesso na extração de compostos bioativos de matrizes vegetais, seu uso ainda é limitado (Fuad; Nadzir; Kamaruddin, 2021).

Compostos como cloreto de colina e glicerol estão entre os principais e mais utilizados constituintes dos NADES. Esses componentes podem ser combinados em diferentes proporções para gerar variações de NADES com propriedades ajustáveis, desde baixos pontos de fusão até elevada estabilidade térmica. Essa versatilidade na composição possibilita a personalização do solvente para atender a demandas específicas em distintas aplicações (Freitas; Cavaco-Paulo; Silva, 2024). Tais propriedades são resultantes das interações moleculares entre os constituintes da mistura, sendo fortemente influenciadas pela proporção relativa de cada componente (Panic *et al.*, 2021).

Propriedades como viscosidade, densidade e ponto de fusão podem influenciar significativamente a facilidade de utilização do NADES e seu rendimento de extração. O ponto de fusão está relacionado à temperatura de aplicação do solvente, ou seja, misturas com ponto de fusão elevado não podem ser usadas em temperatura ambiente. Da mesma forma, pontos de fusão abaixo de zero permitem a

aplicação desses solventes em baixas temperaturas. Já a viscosidade influencia na difusão das moléculas dentro do solvente ao longo da extração. Quando comparados aos solventes convencionais, os NADES tem viscosidade mais alta e condutividade mais baixa, devido a fortes interações intermoleculares, como ligações de hidrogênio, forças de van der Waals e interações eletrostáticas. Em relação à densidade, normalmente os NADES hidrofóbicos são menos densos que a água e os hidrofílicos são mais densos que a água. Essas propriedades estão relacionadas à natureza do HBA e HBD e à intensidade da interação entre eles (Dai *et al.*, 2013; Smith; Abbott; Ryder, 2014; Della Posta *et al.*, 2022).

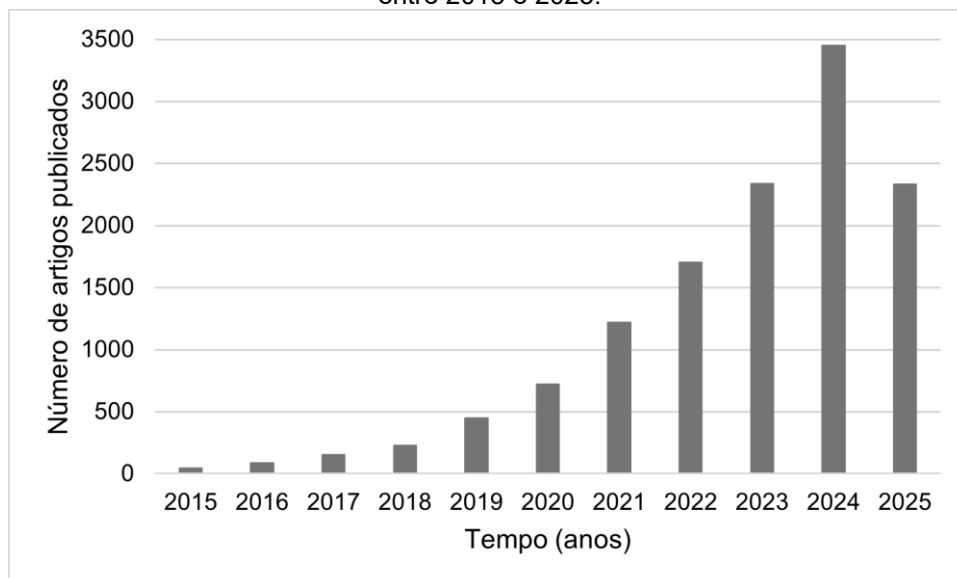
Uma das vantagens destes solventes é a capacidade de ajustar a sua composição e a natureza do HBA e HBD, obtendo misturas com propriedades físico-químicas distintas (Hayyan *et al.*, 2013; Craveiro *et al.*, 2016). Dessa forma, os problemas de aplicação relacionados a alta viscosidade e densidade dos NADES podem ser resolvidos através da adição de água em quantidades variadas (Martins; Ferreira, 2017). Ao adicionar água à mistura eutética, a ligação entre os componentes do NADES enfraquece gradativamente até a destruição da estrutura supramolecular (Vilková; Płotka-Wasyłka; Andruch, 2020). No entanto, a estrutura do solvente pode ser danificada caso a quantidade de água incorporada ultrapasse 50%, reduzindo a eficiência da extração (Fanali *et al.*, 2021).

A habilidade dos componentes do NADES de doar e aceitar elétrons ou prótons permite a formação de novas ligações de hidrogênio com os compostos-alvo. O mecanismo de extração baseia-se na ruptura das paredes celulares, ocasionada pelas forças mecânicas aplicadas durante o processo. Essa ruptura favorece a dissolução celular, resultando na degradação de polissacarídeos (como celulose, fibras e quitina) presentes na parede celular, permitindo o contato direto do solvente com os compostos-alvo da matriz celular (Julshahril; Phuah; Rambli, 2025). Diversos estudos utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), geralmente acoplada à Simulação Dinâmica Molecular (MDS), evidenciaram que, antes da extração, a superfície da parede celular apresentava-se íntegra, irregular e áspera. Após a extração, o tecido se torna deformado e poroso, favorecendo a penetração do solvente nas células vegetais internas e a liberação dos compostos para o meio extrator (Zhou *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2018; Lankejar; Rathod, 2021; Sharma; Dash, 2021).

Estes solventes são excelentes substitutos dos líquidos iônicos e dos solventes orgânicos e têm sido amplamente utilizados na extração de compostos de

fontes naturais com alto valor agregado (Figura 6). Isso se deve ao baixo custo, à facilidade de síntese, à baixa toxicidade ou ausência dela, à biodegradabilidade e à biocompatibilidade (Fuad; Nadzir; Kamaruddin, 2021; Panic *et al.*, 2021).

Figura 6 - Número de artigos publicados sobre extração de compostos bioativos utilizando NADES entre 2015 e 2025.



Fonte: Elaborado pela autora, com base em dados da base Scopus.

Nota: Palavras-chave pesquisadas: “natural deep eutectic solvents”, “bioactive compounds”. Total de 12.725 resultados. Acesso em: 11/06/2025.

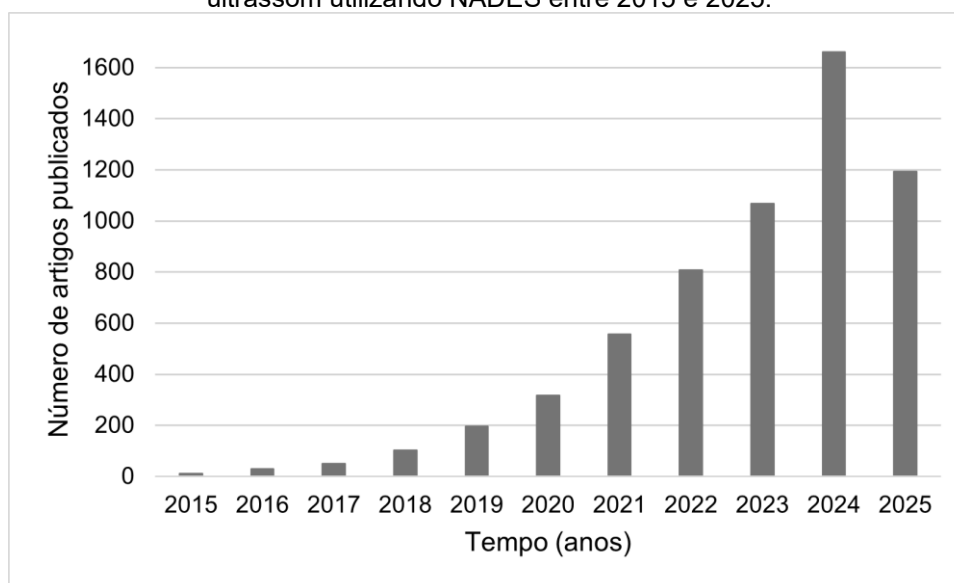
Além disso, esses solventes demonstraram capacidade de preservar os compostos naturais mesmo sob temperaturas elevadas e durante o armazenamento (Choi *et al.*, 2011). Outro ponto positivo é a possibilidade de adicionar os extratos obtidos às formulações de produtos alimentícios, sem a necessidade de eliminar previamente o NADES (Misan *et al.*, 2020). Os principais constituintes dos NADES, como o cloreto de colina, não oferecem nenhum tipo de ameaça à segurança dos consumidores ou usuários finais dos extratos, uma vez que são substâncias de origem natural, comumente presentes em alimentos ou atuando como metabólitos primários em organismos vivos (Freitas; Cavaco-Paulo; Silva, 2024).

3.5 APLICAÇÃO COMBINADA DE NADES E ULTRASSOM NA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS

A utilização de métodos sustentáveis para a extração de compostos bioativos vem crescendo significativamente, com o objetivo de minimizar os danos à saúde

humana e ao meio ambiente. Essas técnicas têm sido testadas em diversas matrizes vegetais, visando otimizar o processo de extração. Destaca-se o aumento expressivo nas publicações científicas que combinam o uso de NADES com a aplicação de ultrassom (Figura 7).

Figura 7 - Número de artigos publicados sobre extração de compostos bioativos assistida por ultrassom utilizando NADES entre 2015 e 2025.



Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da base Scopus.

Nota: Palavras-chave pesquisadas: 'ultrasound-assisted extraction', "natural deep eutectic solvents", "bioactive compounds". Total de 5.993 resultados. Acesso em: 11/06/2025.

Jamshaid e Ahmed (2022) otimizaram as condições de extração de compostos bioativos do fruto de *Melia azedarach* empregando extração ultrassônica associada a NADES sintetizado com cloreto de colina e glicerol. Os resultados foram eficazes em relação aos teores de compostos fenólicos, flavonoides totais e atividade antioxidante, com melhores desempenhos observados a 46,4 °C, utilizando DES a 50% e 100% de amplitude de ultrassom. Os testes de validação apresentaram baixos índices de erro, sustentando o modelo de extração em larga escala proposto pelos autores.

A eficiência da extração de flavonoides (naringina e neoesperidina) de *Fructus aurantii* por extração assistida por ultrassom utilizando NADES foi avaliada por He et al. (2024). Foram testados 14 tipos diferentes de NADES, considerando variáveis como proporção molar, teor de água, potência do ultrassom, razão sólido/líquido, tempo e temperatura de extração. O solvente à base de cloreto de colina e etilenoglicol

(proporção molar 1:3 e 30% de água) apresentou os resultados mais promissores, superando metanol, etanol a 95% e água.

Olfat *et al.* (2024) extraíram compostos bioativos de *Hypnea flagelliformis* utilizando banho ultrassônico e NADES sintetizados com cloreto de colina. A mistura composta por cloreto de colina e ácido láctico superou água, etanol a 80% e metanol a 80%, especialmente no teor de compostos fenólicos totais.

Outro estudo utilizando NADES à base de cloreto de colina para a recuperação de compostos bioativos de bagaço de maçã, por extração assistida por ultrassom, foi conduzido por Rashid *et al.* (2023). Os NADES formulados com cloreto de colina e glicerol (1:2), cloreto de colina e ácido láctico (1:3) e cloreto de colina e ácido cítrico (1:1) apresentaram melhor desempenho em comparação com etanol a 70%.

Wei *et al.* (2024) estabeleceram um método verde eficiente para extração de cinco flavonoides (miricitrina, isoquercitrina, quercitrina, amentoflavona e hinokiflavona) de *Platycladi Cacumen*, utilizando ultrassom e NADES. O solvente à base de ácido 1,4-butanodiol e ácido láctico (1:3) apresentou o maior rendimento após triagem inicial. Os parâmetros otimizados incluíram tempo de 60 minutos, razão sólido/líquido de 20:1 e teor de água de 35%. O conteúdo total de flavonoides foi de $23,11 \pm 0,35$ mg/g, superando consideravelmente os resultados obtidos com solventes orgânicos convencionais. A atividade antioxidante também foi significativamente superior à obtida com metanol.

A combinação de NADES e ultrassom foi aplicada na recuperação de antioxidantes polifenólicos de resíduos de casca de manga. O NADES de ácido láctico-glicose (5:1) apresentou os melhores resultados quanto ao teor de compostos fenólicos totais, flavonoides totais e atividade antioxidante, em comparação ao etanol a 80%. Além disso, o tempo de extração e o consumo de solvente foram reduzidos em 50% e 25%, respectivamente (Lanjekar; Gokhale; Rathod, 2022).

Della Posta *et al.* (2023) também utilizaram NADES para extrair compostos fenólicos totais da casca de abacate. A extração foi realizada em banho ultrassônico com 12 NADES distintos e comparada com solventes convencionais (água, etanol a 50% e metanol a 50%). A mistura eutética de cloreto de colina e ácido láctico foi mais eficiente que os solventes convencionais, além de permitir a redução no volume de solvente, no tempo e na temperatura de extração.

A aplicação combinada de ultrassom e NADES possibilita o desenvolvimento de métodos de extração mais sustentáveis, seguros e de fácil implementação. Os processos otimizados resultam em economia de insumos, energia, mão de obra e tempo, além de promover maior eficiência e rendimento (Della Posta *et al.*, 2023). Considerando que plantas nativas pouco exploradas quanto ao seu potencial bioativo podem estar disponíveis em pequenas quantidades, torna-se imprescindível otimizar a extração dessas substâncias.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

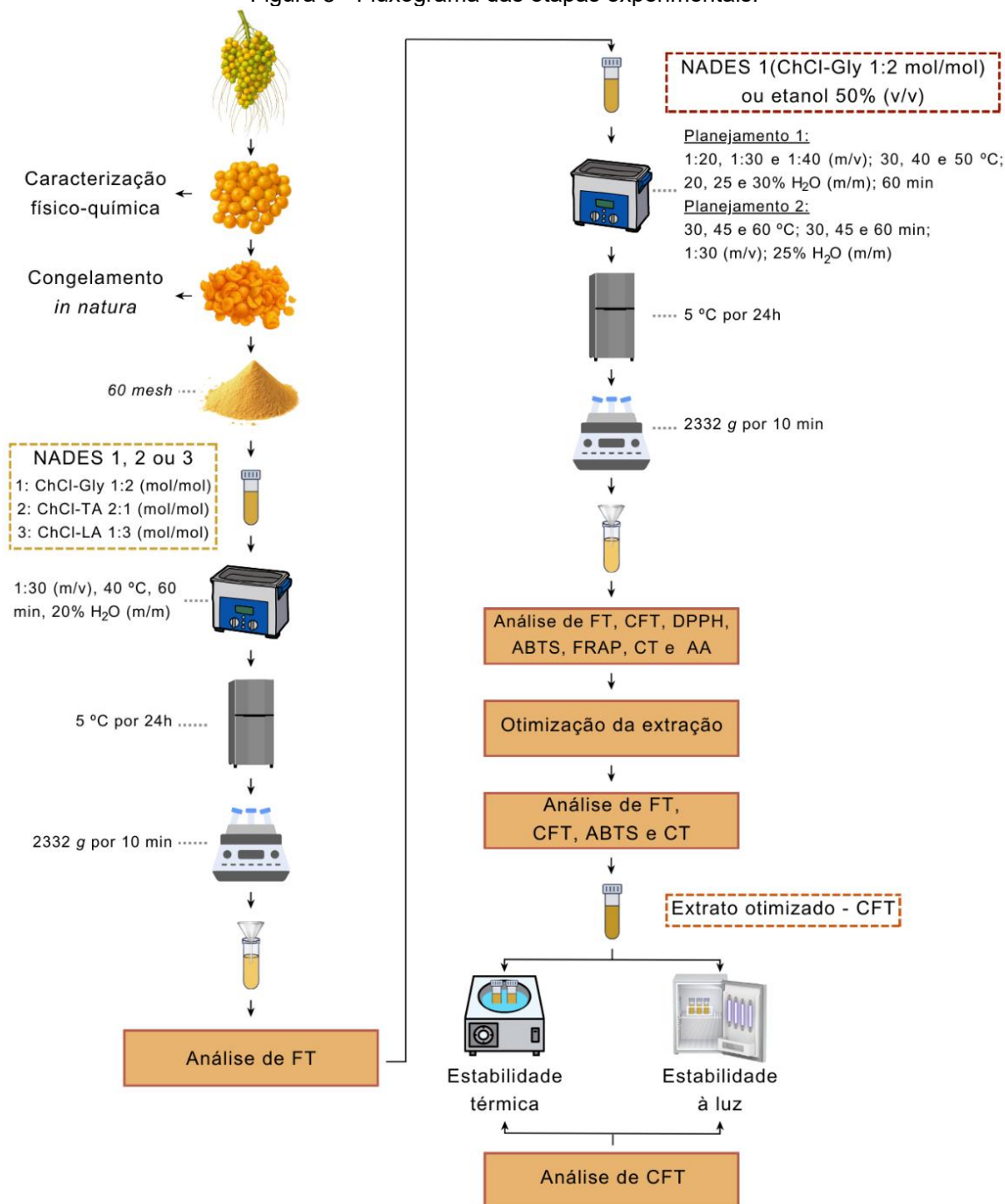
A coleta dos frutos foi realizada entre janeiro e fevereiro de 2024 no município de Canoinhas, Santa Catarina, Brasil (26°11'18.5"S 50°24'32.6"W; 26°11'22.3"S 50°24'46.4"W; 26°12'25.1"S 50°24'08.8"W), por meio da seleção de quatro cachos provenientes de cada uma das três palmeiras. A identificação da espécie *Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc. foi realizada com o auxílio do Herbário da Universidade Estadual de Ponta Grossa (Ponta Grossa – PR), onde a amostra foi registrada como exsicata de código 23.220 e catalogada na carpoteca. As amostras foram transportadas para o Laboratório de Processamento Vegetal do Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Canoinhas.

Os reagentes Folin-Ciocalteu, Trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-ácido carboxílico), DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil), ABTS (2,2-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)) e TPTZ (2,4,6-tri(2-piridil)-s-triazina) foram adquiridos da Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, EUA). As enzimas α -amilase, protease e amiloglucosidase foram fornecidas pela Merck S/A (Darmstadt, Alemanha). O cloreto de colina foi adquirido da Êxodo Científica (Sumaré, SP, Brasil).

4.2 MÉTODOS

A Figura 8 apresenta o fluxograma das principais etapas do estudo, abrangendo o preparo da fração polpa-casca, a síntese dos NADES, a extração assistida por ultrassom, os planejamentos experimentais e as análises subsequentes. Esse fluxograma sintetiza os procedimentos detalhados nas subseções seguintes.

Figura 8 - Fluxograma das etapas experimentais.



Fonte: A autora.

Nota: NADES: solvente eutético profundo natural; ChCL-Gly: cloreto de colina e glicerol; ChCl-TA: cloreto de colina e ácido tartárico; ChCl-LA: cloreto de colina e ácido láctico; FT: flavonoides totais; CFT: compostos fenólicos totais; DPPH: método de captura do radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil; ABTS: método de captura do radical 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico); FRAP: método por redução de ferro; CT: carotenoides totais; AA: ácido ascórbico; H₂O: água destilada.

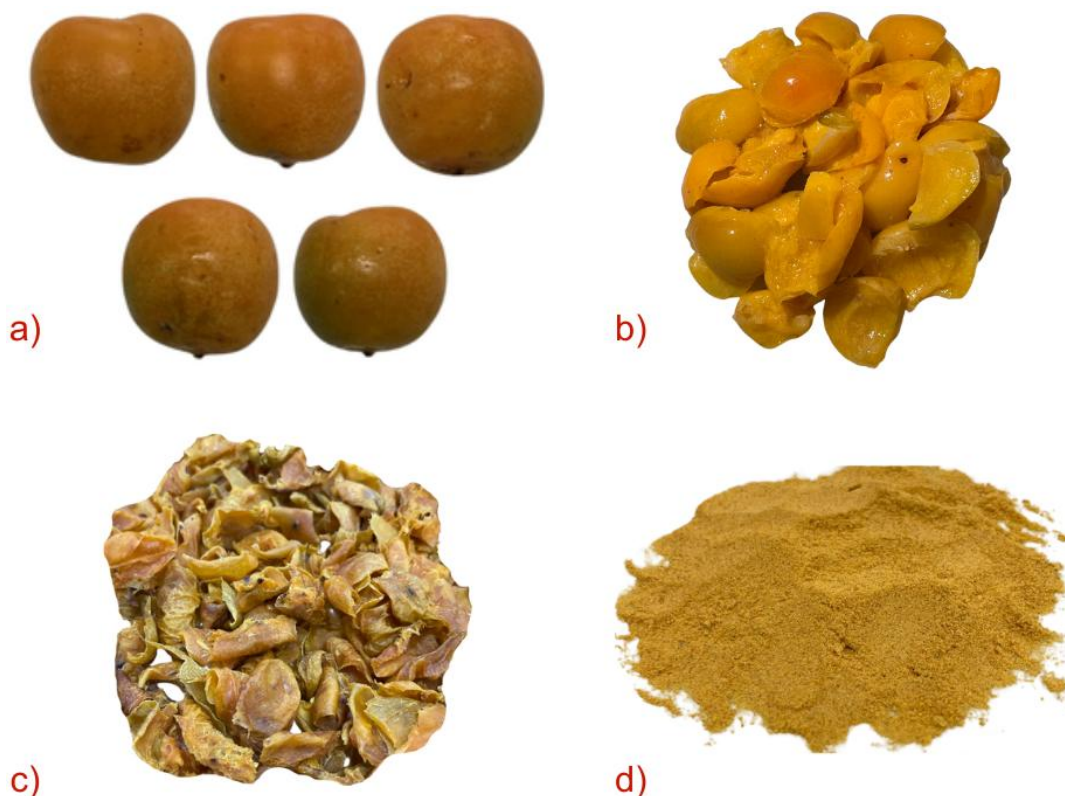
4.2.1 Obtenção Da Polpa Com Casca E Da Farinha De Butiá

Os frutos sadios, íntegros e plenamente maduros foram selecionados (Figura 9a), higienizados em solução de hipoclorito de sódio a 200 mg/L por 15 minutos, a 5

°C, e despulpados manualmente (Figura 9b). Para este estudo, foi utilizada a polpa com a casca (mesocarpo + epicarpo) de *Butia eriospatha*, tratada em conjunto e referida, quando necessário, como frações do fruto ou frações vegetais. O endocarpo (caroço/coquinho) foi descartado e não integrou as análises realizadas.

Uma porção dessas frações foi armazenada *in natura*, enquanto a outra foi submetida à desidratação em estufa com circulação de ar forçada (Lucadema, 82/480, SP, Brasil) a 60 °C até peso constante (aproximadamente 15 horas) (Figura 9c). As amostras desidratadas foram trituradas em liquidificador (Mondial, Power L-550, Barueri, São Paulo, Brasil), homogeneizadas e padronizadas em peneira de 60 *mesh* (Figura 9d). Ambas as porções foram embaladas a vácuo (seladora de câmara, TSMAQ, modelo DZ-400, Cachoeirinha, Rio Grande do Sul, Brasil) e congeladas a -18 °C (Freezer vertical, Consul, CVU26FB, Joinville, Santa Catarina, Brasil) até a realização das análises (Hoffmann *et al.*, 2017; Wagner *et al.*, 2022a).

Figura 9 – Etapas do processamento do butiá para obtenção da polpa com casca e da farinha.



Fonte: A autora.

Nota: (a) frutos de butiá após a seleção; (b) butiá despulpado, constituído por epicarpo e mesocarpo; (c) butiá desidratado; (d) farinha da polpa com casca de butiá.

4.2.2 Caracterização Físico-Química Dos Frutos

4.2.2.1 Massa e diâmetro

O massa e o tamanho dos frutos foram determinados a partir da média de pesagem e das medidas de altura e diâmetro horizontal de 10 frutos de cada palmeira (Wagner *et al.*, 2022a), com o auxílio de balança analítica (Shimadzu, ATY224, Kyoto, Japão) e paquímetro digital (MTX, 316119, China). O rendimento das frações do fruto foi obtido com base na diferença de massa entre as porções de polpa-casca e caroço, separadas manualmente.

4.2.2.2 Sólidos solúveis totais (SST), pH e acidez total titulável (ATT)

O teor de sólidos solúveis totais foi analisado por refratometria (Refratômetro de bancada ABBE, Ionlab, AR1000S, Araucária, PR, Brasil), com os resultados expressos em °Brix. O pH foi determinado por leitura direta em pHmetro (TECNAL, R-TEC-7/2-MP, Piracicaba, SP, Brasil), a partir da suspensão das frações de butiá em 40 mL de água destilada. A acidez foi determinada por titulação de 2 g de amostra suspensa em 50 mL de água destilada, com adição de 3 gotas de fenolftaleína a 1% (m/v), utilizando solução de NaOH 0,1 M até coloração rósea permanente. Os resultados foram expressos em g de ácido cítrico/100 g de amostra. Essas análises foram realizadas conforme os métodos descritos pelo Instituto Adolfo Lutz (2008).

4.2.3 Análise Colorimétrica

A cor da polpa e da casca foi analisada utilizando colorímetro portátil (TECNAL, SHE-COLORÍMETRO-TEC200, Piracicaba, São Paulo, Brasil), obtendo-se os parâmetros L^* (luminosidade), a^* (cromaticidade vermelho/verde) e b^* (cromaticidade amarelo/azul) das regiões superior, central e inferior de cada fruto. Com base nesses valores, foram calculados o ângulo Hue (Equação 1) e o Croma (Equação 2).

$$Hue = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (1)$$

$$Croma = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

4.2.4 Composição Centesimal

As análises de teor de proteína (fator de conversão do nitrogênio, $F = 6,25$), lipídeos, cinzas e umidade foram realizadas nas amostras *in natura*, conforme métodos descritos pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). O teor de fibra alimentar total foi determinado pelo método enzimático-gravimétrico (AOAC, 2023), e os carboidratos totais foram quantificados por diferença (TBCA, 2023).

4.2.5 Obtenção Dos Extratos E Análise De Compostos Bioativos

4.2.5.1 Síntese do solvente eutético profundo natural (NADES)

Os solventes eutéticos profundos naturais (NADES) à base de cloreto de colina e glicerol (ChCl-Gly), cloreto de colina e ácido tartárico (ChCl-TA) e cloreto de colina e ácido láctico (ChCl-LA) foram preparados conforme o método descrito por Bosiljkov *et al.* (2017). Cada mistura foi aquecida a 80 °C sob agitação constante até a formação de um líquido límpido e homogêneo. A estabilidade das soluções eutéticas foi avaliada por armazenamento à temperatura ambiente por 20 a 24 horas (Ali *et al.*, 2023). Após esse período, os NADES foram diluídos em água destilada, de acordo com a concentração desejada, para reduzir a viscosidade e ajustar a polaridade do solvente (Nekkaa *et al.*, 2023).

Após o preparo, foi realizada uma triagem preliminar com o objetivo de selecionar o NADES com maior capacidade extrativa de compostos bioativos da polpa e da casca de butiá. Três formulações (Tabela 1) foram avaliadas sob condições fixas de extração: temperatura de 40 °C, tempo de 60 minutos e razão sólido-líquido de 1:30 (m/v), parâmetros comumente empregados em estudos que associam NADES à extração assistida por ultrassom de compostos bioativos (Carvalho; Conte-Júnior, 2021; Jamshaid; Ahmed, 2022; Lankejar *et al.*, 2022; Rashid *et al.*, 2023; Della Posta *et al.*, 2023; Olfat *et al.*, 2024; Wei *et al.*, 2024; He *et al.*, 2024).

Tabela 1 – NADES testados para avaliação de eficiência de extração de compostos bioativos de butiá.

Solvente	Composição*	Sigla	Razão molar (mol/mol)	Concentração de água (% m/m)
NADES 1	Cloreto de colina e glicerol	ChCl-Gly	1:2	20
NADES 2	Cloreto de colina e ácido tartárico	ChCl-TA	2:1	20
NADES 3	Cloreto de colina e ácido lático	ChCl-LA	1:3	20

Nota: *Formulações selecionadas com base na ampla recorrência na literatura científica e sua aplicabilidade em diferentes contextos.

A eficiência de cada solvente foi determinada com base no teor de flavonoides totais. A formulação que apresentou maior rendimento de extração foi selecionada para os experimentos de otimização.

4.2.5.2 Preparo dos extratos

Os extratos foram preparados conforme o método descrito por Weremfo *et al.* (2022). A amostra desidratada foi submetida à extração em banho ultrassônico (Eco-sonics, Q 5.9/25-A, Indaiatuba, SP, Brasil), com temperatura e tempo ajustáveis, e frequência e potência fixas de 25 kHz e 165 W. Para cada ensaio, foram adicionados 1 g da amostra e volumes variáveis do NADES selecionado (com diferentes porcentagens de água) ou de etanol a 50% (v/v) (extração comparativa), em tubo Falcon de 50 mL. A extração foi conduzida conforme os parâmetros definidos nos planejamentos experimentais. Em seguida, os extratos foram refrigerados a 5 °C durante 24 horas para facilitar a precipitação de sólidos, centrifugados a 2332 g por 10 minutos (Novatecnica, NT810, 800 W, Piracicaba, SP, Brasil), e o sobrenadante foi coletado, filtrado e armazenado ao abrigo da luz a 5 °C até a realização das análises.

4.2.5.3 Planejamentos experimentais

Para a otimização das condições de extração, dois planejamentos experimentais distintos foram conduzidos, com o objetivo de avaliar a influência das variáveis operacionais sobre o rendimento dos extratos.

Inicialmente, foi utilizado um planejamento do tipo Box-Behnken (1960), com três variáveis independentes: razão sólido-líquido (X_1), temperatura (X_2) e concentração de água no NADES (X_3), cada uma avaliada em três níveis, mantendo-

se o tempo fixo em 60 minutos. Esse delineamento resultou em 15 combinações experimentais, incluindo três repetições no ponto central (Tabela 2). Para fins comparativos, foi produzido um extrato-padrão, com etanol 50% (v/v), utilizando as condições de extração do ponto central para as variáveis independentes.

Tabela 2 – Planejamento Box-Behnken aplicado para a extração de compostos bioativos de *Butia eriospatha*.

Experimento	Razão soluto:solvente (m/m)	Temperatura (°C)	Concentração de água (%)
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	+1	0	-1
7	-1	0	+1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
Etanol 50%	0	0	0
Valores reais*			
-1	1:20	30	20
0	1:30	40	25
+1	1:40	50	30

Nota: *Condições experimentais estabelecidas para cada fator no planejamento experimental.

Os dados obtidos foram ajustados a uma equação polinomial de segunda ordem, conforme descrito na Equação 3:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

onde Y representa a resposta predita; β_0 é o coeficiente de regressão da interseção; β_i , β_{ii} e β_{ij} correspondem, respectivamente, aos coeficientes dos efeitos linear, quadrático e de interação; e X_i e X_j são os fatores independentes avaliados (Bruns; Scarminio; Barros Neto, 2006).

Entretando, os resultados indicaram que as variáveis concentração de água e razão sólido-líquido apresentaram variação pouco expressiva na resposta. Diante

disso, optou-se por um segundo planejamento experimental, com foco nas variáveis de maior relevância.

Esse novo delineamento correspondeu a um planejamento fatorial completo 3^2 , com duas variáveis independentes: temperatura (X_1) e tempo de extração (X_2), mantendo-se constantes a razão sólido-líquido em 1:30 (m/v) e a concentração de água em 25% (m/m) no NADES selecionado. O delineamento resultou em 9 combinações experimentais, realizadas com repetições, totalizando 27 ensaios (Tabela 3).

Tabela 3 – Planejamento fatorial 3^2 aplicado para a otimização da extração de compostos bioativos de *Butia eriospatha*.

Experimento	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	+1
4	0	-1
5	0	0
6	0	+1
7	+1	-1
8	+1	0
9	+1	+1
Etanol 50%	0	0
Valores reais*		
-1	30	30
0	45	45
+1	60	60

Nota: *Condições experimentais estabelecidas para cada fator no planejamento experimental.

Assim como no Box-Behnken, os dados foram ajustados a uma equação polinomial de segunda ordem, apresentada na Equação 4:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (4)$$

onde Y representa a resposta predita; X_1 e X_2 são os fatores independentes; β_0 é o coeficiente de regressão da interseção; β_1 e β_2 são os coeficientes lineares; β_{11} e β_{22} são os coeficientes quadráticos; e β_{12} é o coeficiente de interação (Bruns; Scarminio; Barros Neto, 2006).

Da mesma forma que no planejamento de Box-Behnken, foi produzido, para fins complementares, um extrato-padrão preparado com etanol a 50% (v/v), utilizando as condições de extração do ponto central para as variáveis independentes.

Com base nos resultados obtidos pelo planejamento fatorial 3^2 , determinaram-se as condições ótimas de extração, por meio da função desejabilidade, que foram empregadas nos experimentos finais para a caracterização bioativa dos extratos.

A significância estatística dos termos nas equações de regressão foi avaliada por meio de análise de variância (ANOVA) para cada variável resposta. Os termos que não apresentaram significância estatística ($p > 0,05$) foram excluídos dos modelos ajustados, mantendo-se apenas os parâmetros com influência relevante. Posteriormente, os modelos finais foram validados experimentalmente, aplicando-se as condições otimizadas em triplicata. Os ensaios de validação seguiram os mesmos procedimentos metodológicos adotados nas etapas anteriores, permitindo a comparação entre os valores preditos pelos modelos e os dados observados, com o objetivo de verificar sua capacidade preditiva.

Cada ponto experimental foi realizado em triplicata. Como os resultados das repetições apresentaram valores idênticos ou variação desprezível, a média dos ensaios foi utilizada como valor representativo nas tabelas e gráficos desta dissertação.

4.2.5.4 Flavonoides totais (FT)

Para determinação de flavonoides totais (FT), foi utilizada a metodologia desenvolvida por Ramos *et al.* (2017). Alíquotas de 500 μL dos extratos foram misturadas com 1800 μL de etanol a 50% (v/v), sendo a solução homogeneizada em agitador de tubos (Phoenix, AP56, Araraquara, SP, Brasil). Em seguida, foram adicionados 200 μL de cloreto de alumínio a 5% (m/v), com nova homogeneização da mistura, seguida de incubação por 30 minutos em temperatura ambiente. A leitura foi realizada em espectrofotômetro (BEL Photonics, Gold Spectrumlab 53, Piracicaba, São Paulo, Brasil) a 425 nm. O teor total de flavonoides foi determinado com base em curva de calibração de quercetina, e os resultados foram expressos em mg de equivalentes de quercetina por grama de amostra seca (mg QE/g) (NADES: $y = 2,1635x + 0,0086$, $R^2 = 0,9953$; Etanol: $y = 2,5707x + 0,008$, $R^2 = 0,9979$).

4.2.5.5 Compostos fenólicos totais (CFT)

A determinação de compostos fenólicos totais (CFT) foi realizada pelo método colorimétrico descrito por Singleton e Rossi (1965). Foram adicionados 100 µL de extrato, 8,4 mL de água destilada e 500 µL do reagente Folin-Ciocalteu em um tubo de ensaio. A mistura foi homogeneizada em agitador de tubos (Phoenix, AP56, Araraquara, SP, Brasil) e mantida em repouso por 3 minutos. Em seguida, adicionou-se 1 mL de solução de carbonato de sódio a 20% (m/v), com nova homogeneização, sendo a mistura mantida no escuro e em temperatura ambiente por 1 hora. A leitura da absorbância foi realizada em espectrofotômetro UV-VIS (BEL Photonics, Gold Spectrumlab 53, Piracicaba, SP, Brasil) a 725 nm. Os resultados foram obtidos com base em curva de calibração utilizando o ácido gálico como padrão, e expressos em mg de equivalente de ácido gálico por grama de amostra seca (mg GAE/g) (NADES: $y = 3,2859x + 0,0991$, $R^2 = 0,9928$; Etanol: $y = 3,3955x + 0,091$, $R^2 = 0,9926$).

4.2.5.6 Atividade antioxidante

A capacidade antioxidante foi avaliada por três métodos complementares: eliminação dos radicais DPPH e ABTS, e potencial redutor de ferro (FRAP). A atividade frente ao radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) foi determinada conforme o método descrito por Brand-Williams *et al.* (1995), com modificações. Em tubos de ensaio, foram adicionados 150 µL de extrato e 2850 µL da solução DPPH (1 mM), com posterior incubação no escuro, em temperatura ambiente, por 24 horas. A absorbância foi medida em espectrofotômetro (BEL Photonics, Gold Spectrumlab 53, Piracicaba, SP, Brasil) a 515 nm. Os resultados foram obtidos por comparação com curva de calibração de Trolox e expressos em mg de equivalentes de Trolox por grama de amostra seca (mg TE/g) (NADES: $y = -5,4605x + 0,9281$, $R^2 = 0,9992$; Etanol: $y = -6,8312x + 1,1293$, $R^2 = 0,9997$).

A análise da atividade antioxidante frente ao radical ABTS (2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)) foi conduzida segundo o método proposto por Re *et al.* (1999), com modificações. Inicialmente, foram preparadas soluções estoque de ABTS a 7 mM e de persulfato de potássio a 140 mM. O radical de ABTS foi gerado pela mistura de 5 mL da solução de ABTS com 88 µL de persulfato de potássio, sendo a reação incubada no escuro a 25 °C por 16 horas. Após esse período, 1 mL da

solução foi diluído em etanol até atingir absorvância de $0,70 \pm 0,05$ a 734 nm. Em ambiente escuro, 30 μL de cada diluição dos extratos foram adicionados a 3 mL da solução de ABTS em tubos de ensaio, com homogeneização em agitador de tubos (Phoenix, AP56, Araraquara, SP, Brasil). A leitura foi realizada a 734 nm após 6 minutos. Os resultados foram comparados com a curva de calibração de Trolox e expressos em mg de equivalentes de Trolox por grama de amostra seca (mg TE/g) (NADES: $y = -20,324x + 0,6882$, $R^2 = 0,9985$; Etanol: $y = -19,689x + 0,6667$, $R^2 = 0,9977$).

O potencial antioxidante por redução de ferro (FRAP) foi avaliado segundo a metodologia de Benzie e Strain (1996), com modificações. Em tubos de ensaio, foram adicionados 100 μL de extrato, 100 μL da solução de cloreto férrico a 3 mM e 1800 μL de solução de TPTZ (2,4,6-tris(2-piridil)-s-triazina) a 1 mM. A reação foi conduzida em banho-maria a 37 °C por 30 minutos (Solab, SL150, Piracicaba, SP, Brasil), seguida de incubação no escuro a 25 °C por 10 minutos. A absorvância foi mediada a 620 nm espectrofotômetro (BEL Photonics, Gold Spectrumlab 53, Piracicaba, SP, Brasil), e os resultados foram expressos em mg de equivalentes de Trolox por grama de amostra seca (mg TE/g), com base em curva de calibração de Trolox (NADES: $y = 0,5199x + 0,0854$, $R^2 = 0,9952$; Etanol: $y = 0,5811x + 0,0055$, $R^2 = 0,9915$).

4.2.5.7 Carotenoides totais (CT)

A quantificação de carotenoides totais (CT) foi realizada por leitura direta do extrato, conforme método proposto por Rodrigues-Amaya (2001), baseado na Lei de Lambert-Beer (Equação 5):

$$CT = \frac{A.V.10^6}{A_{1\text{ cm}}^{1\%}.100.m} \quad (5)$$

onde CT é a concentração de carotenoides totais, expressa em mg β -caroteno por 100 g de amostra; A , a absorvância medida a 450 nm; V , o volume do extrato (mL); $A_{1\text{ cm}}^{1\%}$, o coeficiente de absorvidade molar do β -caroteno em éter de petróleo (2592); e m , a massa da amostra (g).

4.2.5.8 Ácido ascórbico (AA)

O teor de ácido ascórbico foi determinado com base na reação de redução do corante 2,6-diclorofenolindofenol-sódico (DCPIP) pelo ácido ascórbico (AA), segundo método descrito pela AOAC (1984), adaptado por Benassi e Antunes (1988), com modificações para análise direta do extrato de *Butia eriospatha*. Uma alíquota de 2 mL do extrato foi misturada com 5 mL da solução de ácido oxálico a 2% (m/v). A titulação foi realizada com solução padronizada de DCPIP (Equação 6), sendo o ponto de viragem detectado visualmente.

$$f = \frac{m}{V} \quad (6)$$

onde f é o fator de correção da solução de DCPIP; m , a massa da amostra (g); e V , o volume de DCPIP gasto na titulação (mL).

Os resultados foram expressos em mg de ácido ascórbico por 100 g de amostra (mg AA/100 g) (Equação 7).

$$AA = \frac{V_{DCPIP} \times f \times 100}{V_{extrato}} \quad (7)$$

onde AA é a concentração de ácido ascórbico, expressa em mg de ácido ascórbico por 100 g de amostra; V_{DCPIP} , o volume de DCPIP gasto na titulação (mL); f , o fator padronizado; e $V_{extrato}$, o volume de extrato pipetado para análise (mL).

4.2.6 Estabilidade Dos Extratos

Os testes de estabilidade térmica e à luz foram realizados com o extrato obtido a partir das condições otimizadas para a extração de compostos fenólicos totais, em razão do alto rendimento, da consistência analítica e da viabilidade experimental.

4.2.6.1 Estabilidade térmica

A estabilidade térmica dos extratos foi avaliada conforme as metodologias descritas por Mercali *et al.* (2013) e Peron, Fraga e Antelo (2017). O extrato foi

acondicionado em tubos de ensaio com tampa de rosca e submetido ao aquecimento em banho-maria previamente estabilizado nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C. Em intervalos de 0, 15, 30, 60 e 120 minutos, alíquotas foram retiradas e imediatamente resfriadas para posterior análise do teor de compostos fenólicos totais, conforme descrito no item 4.2.4.5.

Os dados referentes à variação no teor de compostos fenólicos ao longo do tempo, para cada temperatura, foram ajustados a um modelo de cinética de degradação. A constante da cinética (k) foi determinada por regressão dos dados experimentais, com base na concentração inicial em função do tempo, conforme descrito na Equação 8:

$$CA = CA_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (8)$$

onde CA é a concentração de compostos fenólicos no tempo t (mg/g); CA_0 , a concentração inicial (mg/g); t , o tempo (s); e k , a constante da cinética de degradação (s^{-1}).

O tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) foi calculado com base em k , conforme a Equação 9:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(0,5)}{k} \quad (9)$$

em que $t_{1/2}$ representa o tempo de meia-vida e k é a constante de degradação.

A energia de ativação (Ea) foi determinada com base na equação de Arrhenius (Equação 10):

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{R \cdot T} \quad (10)$$

onde A é o fator de frequência em (s^{-1}); Ea , a energia de ativação ($kJ \cdot mol^{-1}$); T , a temperatura (K); e R , a constante universal dos gases ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$).

A variação da entalpia (ΔH) foi calculada conforme a Equação 11:

$$\Delta H = Ea - R \cdot T \quad (11)$$

em que ΔH representa a variação da entalpia (kJ.mol^{-1}); E_a , a energia de ativação (kJ.mol^{-1}); R , a constante dos gases ($\text{kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$); e T , a temperatura (K).

A variação da energia livre de Gibbs (ΔG) foi estimada por meio da Equação 12:

$$\Delta G = -R.T \ln \left(\frac{k.h}{k_B.T} \right) \quad (12)$$

onde ΔG é a variação da energia livre de Gibbs (kJ.mol^{-1}); R , a constante universal dos gases ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$); T , a temperatura (K); k , a constante da cinética de degradação (s^{-1}); h , a constante de Planck ($6,6262 \times 10^{-34} \text{ J.s}$); e k_B , a constante de Boltzmann ($1,3806 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$).

A variação da entropia (ΔS) foi calculada conforme a Equação 13:

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (13)$$

em que ΔS representa a variação da entropia ($\text{kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$); ΔH , a variação da entalpia (kJ.mol^{-1}); ΔG , a variação da energia livre de Gibbs (kJ.mol^{-1}); e T , a temperatura (K).

4.2.6.2 Estabilidade fotoquímica

A estabilidade dos extratos frente à exposição à luz foi avaliada conforme o método descrito por Dai, Verpoorte e Choi (2014), com modificações. Os extratos foram acondicionados em tubos de ensaio e submetidos à iluminação direta por lâmpadas fluorescentes brancas de 10 W cada, totalizando 40 W, distribuídas uniformemente em estufa de incubação com fotoperíodo controlado (Deluq, DL552, Florianópolis, SC, Brasil), à temperatura ambiente ($24 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$), durante 96 horas. O teor de compostos fenólicos totais foi determinado nos tempos de 0, 3, 19, 24, 48, 72 e 96 horas, conforme descrito no item 4.2.5.5.

4.2.7 Análise Estatística

Todos os experimentos foram conduzidos em triplicata, e os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão. As diferenças entre as amostras foram

avaliadas por análise de variância (ANOVA), seguida do teste de comparações múltiplas de Fisher (LSD), considerando nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). A relação entre o teor de compostos bioativos e a atividade antioxidante foi avaliada por meio da análise de correlação de Pearson, considerando os ensaios realizados com NADES separadamente do extrato etanólico. Os parâmetros das equações utilizadas na descrição da cinética de degradação foram ajustados por regressão não linear, empregando o algoritmo de Gauss-Newton. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software STATISTICA 7.1 (Stat-Soft Inc., Tulsa, OK, USA).

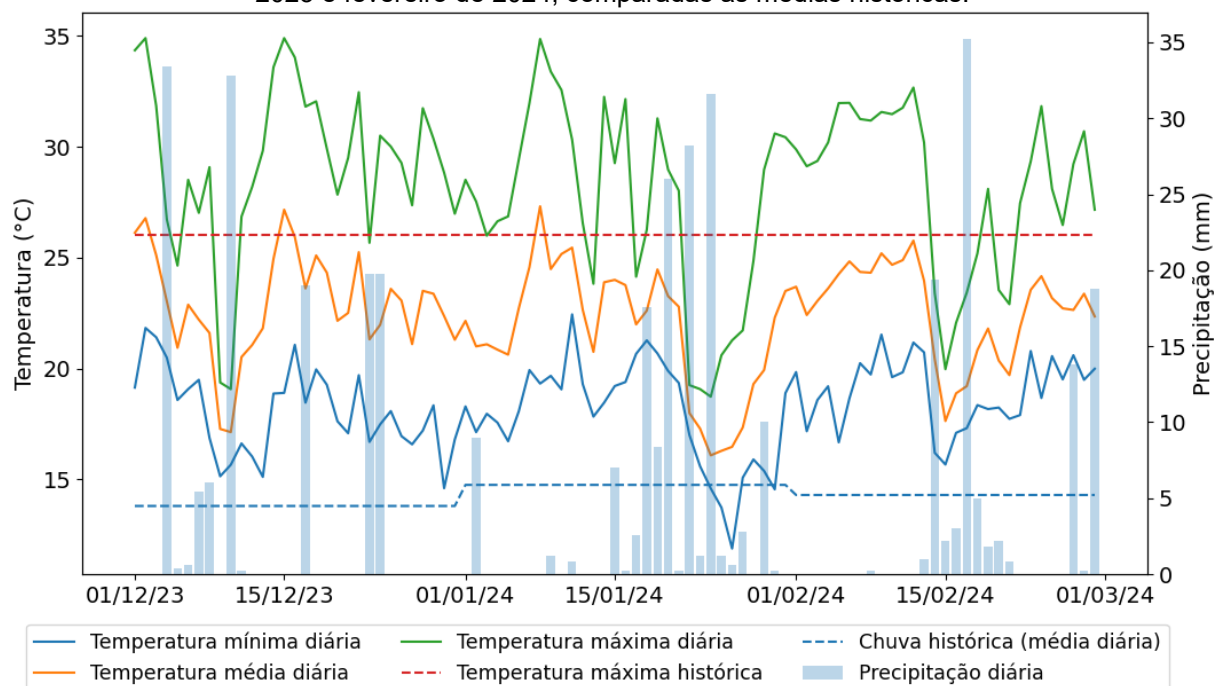
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E CENTESIMAL DOS FRUTOS

As características físico-químicas do butiá estão diretamente relacionadas às condições climáticas durante a formação e maturação dos frutos. Na região de Canoinhas (SC), o desenvolvimento ocorre principalmente entre dezembro e janeiro, enquanto a maturação se concentra entre janeiro e fevereiro. Entre dezembro de 2023 e fevereiro de 2024, os dados meteorológicos da região evidenciaram um cenário de acentuada variabilidade climática. As temperaturas mínimas oscilaram entre aproximadamente 12 e 22 °C, as médias variaram de cerca de 16 a 27 °C e as máximas alcançaram valores entre 19 e 35 °C. A precipitação apresentou comportamento igualmente irregular, alternando dias sem chuva com episódios de precipitação superiores a 30 mm, chegando a aproximadamente 35 mm em determinados eventos. Esse conjunto de condições caracteriza um verão marcado por extremos térmicos e pluviométricos em relação ao padrão climatológico da região (Canoinhas Online, 2023a; Canoinhas Online, 2023b; Canoinhas Online, 2023c; Lima; Cruz, 2024; Lima, 2024; EPAGRI/CIRAM, 2025).

Na Figura 10 são apresentados os valores diários de temperatura mínima, média e máxima, bem como a precipitação acumulada, registrados na estação meteorológica do IFSC Câmpus Canoinhas entre dezembro de 2023 e fevereiro de 2024, período correspondente ao desenvolvimento e à maturação dos frutos de *Butia eriospatha*. O gráfico também inclui as médias históricas de temperatura máxima e precipitação para o município, permitindo visualizar os desvios em relação ao padrão climatológico de longo prazo do período avaliado.

Figura 10 - Temperatura e precipitação diárias registradas em Canoinhas, SC, entre dezembro de 2023 e fevereiro de 2024, comparadas às médias históricas.



Fonte: Elaborado pela autora com base em dados observados da estação meteorológica Epagri/Ciram – IFSC Câmpus Canoinhas (código 1063) e em médias históricas fornecidas pelo portal Climatempo. Período analisado: dez./2023 a fev./2024. Acesso em: 21 nov. 2025.

A oscilação climática acentuada pode expor a planta a um estado de estresse prolongado, resultando em prejuízos ao desenvolvimento e à qualidade dos frutos (Amarante; Megguer, 2008). Em frutos não climatéricos, o processo de amadurecimento é regulado principalmente pela atividade enzimática contínua (Alferez; Carvalho; Boakye, 2021). O equilíbrio hormonal também exerce papel central, especialmente os níveis de ácido abscísico (ABA), auxinas e giberelinas (Fuentes; Figueroa; Valdenegro, 2019). Além disso, reações metabólicas residuais contribuem para a progressão do amadurecimento. Diferentemente dos frutos climatéricos, esse processo não é desencadeado pelo etileno (Perotti; Posé; Martín-Pizarro, 2023; Saito *et al.*, 2025).

Durante o desenvolvimento e a maturação, condições ambientais adversas, como temperaturas elevadas, déficit hídrico ou radiação excessiva, afetam diretamente o metabolismo primário e secundário dos frutos. O estresse térmico prolongado reduz a taxa fotossintética e o transporte de fotoassimilados, limitando o acúmulo de açúcares, ácidos orgânicos e compostos bioativos, além de comprometer o tamanho e a massa dos frutos. A disponibilidade limitada de precursores metabólicos também interfere no equilíbrio hormonal, na síntese de pigmentos e de compostos

voláteis, bem como na atividade antioxidante, resultando em frutos com coloração irregular, textura comprometida e menor qualidade sensorial (Li *et al.*, 2023; Tang *et al.*, 2023).

Apesar das variações climáticas observadas durante o período de desenvolvimento, os frutos de butiá coletados na região de Canoinhas apresentaram características físico-químicas dentro das faixas médias reportadas pela literatura, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização física e química de frutos de butiá por palmeira.

Parâmetros	Palmeira 1 (n = 10)	Palmeira 2 (n = 10)	Palmeira 3 (n = 10)
Massa do fruto (g)	8,19 ^c ± 0,50	8,95 ^b ± 0,20	9,36 ^a ± 0,38
Altura (mm)	21,28 ^a ± 0,27	21,92 ^a ± 0,69	22,28 ^a ± 0,18
Largura (mm)	23,82 ^b ± 0,24	24,63 ^a ± 0,17	24,99 ^a ± 0,66
Massa da polpa (g)	5,70 ^b ± 0,23	6,19 ^a ± 0,08	6,43 ^a ± 0,28
Massa do caroço (g)	2,50 ^a ± 0,38	2,76 ^a ± 0,13	2,93 ^a ± 0,11
Rendimento de polpa (%)	69,62 ^a ± 3,17	69,18 ^a ± 0,73	68,68 ^a ± 0,49
SST (°Brix)	11,50 ^a ± 0,87	11,75 ^a ± 0,66	11,33 ^a ± 0,14
ATT (g/100 g)	1,01 ^a ± 0,01	1,01 ^a ± 0,01	1,01 ^a ± 0,01
Ph	3,74 ^a ± 0,01	3,74 ^a ± 0,01	3,74 ^a ± 0,01

Nota: Resultados expressos em média ± desvio padrão (base seca). N = 10: número de frutos avaliados por palmeira. SST: sólidos solúveis totais. ATT: acidez total titulável. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre os experimentos ($p \leq 0,05$).

Os frutos apresentaram massa média variando entre 8,19 e 9,36 g, altura entre 21,28 e 22,28 mm e largura entre 23,82 e 24,99 mm, demonstrando um conjunto de características morfológicas uniforme entre as amostras coletadas. Essa homogeneidade sugere boa estabilidade fenotípica das plantas avaliadas, possivelmente favorecida por condições ambientais relativamente estáveis no período de desenvolvimento (Hoffmann *et al.*, 2014; Wagner *et al.*, 2022b). A massa média de polpa variou de 5,70 a 6,43 g, representando a maior fração da massa do fruto (aproximadamente 69%), enquanto a massa do caroço oscilou entre 2,50 e 2,93 g, não apresentando diferença significativa entre as palmeiras. Esses resultados reforçam o potencial tecnológico do butiá para elaboração de produtos processados, nos quais a quantidade de polpa disponível constitui um fator determinante (Rivas; Barbieri, 2018; Hoffmann *et al.*, 2017).

Os valores de sólidos solúveis totais (11,3–11,8 °Brix) e acidez total titulável (1,01 g/100 g), aliados ao pH estável (3,74), indicam equilíbrio entre açúcares e ácidos orgânicos, característica amplamente associada ao perfil sensorial de butiás em estágio de maturação plena (Sganzerla, 2010; Hoffmann *et al.*, 2014; Wagner *et al.*, 2022b).

Ferrão *et al.* (2023) e Antunes *et al.* (2024) também relataram resultados semelhantes em diferentes espécies de *Butia* spp. coletadas em municípios do Sul do Brasil. Ferrão *et al.* (2023) observaram valores de umidade entre 83,2 e 87,5%, cinzas de 0,78 a 1,12%, lipídeos variando de 0,35 a 1,02% e carboidratos totais entre 10,4 e 14,9% em polpas de *B. catarinensis* e *B. odorata*. Antunes *et al.* (2024) reportaram teores de umidade entre 84,6 e 88,1%, cinzas de 0,80 a 1,05%, lipídeos de 0,40 a 0,96% e carboidratos variando de 9,8 a 15,3% em frutos de *B. capitata* e *B. eriospatha* provenientes de diferentes localidades.

A maior variabilidade observada nesses estudos é atribuída às condições climáticas durante o período de desenvolvimento dos frutos, como diferenças de temperatura, disponibilidade hídrica, radiação solar e ocorrência de estresses ambientais. Essas variações influenciam o metabolismo primário e secundário, alterando o acúmulo de água, açúcares, lipídeos e minerais na polpa. Modificações nas condições de desenvolvimento também afetam a atividade enzimática e o balanço hormonal, resultando em composições centesimais mais heterogêneas entre localidades e safras (Li *et al.*, 2023).

Os dados presentes na literatura indicam diferenças significativas entre butiazeiros cultivados ou naturais em uma mesma região, principalmente em relação à massa, ao tamanho e ao diâmetro dos frutos. Essas divergências são frequentemente associadas à intensa variação das condições locais, como clima, solo, altitude e incidência de luz solar, que afetam direta ou indiretamente o crescimento, a morfologia, a composição química e a qualidade dos frutos (Ferrão *et al.*, 2023; Antunes *et al.*, 2024; Rocha *et al.*, 2022).

Essa sensibilidade a fatores abióticos locais reforça a importância de considerar o microambiente na caracterização de frutos de butiá. No caso de *Butia eriospatha*, foi observada expressiva variabilidade morfológica entre populações localizadas em diferentes fitofisionomias, como campos de altitude e florestas de araucária, mesmo em distâncias geográficas relativamente pequenas. Essa

variabilidade pode refletir adaptações locais e plasticidade fenotípica da espécie frente às condições edafoclimáticas específicas (Candido-Ribeiro *et al.*, 2019).

Adicionalmente, modificações recentes no uso e ocupação do solo, como o avanço da agropecuária e o desmatamento, têm afetado o habitat natural de *B. eriospatha* (Nazareno; Reis, 2013). Esses processos impactam a estrutura populacional e a regeneração natural da espécie (Candido-Ribeiro *et al.*, 2019). Alterações ambientais dessa magnitude podem ainda influenciar as características morfofísicas dos frutos (Wagner *et al.*, 2022b; Azambuja *et al.*, 2024).

Apesar disso, os resultados obtidos no presente estudo apresentaram relativa uniformidade entre as amostras analisadas. Isso sugere que a espécie demonstra notável capacidade de adaptação às condições ambientais locais, mantendo a estabilidade de compostos-chave, como açúcares e ácidos orgânicos, mesmo sob possíveis situações de estresse térmico e hídrico. Esse comportamento reforça a resiliência fisiológica do butiazeiro e a adequação da espécie às condições edafoclimáticas da região de Canoinhas.

Além disso, essa adaptabilidade assume especial relevância para a conservação da espécie, visto que *Butia eriospatha* e outros representantes do gênero *Butia* encontram-se em risco de extinção (Brasil, 2022). A manutenção de sua funcionalidade metabólica e bioquímica frente a condições de estresse ambiental pode contribuir para a redução do risco de declínio populacional (Nazareno; Reis, 2013). Essa característica apoia estratégias de preservação definidas em políticas e programas de conservação (Brasil, 1994; BGCI, 2006). Ela também oferece subsídios para ações voltadas à garantia da persistência dessas palmeiras a longo prazo (Brasil, 2017; Amorim *et al.*, 2021; Brasil, 2023; Eslabão *et al.*, 2022).

As características de cor dos frutos também refletem o seu estado de maturação e a composição físico-química, especialmente no que se refere ao teor de carotenoides, açúcares e ácidos orgânicos. Os parâmetros colorimétricos dos frutos e polpas de *Butia eriospatha* são apresentados na Tabela 5.

Observou-se variação significativa nos valores de L^* e b^* entre as palmeiras avaliadas para os frutos inteiros, indicando diferenças perceptíveis na luminosidade e na intensidade dos tons amarelados. Para as amostras de polpa (constituídas por polpa e casca), não foram observadas diferenças significativas nesses parâmetros. Os frutos da palmeira 1 apresentaram maior valor de L^* (52,07), correspondendo à coloração mais clara e levemente alaranjada. Já as palmeiras 2 e 3 apresentaram

menor luminosidade (44,27 e 43,76, respectivamente) e tonalidades de amarelo mais intensas, associadas a maiores valores de b^* e Croma (C^*).

Tabela 5 – Parâmetros colorimétricos dos frutos e polpas de butiá por palmeira.

FRUTOS INTEIROS			
Parâmetros	Palmeira 1 (n = 10)	Palmeira 2 (n = 10)	Palmeira 3 (n = 10)
L*	52,07 ^a ± 1,20	44,27 ^b ± 0,61	43,76 ^c ± 0,93
a*	12,41 ^a ± 1,91	11,25 ^a ± 1,54	9,93 ^a ± 4,06
b*	24,57 ^b ± 1,98	33,46 ^a ± 2,41	31,59 ^a ± 4,87
Croma	28,05 ^b ± 2,97	39,96 ^a ± 3,18	34,78 ^a ± 4,91
Hue	62,17 ^a ± 4,06	68,74 ^a ± 2,90	72,36 ^a ± 5,53
Cor predominante	Amarelo-alaranjado	Amarelo-intenso	Amarelo-alaranjado
POLPAS			
Parâmetros	Palmeira 1 (n = 10)	Palmeira 2 (n = 10)	Palmeira 3 (n = 10)
L*	41,26 ^a ± 5,97	50,83 ^a ± 5,81	41,07 ^a ± 2,76
a*	15,98 ^a ± 1,05	14,71 ^a ± 2,97	15,77 ^a ± 0,99
b*	46,18 ^a ± 6,90	44,91 ^a ± 3,24	43,19 ^a ± 4,39
Croma (C^*)	49,28 ^a ± 6,15	47,30 ^a ± 3,51	46,30 ^a ± 4,42
Hue (h^*)	70,37 ^a ± 4,01	71,89 ^a ± 3,16	67,82 ^a ± 6,33
Cor predominante	Amarelo	Amarelo	Amarelo-alaranjado

Nota: Resultados expressos em média ± desvio padrão (base seca). n = 10: número de frutos avaliados por palmeira. Polpas = polpa e casca de butiá. L*: luminosidade (0 = preto, 100 = branco); a*: coordenada do eixo verde (-) → vermelho (+); b*: coordenada do eixo azul (-) → amarelo (+); Croma (C^*): saturação ou intensidade da cor; Hue (h^*): ângulo de matiz, indicando tonalidade predominante (0° = vermelho, 90° = amarelo, 180° = verde, 270° = azul). Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre os experimentos ($p \leq 0,05$).

Essas variações podem estar relacionadas à exposição solar dos cachos e às condições microambientais durante o desenvolvimento dos frutos, tais como intensidade de radiação incidente, temperatura, umidade relativa, disponibilidade hídrica e características do solo, incluindo fertilidade e disponibilidade de nutrientes. Tais fatores influenciam diretamente o equilíbrio entre a degradação de clorofilas e o acúmulo de carotenoides, principalmente β -caroteno e xantofilas, compostos responsáveis pelas tonalidades amarelo-alaranjadas observadas (Hoffmann *et al.*, 2017; Zaccari Veiga; Del Puerto; Cabrera, 2021; Rodriguez-Amaya; Esquivel; Meléndez-Martínez, 2023). O aumento dos valores de Croma nas amostras mais amareladas também sugere maior saturação e uniformidade de cor, o que pode estar

associado a frutos em estágio mais avançado de maturação fisiológica (Amarante; Megguer, 2008).

Nas polpas, os valores médios de a^* e b^* apresentaram menor variação entre as amostras, mantendo-se predominantemente na faixa do amarelo, com valores de Hue próximos a 70° , o que indica homogeneidade cromática entre as amostras. Essa estabilidade na coloração da polpa é uma característica desejável para o processamento, pois reflete maior consistência pigmentária. Além disso, pode estar relacionada à presença de carotenoides termoestáveis, como β -caroteno e luteína, previamente identificados em polpas de *Butia eriospatha* (Beskow *et al.*, 2015; Wagner *et al.*, 2022b).

De modo geral, os resultados obtidos sugerem que, mesmo diante de variações climáticas durante o período de desenvolvimento, os frutos analisados mantiveram coloração típica de butiás maduros. Observou-se predominância de tons amarelo-alaranjados, reforçando a estabilidade dos carotenoides e a resiliência fisiológica da espécie. Esse comportamento evidencia a capacidade do butiazeiro de preservar atributos de qualidade visual sob diferentes condições ambientais (Cidón *et al.*, 2023).

Essa estabilidade de cor também constitui um indicador relevante de qualidade tecnológica dos frutos, uma vez que está associada à uniformidade de maturação e à integridade estrutural dos tecidos (Cangussu; Fronza; Cavalcanti, 2020). A uniformidade visual observada nas polpas pode sugerir menor variação no teor de umidade e maior coesão celular, influenciando no comportamento do fruto nas etapas de despulpagem, secagem e moagem. Assim, a avaliação do rendimento e das perdas de massa ao longo dessas etapas (Tabela 6) complementa a caracterização físico-química e colorimétrica, oferecendo uma visão mais abrangente do potencial de aproveitamento industrial dos frutos de *B. eriospatha*.

Os dados indicam variação expressiva nos rendimentos das etapas de processamento entre as palmeiras avaliadas, refletindo diferenças morfológicas individuais e a heterogeneidade natural dos frutos de *Butia eriospatha*. O rendimento médio de polpa *in natura* foi de 60,8%, com valores variando de 43,4% a 74,1%. Essa amplitude está associada principalmente à proporção entre caroço e mesocarpo, característica altamente variável entre indivíduos da espécie (Sganzerla, 2010; Hoffmann *et al.*, 2014; Ferrão *et al.*, 2023). Estudos prévios com populações de *B. eriospatha* relatam rendimentos de polpa entre 50% e 70%, confirmando que os

resultados obtidos se encontram dentro da faixa observada para frutos maduros coletados em diferentes regiões do Sul do Brasil (Candido-Ribeiro *et al.*, 2019; Sganzerla, 2010).

Tabela 6 – Rendimento e perda de massa (*Yield*) dos frutos de *Butia eriospatha* por palmeira e nas etapas de processamento.

POLPA DESIDRATADA				
Etapas de processamento/ Componente	Palmeira 1 (n = 2)	Palmeira 2 (n = 2)	Palmeira 3 (n = 2)	Média total
Fruto <i>in natura</i> (massa total) (g)	4135	6510	7796	6147
Caroço (massa bruto) (g)	1448	3685	2021	2385
Polpa <i>in natura</i> (g)	2687	2825	5775	3762
Rendimento de polpa <i>in natura</i> (%)	65,0	43,4	74,1	60,8
Polpa seca (g)	269	271	458	333
Rendimento de polpa seca (%)	10,0	9,6	7,9	9,2
Farinha moída grossa (g)	205	206	382	317
Farinha moída fina (60 mesh) (g)	60	65	70	65
Rendimento de farinha fina (%)	2,2	2,3	1,2	2,0
POLPA CONGELADA				
Etapas de processamento/ Componente	Palmeira 1 (n = 2)	Palmeira 2 (n = 2)	Palmeira 3 (n = 2)	Média total
Fruto <i>in natura</i> (massa total) (g)	7935	4040	5250	5742
Caroço (massa bruto) (g)	2940	1925	2450	2438
Polpa <i>in natura</i> (g)	4995	2115	2800	3303
Rendimento de polpa <i>in natura</i> (%)	62,9	52,4	53,3	56,2

Nota: n = 2: número de cachos coletados por palmeira. Polpa = polpa e casca de butiá. Os valores de massa (g) são apresentados como massa total processada. Os rendimentos (%) são calculados em relação ao fruto *in natura* (para polpa *in natura*) ou em relação à polpa *in natura* (para polpa seca e farinha fina).

As diferenças ambientais ao redor de cada palmeira também podem ter influenciado os rendimentos obtidos. No caso da palmeira 1, o menor rendimento de polpa pode estar ligado à presença de samambaias ou outras plantas invasoras na base da planta, que competem por luz, água e nutrientes. Essa competição reduz a disponibilidade de recursos essenciais para o desenvolvimento do mesocarpo e prejudica o acúmulo de açúcares e a expansão celular dos frutos (Deng *et al.*, 2023). A vegetação densa ao redor da palmeira também diminui a luminosidade disponível, reduzindo a taxa fotossintética e a alocação de carboidratos para os frutos. Esse efeito

é bem documentado tanto para espécies de sub-bosque quanto para palmáceas submetidas ao sombreamento (Wang *et al.*, 2024). Assim, o microambiente da palmeira 1 pode ter limitado seu vigor fisiológico e contribuído para o baixo rendimento observado, reforçando a importância dos fatores ambientais locais na variabilidade fenotípica de *Butia eriospatha*.

As diferenças nos valores de rendimento de polpa podem também estar relacionadas ao grau de maturação no momento da colheita, ao teor de umidade e à espessura do mesocarpo. Frutos mais maduros, com maior acúmulo de açúcares e maior teor de umidade, tendem a apresentar maior facilidade de separação da polpa, elevando o rendimento aparente. Por outro lado, a presença de fibras mais resistentes e a adesão da polpa ao endocarpo reduzem a eficiência de despulpagem, especialmente em frutos de menor diâmetro (Ventura, 2021).

O rendimento médio da polpa seca foi de 9,2%, correspondendo a uma expressiva redução da massa em relação à polpa *in natura*, o que reflete a elevada umidade inicial (aproximadamente 85–90%) característica da polpa de butiá. Esse valor é compatível com o comportamento esperado para frutos carnosos com alto teor de água e baixo teor de sólidos solúveis, nos quais a secagem resulta em significativa perda de massa. De modo semelhante, Macedo *et al.* (2020) e Girelli, Sant’Anna e Klein (2023) também observaram baixos rendimentos após a desidratação de polpas de *Butia* spp., evidenciando a influência direta da umidade inicial, das condições de secagem e da espessura das fatias sobre o rendimento final do produto desidratado.

Durante as etapas de moagem e peneiramento, verificou-se que a polpa desidratada apresentou comportamento altamente adesivo, resultando em acúmulo de material nas paredes da peneira e nas lâminas do liquidificador. Essa característica dificultou o fracionamento e reduziu o rendimento final da farinha de granulometria fina (média de 2,0%). O efeito pode estar associado ao elevado teor de açúcares solúveis presentes na polpa de butiá, os quais conferem maior plasticidade e pegajosidade ao material, especialmente em condições de menor teor de umidade (Hoffmann *et al.*, 2017; Magalhães *et al.*, 2017).

Estudos prévios com polpas de butiá demonstram que temperaturas mais elevadas de secagem reduzem o tempo de processamento e melhoram a qualidade final do produto (Macedo *et al.*, 2020). Além disso, pesquisas sobre pós alimentícios relatam que produtos ricos em açúcares solúveis e com atividade de água ainda relativamente elevada tendem a apresentar comportamentos de adesividade e

formação de aglomerados (*stickiness*) durante moagem ou peneiramento (Muzaffar; Nayik; Kumar, 2015; Ueda *et al.*, 2023).

Considerando o conjunto amostral, os resultados observados evidenciam boa recuperação de polpa e estabilidade de rendimento entre as amostras, demonstrando que os frutos analisados apresentam potencial tecnológico satisfatório para processamento tanto na forma congelada quanto desidratada. As perdas associadas às etapas subsequentes, especialmente na secagem e moagem, refletem características intrínsecas da matriz vegetal e podem ser otimizadas por ajustes de temperatura, granulometria e condições de peneiramento, visando ao aumento do aproveitamento industrial do *Butia eriospatha*.

A avaliação do rendimento nas diferentes etapas de processamento fornece subsídios importantes para a compreensão do comportamento tecnológico dos frutos de *B. eriospatha*. No entanto, além do desempenho físico, a caracterização centesimal da fração polpa-casca permite avaliar o potencial nutricional e funcional do fruto, revelando sua composição em macronutrientes e componentes estruturais que também influenciam nas etapas de secagem, moagem e armazenamento. A composição centesimal foi determinada em uma amostra composta, preparada a partir da mistura da polpa e da casca provenientes das três palmeiras coletadas, uma vez que essa fração foi utilizada como matriz única nas análises subsequentes. Assim, os teores de umidade, cinzas, lipídeos, proteínas, fibras alimentares e carboidratos totais estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição centesimal de polpa e casca de *Butia eriospatha* em base úmida.

Parâmetros	Resultados (%)
Umidade	85,91 ± 0,61
Cinzas	0,90 ± 0,01
Lipídeos	0,39 ± 0,14
Proteína bruta	0,91 ± 0,01
Fibra alimentar	2,15 ± 0,16
Carboidratos totais ¹	9,75 ± 0,01

Nota: Resultados expressos em média ± desvio padrão. ¹Calculado por diferença.

A fração polpa-casca de *B. eriospatha* apresentou elevado teor de umidade (85,91% ± 0,61), valor típico de frutos carnosos tropicais e consistente com o observado para outras espécies do gênero *Butia*, como *B. odorata* e *B. capitata*

(Sganzerla, 2010; Hoffmann *et al.*, 2014; Macedo *et al.*, 2020). O alto conteúdo hídrico confere textura suculenta e influencia diretamente na estabilidade e no tempo de conservação, exigindo processamento imediato ou a adoção de técnicas adequadas de preservação, como congelamento ou desidratação (Antunes *et al.*, 2024).

O conteúdo de cinzas ($0,90\% \pm 0,01$) reflete a presença moderada de minerais, valor compatível com o reportado para polpas de *B. odorata* (0,84–1,03%) e *B. capitata* (0,80–1,10%) (Hoffmann *et al.*, 2014; Beskow *et al.*, 2015). Essa fração mineral pode incluir elementos como potássio, cálcio e magnésio, que participam de processos metabólicos essenciais e podem influenciar aspectos sensoriais e nutricionais do fruto (Morais *et al.*, 2022).

O teor de lipídeos ($0,39\% \pm 0,14$) apresentou valor reduzido, característica comum às frações polposas de butiá, nas quais os compostos graxos concentram-se majoritariamente no endocarpo (amêndoa). Resultados semelhantes foram relatados por Beskow *et al.* (2015) e Wagner *et al.* (2022b), que encontraram valores entre 0,3 e 0,5%. Apesar da baixa proporção, essa fração pode conter ácidos graxos de relevância nutricional, como oleico e linoleico, cuja presença, ainda que discreta, pode contribuir para propriedades sensoriais ou para a estabilidade oxidativa de produtos processados (Ferrão *et al.*, 2023).

O percentual de proteína bruta ($0,91\% \pm 0,01$) manteve-se dentro da faixa descrita para *B. eriospatha* e *B. odorata* (0,8–1,2%) (Sganzerla, 2010; Antunes *et al.*, 2024). Embora em pequena quantidade, compostos nitrogenados e aminoácidos livres presentes na polpa podem participar de reações de escurecimento e contribuir para o desenvolvimento de compostos aromáticos durante o processamento térmico.

O valor de fibra alimentar ($2,15\% \pm 0,16$) indica que a polpa é fonte moderada de fibras solúveis e insolúveis, associadas à presença de pectinas e hemiceluloses no mesocarpo. Resultados próximos foram relatados por Beskow *et al.* (2015) e Ferrão *et al.* (2023), que destacam o potencial funcional dessas fibras na elaboração de produtos com apelo nutricional e tecnológico.

O teor de carboidratos totais ($9,75\% \pm 0,01$), calculado por diferença, representa a principal fração sólida da polpa. Essa composição confirma a natureza açucarada do butiá maduro, no qual predominam sacarose, glicose e frutose (Hoffmann *et al.*, 2017; Magalhães *et al.*, 2017). A elevada proporção de açúcares é responsável pelo sabor característico e contribui para o comportamento adesivo

observado nas etapas de moagem e peneiramento, típico de polpas ricas em sólidos solúveis.

De forma geral, a composição centesimal obtida evidencia o perfil típico de frutos do gênero *Butia*: alta umidade, predominância de carboidratos e baixos teores de lipídeos e proteínas. Esses resultados reforçam o potencial tecnológico e nutricional da espécie, tanto para o consumo *in natura* quanto para o desenvolvimento de produtos processados. Além disso, a presença de fibras e carboidratos solúveis tem relevância funcional, pois pode favorecer a retenção e estabilidade de compostos bioativos, como carotenoides e polifenóis, durante o processamento e armazenamento.

5.2 TESTES PRELIMINARES E SELEÇÃO DO NADES

A capacidade extrativa das três formulações de NADES testadas está descrita na Tabela 8.

Tabela 8 – Concentração de flavonoides totais em extratos de butiá obtidos com diferentes NADES.

NADES	Composição (mol/mol)	Flavonoides totais (mg QE/g)
1	ChCl-Gly 1:2	8,85 ^a ± 0,09
2	ChCl-TA 2:1	3,88 ^b ± 0,25
3	ChCl-LA 1:3	4,33 ^c ± 0,11

Nota: Resultados expressos em média ± desvio padrão (base seca). ChCl-Gly: cloreto de colina e glicerol; ChCl-TA: cloreto de colina e ácido tartárico; ChCl-LA: cloreto de colina e ácido láctico; QE: equivalentes de quercetina. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os experimentos ($p \leq 0,05$).

O solvente à base de cloreto de colina e glicerol extraiu duas vezes mais flavonoides (8,85 mg QE/g) quando comparado aos solventes em base ácida, que apresentaram valores de 3,88 mg QE/g para ChCl-TA e 4,33 mg QE/g para ChCl-LA. Esse desempenho pode ser associado às propriedades físico-químicas ideais e às intensas interações moleculares do sistema ChCl-Gly. A combinação entre o glicerol, um HBD poli-hidroxilado, e o cloreto de colina, um HBA derivado de quaternário de amônio, origina uma matriz eutética altamente interativa e de caráter menos polar em relação aos solventes formulados com ácidos orgânicos. Essa mistura permite a formação de múltiplas ligações de hidrogênio com grupos hidroxila e carboxila presentes nos flavonoides, além de interações adicionais por forças dipolo-dipolo e de

van der Waals. Tais interações contribuem para o aumento da solubilidade e da estabilidade desses compostos, promovendo sua eficiente liberação durante o processo extrativo (Sahu *et al.*, 2025).

Por ser considerado um HBD e HBA eficiente e termicamente estável, o cloreto de colina é capaz de reduzir a temperatura de fusão da mistura eutética e promover interações moleculares específicas, aumentando a afinidade solvente-soluto. Além disso, a viscosidade e a polaridade intermediárias do sistema ChCl-Gly proporcionam uma transferência de massa mais eficiente na extração assistida por ultrassom (UAE), principalmente sob condições otimizadas (Gómez-Urios *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025).

Essas características podem ser potencializadas em matrizes com pH naturalmente ácido, devido à semelhança de polaridade, tornando o ChCl-Gly um solvente verde promissor para a extração de flavonoides e outros compostos bioativos em frutas ácidas (Vargas-Serna; Ochoa-Martinez; Vélez-Pasos, 2022; Gómez-Urios *et al.*, 2023; Domínguez-Rodríguez *et al.*, 2025a; Li *et al.*, 2025).

5.3 CARACTERIZAÇÃO BIOATIVA DOS EXTRATOS

O planejamento Box–Behnken foi conduzido com o objetivo de avaliar os efeitos da relação soluto:solvente, temperatura e percentual de água no NADES sobre a extração de compostos bioativos da polpa de *Butia eriospatha*. Essa etapa exploratória buscou identificar as condições mais promissoras do sistema, direcionando o planejamento fatorial subsequente. Nessa fase, foram quantificados apenas os teores de flavonoides totais (FT) e carotenoides totais (CT), que se mostraram as respostas mais sensíveis para diferenciar o desempenho dos solventes. A determinação de compostos fenólicos totais (CFT) não foi incluída devido à interferência inicial do reagente de Folin-Ciocalteu com alguns NADES, o que exigiu ajustes metodológicos prévios. Os valores de FT e CT obtidos encontram-se na Tabela 9 e serviram de base para a definição das condições do planejamento fatorial 3².

Foram verificadas diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos para todos os compostos avaliados, com ampla variação nos valores obtidos. As concentrações de flavonoides totais variaram entre 5,97 e 8,33 mg QE/g e os carotenoides totais entre 45,95 e 146,93 mg β -caroteno/100 g.

Tabela 9 – Concentração de compostos bioativos em extratos de *Butia eriospatha* obtidos no planejamento Box-Behnken.

Ensaio	FT (mg QE/g)	CT (mg β -caroteno/100 g)
1	7,34 ^{abcde} $\pm$ 0,67	74,69 ^g $\pm$ 0,58
2	6,69 ^{cdef} $\pm$ 0,51	79,66 ^f $\pm$ 1,53
3	6,84 ^{bcdef} $\pm$ 0,17	56,24 ^k $\pm$ 1,11
4	8,23 ^a $\pm$ 0,53	95,00 ^d $\pm$ 2,26
5	7,81 ^{ab} $\pm$ 0,21	56,82 ^k $\pm$ 0,97
6	6,47 ^{def} $\pm$ 0,43	45,95 ^l $\pm$ 1,89
7	6,35 ^{ef} $\pm$ 0,10	82,84 ^e $\pm$ 1,50
8	7,83 ^{ab} $\pm$ 0,16	59,35 ^j $\pm$ 0,67
9	7,44 ^{abcd} $\pm$ 0,29	146,93 ^a $\pm$ 3,72
10	6,89 ^{bcdef} $\pm$ 0,24	70,51 ^h $\pm$ 1,29
11	7,06 ^{bcde} $\pm$ 0,41	62,46 ⁱ $\pm$ 3,40
12	5,97 ^f $\pm$ 0,23	76,21 ^g $\pm$ 3,42
13	8,34 ^a $\pm$ 0,39	110,31 ^b $\pm$ 0,69
14	6,59 ^{cdef} $\pm$ 0,31	111,08 ^b $\pm$ 2,30
15	7,53 ^{abc} $\pm$ 0,07	111,89 ^b $\pm$ 0,69
Etanol 50%	4,41 ^g $\pm$ 0,35	97,68 ^c $\pm$ 0,46

Nota: Resultados expressos em média $\pm$ desvio padrão (base seca). FT: flavonoides totais; CT: carotenoides totais; QE: equivalentes de quercetina. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os experimentos ($p \leq 0,05$).

A análise dos efeitos principais indicou que a razão soluto:solvente de 1:30 (m/m) proporcionou os melhores resultados para a maioria dos compostos, especialmente para os carotenoides. Essa tendência sugere que o aumento da proporção de solvente favorece a difusão dos compostos bioativos e reduz o gradiente de concentração entre a matriz vegetal e o solvente, aumentando a eficiência da extração. Resultados semelhantes foram observados em outros estudos com matrizes ricas em pigmentos e compostos fenólicos (Altemimi *et al.*, 2017; Rashid *et al.*, 2023).

Também foi observado que o percentual de água no NADES (25% m/m) apresentou o melhor desempenho geral, indicando equilíbrio entre viscosidade e polaridade do sistema. O teor de água influencia diretamente na força das ligações de hidrogênio entre os constituintes do solvente e, conseqüentemente, sua capacidade de solvatação. Pequenas quantidades de água favorecem a mobilidade molecular e a difusão dos compostos, ao passo que o excesso reduz a integridade da rede de

ligações de hidrogênio (Dai *et al.*, 2013; Lanjekar; Rathod, 2021). No entanto, quando a fração de água ultrapassa aproximadamente 50% (m/m), a estrutura eutética é prejudicada, resultando em menor eficiência de extração (Fanali *et al.*, 2021).

A temperatura destacou-se como a variável mais relevante, apresentando efeitos significativos isoladamente e em interação com as demais variáveis. Condições intermediárias favoreceram a solubilização e a liberação dos compostos bioativos, sem comprometer sua estabilidade térmica. Esse comportamento é consistente com os resultados obtidos em estudos utilizando polpas de *Butia* spp. e outras matrizes vegetais, nas quais a temperatura exerceu influência decisiva na difusão e na estabilidade de compostos fenólicos e carotenoides (Hoffmann *et al.*, 2017; Magalhães *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2023).

Os resultados obtidos no planejamento Box-Behnken reforçaram o potencial do NADES como solvente alternativo, especialmente considerando seu caráter biodegradável e sua seletividade ajustável por variação da composição. Considerando os efeitos significativos observados para a temperatura e suas interações com as demais variáveis, essa condição foi selecionada como principal fator de investigação na etapa seguinte.

Dessa forma, o planejamento fatorial 3^2 foi delineado para explorar, de forma mais detalhada, a influência da temperatura e do tempo de extração sobre o desempenho do ChCl-Gly, mantendo como variáveis constantes a razão soluto:solvente (1:30 m/m) e o percentual de água (25% m/m). Essa abordagem permitiu direcionar a otimização do processo e avaliar com maior precisão o potencial extrativo do sistema proposto.

Os resultados da extração assistida por ultrassom utilizando NADES (ChCl-Gly) sob diferentes condições de temperatura e tempo estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Concentração de compostos bioativos e atividade antioxidante em extratos de *Butia eriospatha* obtidos com NADES e etanol.

Ensaio	FT (mg QE/g)	CFT (mg GAE/g)	DPPH (mg TE/g)	ABTS (mg TE/g)	FRAP (mg TE/g)	CT (mg β -caroteno/100 g)	AA (mg AA/100 g)
1	6,81 ^b $\pm$ 0,24	128,42 ^c $\pm$ 3,05	108,52 ^{ab} $\pm$ 1,46	127,94 ^b $\pm$ 0,96	1005,15 ^{ab} $\pm$ 10,11	45,27 ^d $\pm$ 0,98	5,47 ^a $\pm$ 0,86
2	8,16 ^a $\pm$ 0,42	131,05 ^c $\pm$ 2,47	108,53 ^{ab} $\pm$ 1,14	124,76 ^b $\pm$ 3,31	993,84 ^b $\pm$ 7,75	85,64 ^b $\pm$ 3,56	5,47 ^a $\pm$ 0,86
3	8,27 ^a $\pm$ 0,56	129,77 ^c $\pm$ 4,38	112,20 ^a $\pm$ 1,97	127,76 ^b $\pm$ 6,90	1004,62 ^{ab} $\pm$ 4,55	93,48 ^a $\pm$ 4,74	4,97 ^{ab} $\pm$ 0,86
4	6,93 ^{ab} $\pm$ 0,34	155,09 ^b $\pm$ 2,31	113,26 ^a $\pm$ 1,24	126,59 ^b $\pm$ 3,34	1011,81 ^a $\pm$ 9,51	35,24 ^{ef} $\pm$ 2,82	4,97 ^{ab} $\pm$ 0,86
5	6,88 ^{ab} $\pm$ 0,44	166,45 ^a $\pm$ 5,47	112,64 ^a $\pm$ 1,96	132,42 ^{ab} $\pm$ 3,55	998,75 ^{ab} $\pm$ 12,95	33,35 ^f $\pm$ 1,22	4,44 ^{ab} $\pm$ 0,06
6	8,32 ^a $\pm$ 0,44	124,23 ^{cd} $\pm$ 3,03	111,29 ^a $\pm$ 1,18	141,47 ^a $\pm$ 0,99	1013,48 ^a $\pm$ 4,33	50,99 ^c $\pm$ 4,19	4,97 ^{ab} $\pm$ 0,86
7	5,20 ^c $\pm$ 0,64	122,97 ^{cd} $\pm$ 4,20	114,59 ^a $\pm$ 2,89	138,52 ^a $\pm$ 1,11	997,17 ^b $\pm$ 10,54	32,48 ^f $\pm$ 0,58	4,30 ^{ab} $\pm$ 0,30
8	6,86 ^{ab} $\pm$ 0,39	123,04 ^{cd} $\pm$ 3,24	112,89 ^a $\pm$ 4,40	128,68 ^b $\pm$ 2,11	1001,62 ^b $\pm$ 3,65	35,48 ^{ef} $\pm$ 3,09	4,97 ^{ab} $\pm$ 0,86
9	7,60 ^a $\pm$ 0,33	129,14 ^c $\pm$ 3,46	111,32 ^a $\pm$ 3,60	131,46 ^{ab} $\pm$ 4,84	988,66 ^b $\pm$ 9,09	39,21 ^e $\pm$ 2,02	4,31 ^{ab} $\pm$ 0,28
Etanol 50%	4,65 ^c $\pm$ 0,51	113,70 ^e $\pm$ 2,99	103,54 ^c $\pm$ 0,84	137,13 ^a $\pm$ 2,43	742,53 ^c $\pm$ 13,26	32,98 ^f $\pm$ 0,46	4,15 ^b $\pm$ 0,28

Nota: Resultados expressos em média $\pm$ desvio padrão (base seca). FT: flavonoides totais; CFT: compostos fenólicos totais; DPPH: método de captura do radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil; ABTS: método de captura do radical 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico); FRAP: método por redução de ferro; CT: carotenoides totais; AA: ácido ascórbico; QE: equivalentes de quercetina; GAE: equivalentes de ácido gálico; TE: equivalentes de Trolox. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os experimentos ($p \leq 0,05$).

Os resultados obtidos demonstram a elevada eficiência do sistema de extração baseado em solvente eutético profundo natural (NADES ChCl–Gly) assistido por ultrassom (UAE) na recuperação de compostos bioativos da polpa de *Butia eriospatha*. O desempenho do NADES superou ou se manteve equivalente ao do etanol 50% (v/v) em todos os parâmetros avaliados, confirmando o potencial técnico e ambiental dessa abordagem. Essa superioridade está associada à ação sinérgica entre o ambiente eutético, de caráter altamente interativo, e os efeitos físicos da cavitação ultrassônica, que atuam de maneira complementar na ruptura das estruturas celulares, na redução das resistências difusivas e na estabilização química dos compostos extraídos (Basiljkov *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2018; Jamshaid; Ahmed, 2022; Tebbi *et al.*, 2023; He *et al.*, 2024).

Os compostos fenólicos totais (CFT) apresentaram valores entre 122,97 e 166,45 mg GAE/g, enquanto os flavonoides totais (FT) variaram de 5,20 a 8,32 mg QE/g, ambos significativamente superiores aos valores do extrato etanólico (113,70 mg GAE/g e 4,65 mg QE/g, respectivamente). Esse incremento pode ser atribuído à forte capacidade de ligação por pontes de hidrogênio do NADES, composto por cloreto de colina (HBA) e glicerol (HBD). A rede supramolecular formada entre esses componentes permite interações simultâneas com grupos hidroxila e carboxila dos fenólicos, promovendo solvatação eficiente e estabilização intermolecular (Dai *et al.*, 2013; Abbott *et al.*, 2011; Craveiro *et al.*, 2016). Além disso, a viscosidade moderada e a polaridade ajustável do NADES favorecem a difusão dos metabólitos, reduzindo perdas por oxidação ou polimerização, fenômenos frequentes em solventes orgânicos voláteis (Fuentes *et al.*, 2019; Misan *et al.*, 2020).

A aplicação de ultrassom amplificou esse efeito por meio da cavitação acústica, que gera microjatos e choques hidrodinâmicos capazes de romper paredes e membranas celulares. A combinação dessas forças mecânicas com o ambiente eutético resulta em maior disponibilidade de compostos intracelulares, acelerando a extração mesmo em tempos reduzidos e temperaturas moderadas (Ferreira *et al.*, 2020; Tebbi *et al.*, 2023; He *et al.*, 2024). Essa intensificação do transporte de massa é observada em diversos sistemas NADES/UAE, que permitem rendimentos elevados sem degradação térmica, especialmente em matrizes ricas em polifenóis e pigmentos naturais (Zhou *et al.*, 2018; Lanjekar; Rathod, 2021; Jamshaid; Ahmed, 2022).

As diferenças visuais entre os extratos obtidos nas diferentes condições do planejamento fatorial podem ser observadas na Figura 11, que ilustra a coloração

característica dos extratos obtidos com NADES e com etanol 50% (v/v), evidenciando variações associadas à composição do solvente e à temperatura de extração.

Figura 11 - Aspecto visual dos extratos de *Butia eriospatha*.



Fonte: A autora.

Os carotenoides totais (CT) apresentaram amplitude expressiva, entre 32,48 e 93,48 mg β -caroteno/100 g, com teores até três vezes superiores aos obtidos com etanol (32,98 mg β -caroteno/100 g). Essa diferença evidencia a afinidade do NADES pela fração lipofílica da matriz, resultado da sua polaridade intermediária e da presença de glicerol, que atua como agente estabilizante. O glicerol contribui para reduzir a isomerização e a oxidação dos carotenoides, formando microambientes protetores e menos suscetíveis à oxigenação (Rodriguez-Amaya *et al.*, 2023; Antunes *et al.*, 2024). A cavitação ultrassônica potencializa a liberação desses pigmentos ao romper os complexos lipídico-proteicos do mesocarpo, permitindo maior recuperação e estabilidade dos pigmentos durante o processo (Silva *et al.*, 2023; Tebbi *et al.*, 2023).

O ácido ascórbico (AA) variou de 4,30 a 5,46 mg/100 g, apresentando leve incremento em relação ao solvente etanólico (4,14 mg/100 g). Apesar de ser um composto altamente instável, os resultados sugerem que o NADES atua como meio

protetor contra oxidação, reduzindo a difusão de oxigênio e estabilizando a molécula por interações intermoleculares. Solventes eutéticos contendo glicerol e cloreto de colina já foram associados à maior retenção de compostos termolábeis, justamente por formarem microestruturas densas e de baixa volatilidade (Abbott *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2018; Freitas; Cavaco-Paulo; Silva, 2024).

Os parâmetros de atividade antioxidante (DPPH, ABTS e FRAP) corroboram o desempenho superior do NADES. Os valores variaram de 108,5 a 114,6 mg TE/g para DPPH, 124,7 a 141,5 mg TE/g para ABTS e 988,6 a 1013,5 mg TE/g para FRAP, enquanto o extrato etanólico apresentou 103,5, 137,1 e 742,5 mg TE/g, respectivamente. Esses resultados evidenciam que o sistema NADES/UAE proporcionou maior capacidade redutora e de sequestro de radicais livres, indicando extração mais eficiente de compostos bioativos e maior estabilidade química durante o processo. A eficiência observada nos ensaios FRAP mostra que o sistema favorece a extração de compostos com alto potencial redutor, enquanto os resultados de DPPH e ABTS demonstram ampla capacidade de neutralização de radicais tanto lipofílicos quanto hidrofílicos, reforçando a versatilidade do solvente. Essas evidências corroboram estudos recentes que relatam desempenho superior de solventes eutéticos na recuperação de compostos antioxidantes por ultrassom, principalmente devido à sua maior estabilidade térmica, polaridade ajustável e interação seletiva com grupos funcionais ativos (Lanjekar; Rathod, 2021; Silva *et al.*, 2023; Girelli *et al.*, 2023).

Além das diferenças absolutas entre os solventes, a relação entre o teor de compostos bioativos e a atividade antioxidante foi avaliada por meio da análise de correlação de Pearson, considerando separadamente os ensaios realizados com NADES (ensaios 1 a 9) e o extrato etanólico. Para os extratos obtidos com NADES, as correlações entre compostos fenólicos totais (CFT) e os ensaios antioxidantes mostraram associações fracas e estatisticamente não significativas, com coeficientes de correlação de $r = 0,11$ para DPPH ($p = 0,78$), $r = -0,23$ para ABTS ($p = 0,55$) e $r = 0,19$ para FRAP ($p = 0,63$). De forma semelhante, os flavonoides totais (FT) apresentaram correlação moderada e negativa com o ensaio DPPH ($r = -0,54$; $p = 0,14$), além de correlações fracas com ABTS ($r = -0,22$; $p = 0,57$) e FRAP ($r = 0,15$; $p = 0,70$), sem significância estatística ($p > 0,05$).

Esses resultados indicam que, nos sistemas baseados em NADES, a atividade antioxidante não está associada exclusivamente ao teor total de fenólicos ou flavonoides, mas sim ao efeito combinado e sinérgico de diferentes classes de

compostos bioativos, incluindo carotenoides e ácido ascórbico, bem como às interações promovidas pelo ambiente eutético. Tal comportamento é característico de matrizes vegetais complexas e de sistemas extrativos altamente interativos, nos quais múltiplos metabólitos contribuem simultaneamente para o potencial antioxidante, conforme discutido para extratos vegetais e sistemas eutéticos profundos (Dai *et al.*, 2013; Denardin *et al.*, 2015; Misan *et al.*, 2020; Moraes *et al.*, 2022).

Em contraste, o extrato obtido com etanol 50% apresentou menores valores absolutos de compostos fenólicos e de atividade antioxidante, além de desempenho inferior em todos os parâmetros avaliados, reforçando a menor eficiência do solvente convencional tanto na extração quanto na estabilização dos compostos bioativos. Assim, embora as correlações lineares não tenham sido significativas, os resultados absolutos e o desempenho funcional global evidenciam a superioridade do sistema NADES ChCl–Gly/UAE.

A ausência de correlações lineares fortes, aliada à elevada atividade antioxidante observada, justifica a escolha de flavonoides totais, compostos fenólicos totais e ensaios antioxidantes como respostas-chave no processo de otimização apresentado na seção seguinte, uma vez que essas variáveis refletem de forma integrada o desempenho extrativo, a estabilidade química e a funcionalidade dos extratos obtidos.

Essa sinergia observada entre o NADES e o ultrassom está associada à redução das barreiras difusivas e à preservação estrutural dos compostos extraídos. Enquanto o ultrassom rompe fisicamente as células e dispersa os metabólitos, o NADES atua quimicamente estabilizando as moléculas liberadas e prevenindo sua degradação. Essa combinação de efeitos físicos e químicos explica o desempenho superior aos solventes convencionais e demonstra que a intensificação de processos por cavitação, quando associada a solventes verdes, pode substituir com eficiência os extratores orgânicos tradicionais (Basiljkov *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2018; He *et al.*, 2024).

Os resultados também destacam a relação entre os parâmetros de extração e o perfil químico dos extratos. Condições intermediárias de temperatura (50–60 °C) mostraram-se ideais para maximizar os teores de compostos fenólicos e carotenoides, enquanto tempos de extração prolongados não apresentaram ganhos significativos, sugerindo equilíbrio dinâmico entre extração e degradação. Essa tendência reforça que o controle térmico é determinante para preservar compostos antioxidantes e evitar

reações de isomerização e oxidação, sobretudo em sistemas ricos em pigmentos (Chen; Zhao; Yu, 2015; Peron; Fraga; Antelo, 2017; Silva *et al.*, 2023; Das; Nayak; Kesavan, 2022).

De forma integrada, o sistema NADES ChCl–Gly/UAE demonstrou capacidade extrativa ampliada e estabilidade química superior à do etanol 50% (v/v), confirmando sua viabilidade tecnológica e ambiental para o aproveitamento de compostos bioativos de *B. eriospatha*. O uso de um solvente biodegradável e atóxico aliado a uma técnica de intensificação limpa reforça o caráter sustentável do processo, além de abrir perspectivas para aplicação em formulações alimentícias, farmacêuticas e cosméticas baseadas em recursos nativos. A integração entre eficiência extrativa, preservação bioquímica e baixo impacto ambiental consolida o sistema NADES/ultrassom como alternativa promissora para a valorização de espécies do gênero *Butia* e outras frutas subutilizadas dos biomas nacionais.

5.4 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO

Com base nos resultados obtidos no planejamento fatorial 3², realizou-se a otimização das condições de extração visando maximizar o rendimento de compostos bioativos e a atividade antioxidante dos extratos de *Butia eriospatha*. A análise estatística permitiu o ajuste dos modelos quadráticos e a construção das superfícies de resposta para flavonoides totais (FT), compostos fenólicos totais (CFT), ABTS e carotenoides totais (CT). Os coeficientes de regressão lineares e quadráticos significativos, bem como os valores de R² ajustado, encontram-se na Tabela 11.

A partir dos modelos ajustados, aplicou-se a função de desejabilidade tanto individualmente quanto de forma simultânea, visando maximizar as quatro respostas avaliadas. Essa abordagem permitiu identificar as condições de melhor desempenho geral e compreender os efeitos específicos das variáveis de processo sobre cada grupo de compostos.

A otimização foi conduzida mantendo constantes a razão soluto:solvente (1:30 m/m) e o percentual de água no NADES (25% m/m), previamente definidos como ideais na etapa anterior. As variáveis independentes avaliadas foram a temperatura e o tempo de extração, dentro dos limites experimentais estabelecidos no planejamento.

Tabela 11 - Coeficientes de regressão significativos dos modelos ajustados para as variáveis dependentes.

Variável dependente	Fatores	Coef. de regressão	Erro padrão	t-valor	p-valor	-95% de confiança	+95% de confiança
FT (mg QE/g)	Constante	6,882	0,252	27,305	<0,001	6,353	7,412
	X ₁ (L)	-0,648	0,178	-3,641	0,002	-1,023	-0,275
	X ₂ (L)	0,693	0,178	3,890	0,001	0,319	1,068
	X ₂ (Q)	0,742	0,309	2,404	0,027	0,094	1,391
	R ² ajustado	0,818					
	p <i>lack-of-fit</i>	0,412					
CFT (mg GAE/g)	Constante	134,461	0,700	192,024	<0,001	132,990	135,933
	X ₁ (L)	-2,349	0,858	-2,739	0,014	-4,151	-0,547
	X ₁ (Q)	10,596	0,743	14,267	<0,001	9,036	12,156
	X ₂ (L)	-3,882	0,858	-4,355	<0,001	-5,691	-2,073
	X ₂ (Q)	4,289	0,743	5,775	<0,001	2,729	5,850
	R ² ajustado	0,943					
ABTS (mg TE/g)	Constante	132,418	2,049	64,628	<0,001	128,113	136,722
	X ₁ (Q)	-5,694	2,509	-2,269	0,036	-10,967	-0,422
	X ₂ (L)	7,440	1,449	5,135	<0,001	4,396	10,484
	R ² ajustado	0,667					
	p <i>lack-of-fit</i>	0,119					
CT (mg β-caroteno/100 g)	Constante	50,124	0,563	89,014	<0,001	48,941	51,307
	X ₁ (L)	-19,531	0,690	-28,320	<0,001	-20,980	-18,082
	X ₁ (Q)	-7,956	0,597	-12,889	<0,001	-8,954	-6,435
	X ₂ (L)	11,747	0,690	17,088	<0,001	10,336	13,234
	R ² ajustado	0,988					
	p <i>lack-of-fit</i>	0,167					

Notas: FT: flavonoides totais; CFT: compostos fenólicos totais; ABTS: método de captura do radical 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico); CT: carotenoides totais. X₁ = temperatura (°C); X₂ = tempo de extração (min); L = efeito linear; Q = efeito quadrático; QE: equivalentes de quercetina; GAE: equivalentes de ácido gálico; TE: equivalentes de Trolox. Apenas coeficientes com p < 0,05 foram incluídos.

As condições ótimas de extração foram determinadas pela função de desejabilidade, considerando as respostas individuais e a desejabilidade global (FT, CFT, ABTS e CT simultaneamente). A desejabilidade global máxima foi alcançada a 41 °C e 60 min, condições que também favoreceram o desempenho individual para

FT. Para ABTS, a condição ótima ocorreu a 48 °C e 60 min; para CFT, 49 °C e 37,5 min; e para CT, 30 °C e 52,5 min. Esse comportamento indica que CFT e ABTS respondem melhor a temperaturas intermediárias, enquanto os carotenoides apresentam maior sensibilidade térmica, refletindo o comportamento distinto da fração lipofílica em relação aos compostos polares.

A proximidade entre as condições ótimas de CFT e ABTS sugere forte associação entre o teor de fenólicos totais e o potencial antioxidante hidrofílico do extrato, relação amplamente descrita para matrizes vegetais (Pereira *et al.*, 2009; Denardin *et al.*, 2015; Moraes *et al.*, 2022). Por outro lado, a divergência observada para CT indica que os mecanismos de transferência de massa e a estabilidade térmica dos carotenoides seguem dinâmica distinta, reforçando a necessidade de compromissos quando múltiplas respostas são otimizadas simultaneamente (Rodriguez-Concepcion *et al.*, 2018; Martins; Ferreira, 2017; Rodriguez-Amaya; Esquivel; Meléndez-Martínez, 2023).

Os valores preditos, experimentais e os intervalos de confiança obtidos para cada resposta, bem como para a desejabilidade global, são apresentados nas Tabelas 12 e 13, permitindo avaliar a precisão do modelo e a eficiência das condições otimizadas.

Tabela 12 – Comparação entre valores preditos e experimentais de compostos bioativos e atividade antioxidante em extratos otimizados de *Butia eriospatha*, considerando as respostas individuais.

Variável dependente	Valores preditos	IC -95%	IC +95%	Experimental individual
FT (mg QE/g)	8,39	7,93	8,86	8,26 ± 0,12
CFT (mg GAE/g)	167,56	163,82	171,29	166,05 ± 0,79
ABTS (mg TE/g)	141,54	137,25	145,83	139,92 ± 2,06
CT (mg β-caroteno/100 g)	93,63	90,62	96,64	124,27 ± 2,53

Nota: Resultados experimentais individuais expressos em média ± desvio padrão (base seca). FT: flavonoides totais; CFT: compostos fenólicos totais; ABTS: método de captura do radical 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico); CT: carotenoides totais; IC: intervalo de confiança; QE: equivalentes de quercetina; GAE: equivalentes de ácido gálico; TE: equivalentes de Trolox.

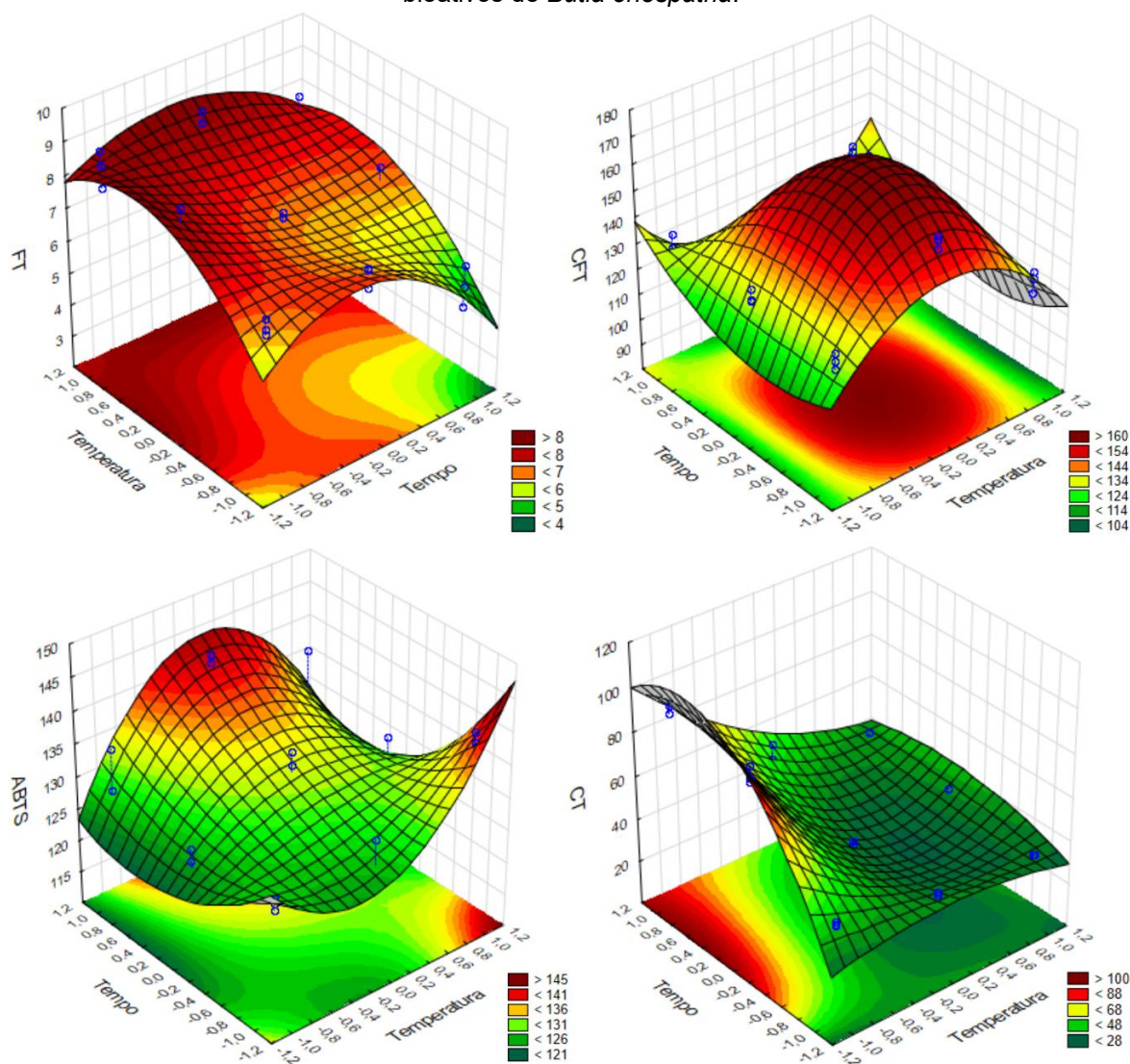
As superfícies de resposta obtidas para cada variável dependente estão apresentadas na Figura 12, permitindo visualizar a influência simultânea da temperatura e do tempo de extração sobre os teores de compostos bioativos e a atividade antioxidante dos extratos.

Tabela 13 – Comparação entre valores preditos e experimentais de compostos bioativos e atividade antioxidante em extratos otimizados de *Butia eriospatha*, considerando a resposta global.

Variável dependente	Valores preditos	IC -95%	IC +95%	Experimental Global
FT (mg QE/g)	8,39	7,93	8,86	8,14 ± 0,07
CFT (mg GAE/g)	125,34	121,47	129,22	129,01 ± 1,60
ABTS (mg TE/g)	138,44	134,67	142,23	135,02 ± 1,58
CT (mg β -caroteno/100 g)	65,62	62,50	68,73	63,83 ± 1,45

Nota: Resultados experimentais gerais expressos em média $\pm$ desvio padrão (base seca). FT: flavonoides totais; CFT: compostos fenólicos totais; ABTS: método de captura do radical 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico); CT: carotenoides totais; IC: intervalo de confiança; QE: equivalentes de quercetina; GAE: equivalentes de ácido gálico; TE: equivalentes de Trolox.

Figura 12 - Superfícies de resposta e gráficos de contorno no ponto ótimo de extração de compostos bioativos de *Butia eriospatha*.



Fonte: A autora.

Considerando o conjunto dos resultados, observou-se boa concordância entre os valores preditos e experimentais, confirmando a adequação dos modelos quadráticos e a confiabilidade da metodologia de desejabilidade empregada. As condições otimizadas resultaram em valores máximos preditos de 8,39 mg QE/g para flavonoides totais (FT), 167,55 mg GAE/g para compostos fenólicos totais (CFT), 141,54 mg TE/g para ABTS e 93,63 mg β -caroteno/100 g para carotenoides totais (CT). Os valores experimentais individuais apresentaram variação inferior a 5% em relação aos preditos para FT e ABTS, demonstrando elevada precisão do modelo e reforçando a reprodutibilidade do sistema NADES/UAE.

Para os compostos fenólicos totais, a estreita aproximação entre o valor experimental (166,05 mg GAE/g) e o predito (167,56 mg GAE/g) confirma que o modelo descreveu adequadamente o comportamento da extração, permitindo identificar as condições que promovem máxima liberação desses metabólitos. Esse resultado é particularmente relevante considerando que os fenólicos constituem a principal fração antioxidante hidrofílica do butiá e sua recuperação é fortemente influenciada pela polaridade do solvente e pelas condições de cavitação ultrassônica (Denardin *et al.*, 2015; Carvalho; Conte-Júnior, 2021; Moraes *et al.*, 2022).

Os valores experimentais para os carotenoides apresentaram um comportamento distinto, ultrapassando o limite superior do intervalo de confiança do modelo (124,27 mg β -caroteno/100 g). Esse resultado sugere a presença de efeitos sinérgicos não capturados completamente pela modelagem estatística, possivelmente associados à maior solubilização lipofílica no NADES e à proteção oxidativa conferida por sua rede de ligações de hidrogênio. A literatura aponta que solventes eutéticos, especialmente aqueles contendo glicerol, podem melhorar a estabilidade e a extração de pigmentos apolares ao formar microambientes protetores contra degradação térmica e oxidativa (Rodriguez-Amaya *et al.*, 2023; Antunes *et al.*, 2024).

A análise conjunta das desejabilidades individuais e global demonstra que as condições otimizadas foram adequadas para maximizar simultaneamente compostos de naturezas químicas distintas, com bom equilíbrio entre as frações hidrofílica (fenólicos e flavonoides) e lipofílica (carotenoides). A boa correspondência entre os valores preditos e experimentais evidencia a robustez do modelo e reforça a aplicabilidade do sistema NADES/ultrassom como tecnologia eficiente, previsível e ambientalmente segura para a obtenção de extratos bioativos de *Butia eriospatha*.

5.5 ESTABILIDADE DOS EXTRATOS OTIMIZADOS

A avaliação da estabilidade dos extratos é essencial para determinar sua viabilidade de aplicação e seu comportamento sob diferentes condições de processamento e armazenamento. Mesmo quando um sistema extrativo apresenta alta eficiência na recuperação de compostos bioativos, a manutenção da integridade química dessas moléculas é determinante para preservar sua atividade funcional e o valor tecnológico do produto final.

Nesse contexto, foram conduzidos ensaios de estabilidade térmica e fotoquímica com o extrato otimizado para compostos fenólicos totais (CFT) de *Butia eriospatha*, obtido com NADES ChCl–Gly assistido por ultrassom, a fim de avaliar a resistência dos compostos frente à exposição ao calor e à luz. Essas condições simulam situações comuns em processos industriais, como secagem, concentração e armazenamento sob iluminação. Os resultados permitem compreender não apenas o comportamento de degradação dos compostos antioxidantes, mas também a eficiência do solvente eutético como meio estabilizante dos metabólitos extraídos.

A avaliação da estabilidade térmica dos extratos teve como objetivo verificar a resistência dos compostos fenólicos frente à degradação induzida pelo calor. Além disso, buscou-se compreender o comportamento cinético da perda desses compostos em diferentes condições de temperatura e tempo de exposição. A determinação desses parâmetros é fundamental para prever o desempenho dos extratos em etapas tecnológicas subsequentes, como concentração, secagem ou incorporação em matrizes alimentícias, além de estimar sua vida útil em condições de armazenamento. O NADES (ChCl–Gly), por sua composição e pela capacidade de formar redes extensas de ligações de hidrogênio, é reconhecido por conferir maior estabilidade a compostos termossensíveis, reduzindo a volatilização de solventes e a difusão de oxigênio (Dai *et al.*, 2013; Craveiro *et al.*, 2016; Misan *et al.*, 2020).

Conforme apresentado na Tabela 14, o teor de CFT do extrato otimizado de *Butia eriospatha* manteve-se praticamente constante após o aquecimento nas temperaturas avaliadas (60, 70 e 80 °C) por até 120 min. As variações observadas foram inferiores a 2% em relação ao valor inicial ($CFT_0 = 166,05$ mg GAE/g), sem diferença estatística significativa ($p > 0,05$) entre os tempos e temperaturas testados. O parâmetro CFT/CFT_0 permaneceu muito próximo da unidade em todas as condições, indicando ausência de degradação relevante e sugerindo alta estabilidade

térmica do extrato. Esse comportamento contrasta com o comumente observado em sistemas aquosos ou etanólicos, nos quais as perdas de compostos fenólicos aumentam exponencialmente acima de 60 °C (Mercali *et al.*, 2013; Peron; Fraga; Antelo, 2017).

Tabela 14 – Teor de compostos fenólicos totais (CFT) do extrato obtido nas condições ótimas de extração, após aquecimento em diferentes temperaturas e tempos de exposição.

Temperatura (° C)	Tempo (min)	CFT (mg GAE/g)	CFT/CFT ₀
60	0	166,05 ^a ± 0,79	1,00
60	15	165,41 ^a ± 1,37	0,996
60	30	162,13 ^a ± 5,97	0,976
60	60	165,32 ^a ± 1,04	0,996
60	120	166,23 ^a ± 1,80	1,001
70	0	166,05 ^a ± 0,79	1,000
70	15	167,79 ^a ± 0,88	1,010
70	30	166,78 ^a ± 0,55	1,004
70	60	167,15 ^a ± 0,96	1,007
70	120	166,05 ^a ± 1,92	1,000
80	0	166,05 ^a ± 0,79	1,000
80	15	166,69 ^a ± 1,38	1,004
80	30	167,06 ^a ± 1,45	1,006
80	60	164,32 ^a ± 2,34	0,989
80	120	163,68 ^a ± 1,92	0,986

Nota: Resultados expressos em média ± desvio padrão (base seca). CFT: compostos fenólicos totais; GAE: equivalentes de ácido gálico. O teor de compostos fenólicos no tempo zero (t₀) corresponde ao valor médio obtido nas condições ótimas de extração, utilizado como referência inicial para o cálculo de CFT/CFT₀. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os experimentos (p ≤ 0,05).

A análise cinética indicou que a degradação dos compostos fenólicos seguiu um modelo de primeira ordem aparente, com valores de k entre 10^{-4} e 10^{-5} min^{-1} e tempos de meia-vida ($t_{1/2}$) superiores a 5000 min (Tabela 15), refletindo degradação mínima e comportamento praticamente estável ao longo do tempo de ensaio. Embora o aumento da temperatura tenha promovido discreta elevação nos valores de k , o padrão observado indica que o sistema NADES proporcionou proteção efetiva contra reações de oxidação térmica, possivelmente devido à sua elevada densidade intermolecular e à redução da disponibilidade de oxigênio dissolvido. Esses resultados

são compatíveis com estudos prévios que relatam menor susceptibilidade térmica de extratos obtidos com solventes eutéticos, em comparação com solventes orgânicos convencionais (Misan *et al.*, 2020; Girelli *et al.*, 2023).

Tabela 15 – Parâmetros cinéticos e termodinâmicos da degradação térmica dos compostos fenólicos totais entre 60 e 80 °C.

Temperatura (°C)	T (K)	k (h ⁻¹)	t _{1/2} (h)	Ea (kJ/mol)	ΔH (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)	ΔS (J/mol·K)
60	333.15	0.0078	88.92	19.67	16.9	118.03	-303.53
70	343.15	0.0048	143.96	19.67	16.82	123.03	-309.51
80	353.15	0.0118	58.67	19.67	16.74	124.06	-303.91

Nota: T: temperatura absoluta; k: constante de velocidade de degradação; t_{1/2}: tempo de meia-vida; Ea: energia de ativação; ΔH: variação de entalpia; ΔG: energia livre de Gibbs (dependente da temperatura); ΔS: variação de entropia.

Os valores obtidos para os parâmetros termodinâmicos reforçam o comportamento estável observado no teor de CFT ao longo do aquecimento. A energia de ativação relativamente baixa ($Ea \approx 19,7 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) indica que a degradação dos compostos fenólicos totais requer pouca energia para ocorrer; no entanto, na prática, essa reação é limitada pela baixa constante de velocidade (k), o que resultou em tempos de meia-vida elevados. Os valores de entalpia (ΔH) foram próximos à Ea , evidenciando um processo endotérmico suave, compatível com reações de rearranjo molecular de baixa intensidade energética. Já a energia livre de Gibbs (ΔG), com valores elevados (118–124 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), indica que as reações de degradação são não espontâneas sob as condições avaliadas, reafirmando a resistência térmica do sistema (Ahmed *et al.*, 2019; Chandra *et al.*, 2018).

A entropia negativa ($\Delta S < 0$) sugere a formação de um estado de transição mais organizado que os reagentes, comportamento típico de sistemas nos quais a matriz extrativa restringe a mobilidade das moléculas. Esse padrão é coerente com a estrutura altamente organizada dos NADES, especialmente aqueles formados por cloreto de colina e glicerol, nos quais extensas redes de ligações de hidrogênio reduzem a difusão de espécies reativas e limitam o acesso ao oxigênio dissolvido. Tal característica contribui diretamente para a estabilização de compostos fenólicos termossensíveis, conforme amplamente discutido na literatura (Dai *et al.*, 2013; Craveiro *et al.*, 2016; Misan *et al.*, 2020).

Esses resultados corroboram a proteção conferida pelo NADES ChCl–Gly e confirmam a resistência térmica do extrato. De modo geral, os dados demonstram que

o extrato otimizado de *B. eriospatha* apresenta elevada estabilidade até 80 °C, sem perdas significativas durante 120 min de aquecimento. Esse comportamento reforça o potencial tecnológico do NADES (ChCl–Gly) como solvente de extração e meio de preservação, conferindo maior resistência ao calor e viabilizando processos térmicos subsequentes, como concentração e secagem. A manutenção do teor de CFT sob aquecimento evidencia que o sistema eutético atua não apenas como agente extrator, mas também como matriz protetora de compostos bioativos, minimizando reações de degradação e ampliando a aplicabilidade industrial dos extratos.

Além disso, a estabilidade observada até 80 °C indica que o extrato pode ser empregado em produtos submetidos a tratamentos térmicos moderados, como pasteurizações lenta e rápida. Processos como a pasteurização HTST (*High Temperature, Short Time*), normalmente conduzida entre 71 e 75 °C por 15–30 s, ou a pasteurização lenta a 63–65 °C por 30 min, são amplamente aplicados na indústria de alimentos e bebidas para inativação microbiana. Nessas condições, perdas significativas de compostos fenólicos totais e redução da atividade antioxidante são frequentemente relatadas quando solventes aquosos ou etanólicos são utilizados (Mercali *et al.*, 2013; Peron; Fraga; Antelo, 2017; Hoffmann *et al.*, 2017; Girelli *et al.*, 2023). Assim, a resistência térmica do extrato obtido com NADES sugere que sua incorporação em matrizes processadas termicamente, como sucos, néctares, bebidas funcionais e produtos lácteos, pode ser realizada sem comprometimento da composição bioativa. Isso amplia o escopo de aplicações industriais e reforça a relevância do NADES como meio protetor durante tratamentos térmicos.

A estabilidade fotoquímica dos extratos foi avaliada para verificar a susceptibilidade dos compostos fenólicos à degradação por exposição à luz. Esse parâmetro é particularmente importante para produtos destinados a aplicações alimentícias e cosméticas, nas quais a exposição luminosa pode desencadear reações oxidativas, afetando coloração e bioatividade. O NADES (ChCl–Gly), por sua natureza não volátil e pela capacidade de formar microambientes densos e hidrogenados, tende a limitar a penetração de oxigênio e a dissipação de energia luminosa, atuando como um sistema de proteção física e química (Abbott *et al.*, 2011; Craveiro *et al.*, 2016).

Conforme apresentado na Tabela 16, o teor de compostos fenólicos totais permaneceu estável após exposição contínua à luz por até 96 horas a 24 °C. Os valores oscilaram entre 163,40 e 164,59 mg GAE/g, com variações inferiores a 1% em

relação à concentração inicial ($CFT_0 = 163,86 \text{ mg GAE/g}$), sem diferença estatística significativa ($p > 0,05$). O parâmetro CFT/CFT_0 manteve-se próximo de 1 em todos os intervalos de tempo, indicando ausência de degradação fotossensível e destacando a resistência dos compostos fenólicos à radiação luminosa sob as condições avaliadas.

Tabela 16 – Teor de compostos fenólicos totais (CFT) do extrato obtido nas condições ótimas de extração, após exposição à luz, em diferentes tempos de armazenamento.

Tempo (horas)	CFT (mg GAE/g)	CFT/CFT ₀
0	163,86 ^a ± 1,56	1,00
3	163,50 ^a ± 1,45	0,998
19	163,40 ^a ± 1,14	0,997
24	164,59 ^a ± 0,55	1,004
48	164,59 ^a ± 0,72	1,004
72	164,41 ^a ± 0,88	1,003
96	163,95 ^a ± 1,58	1,001

Nota: Resultados expressos em média ± desvio padrão (base seca). Extratos expostos à temperatura constante de 24 °C. CFT: compostos fenólicos totais; GAE: equivalentes de ácido gálico. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os experimentos ($p \leq 0,05$).

Esse comportamento pode ser atribuído à presença de cloreto de colina e glicerol na composição do NADES, que favorecem a formação de uma rede molecular estável e de baixa transparência óptica, capaz de absorver parte da radiação incidente e limitar reações foto-oxidativas. Além disso, a matriz viscosa do solvente reduz a mobilidade dos radicais formados por excitação luminosa, dificultando a propagação de reações de oxidação secundária (Misan *et al.*, 2020; Girelli *et al.*, 2023). Estudos com extratos vegetais estabilizados em NADES também relatam comportamento semelhante, com preservação do conteúdo fenólico após exposição prolongada à luz (Huang *et al.*, 2018; Domínguez-Rodríguez *et al.*, 2025b).

De forma integrada, os resultados evidenciam que o extrato otimizado de *B. eriospatha*, obtido com NADES ChCl–Gly assistido por ultrassom, apresenta elevada resistência tanto ao aquecimento quanto à exposição luminosa. A manutenção do teor de compostos fenólicos sob ambos os estresses confirma a capacidade do solvente eutético de atuar como meio extrativo e estabilizante dos compostos bioativos.

Embora o teor total de fenóis tenha permanecido estável, é importante considerar que os fenóis individuais podem responder de forma diferente ao calor e à luz. Diferentes classes, como ácidos fenólicos, flavanonas, flavonóis e antocianinas,

exibem sensibilidades distintas a esses estresses e podem sofrer isomerizações, oxidações seletivas ou conversões entre formas glicosiladas e agliconas durante o processamento térmico (Mercali *et al.*, 2013; Peron; Fraga; Antelo, 2017). Assim, mesmo sem alterações no CFT, modificações qualitativas no perfil fenólico podem ocorrer, pois transformações intraclasse nem sempre afetam a soma total dos compostos (Hoffmann *et al.*, 2017).

Apesar disso, a estabilidade observada indica que, se tais mudanças ocorreram, elas foram provavelmente discretas ou compensatórias, o que é coerente com o efeito protetor dos NADES descrito para diversos compostos fenólicos e pigmentos naturais (Dai *et al.*, 2014; Craveiro *et al.*, 2016). Estudos apontam que esses solventes podem restringir a mobilidade molecular e reduzir a difusão de espécies reativas, contribuindo para a manutenção estrutural dos compostos (Misan *et al.*, 2020). Esses achados reforçam a viabilidade tecnológica do sistema para o desenvolvimento de ingredientes funcionais e produtos de valor agregado, capazes de preservar propriedades antioxidantes durante o processamento e o armazenamento. Assim, consolidam-se as perspectivas de aplicação sustentável dos solventes eutéticos na valorização de recursos nativos e em estratégias futuras voltadas à otimização e ao uso industrial de extratos naturais.

6 CONCLUSÃO

A aplicação de solventes eutéticos profundos naturais (NADES) na extração de compostos bioativos de *Butia eriospatha* demonstrou elevado potencial tecnológico e ambiental, consolidando-se como alternativa sustentável aos solventes orgânicos convencionais. As caracterizações físico-química confirmaram a qualidade dos frutos, evidenciando elevada umidade, predominância de carboidratos, baixo teor de lipídeos e proteínas e presença relevante de fibras, características que reforçam sua adequação como matéria-prima para a extração de compostos bioativos.

O sistema NADES ChCl–Gly assistido por ultrassom (UAE) apresentou desempenho superior na recuperação de compostos fenólicos, flavonoides, carotenoides e ácido ascórbico, além de maior atividade antioxidante, evidenciando a ação sinérgica entre o meio eutético e a cavitação ultrassônica, com ganhos em difusão, solubilização e estabilidade química dos compostos extraídos.

A otimização do processo permitiu identificar condições ideais de temperatura e tempo de extração, com boa concordância entre os valores experimentais e preditos pelos modelos quadráticos, confirmando a seletividade e a eficiência do sistema NADES/UAE frente às variáveis operacionais estudadas.

Os ensaios de estabilidade térmica e fotoquímica demonstraram que o teor total de compostos fenólicos dos extratos permaneceu estável após exposição ao calor e à luz, sem reduções significativas nas condições avaliadas. Esses resultados indicam que o extrato apresenta boa resistência aos estresses aplicados e sugerem que o NADES ChCl–Gly pode contribuir para essa estabilidade. Embora não tenha sido possível avaliar a preservação individual dos metabólitos ou a manutenção da atividade antioxidante, os dados obtidos apontam para o potencial do sistema como meio favorável à estabilidade química, ampliando suas possibilidades de aplicação tecnológica.

Em síntese, o sistema NADES ChCl–Gly/UAE mostrou-se uma estratégia eficiente, segura e ambientalmente responsável para a valorização de frutos nativos como o butiá. Sua combinação de alta eficiência extrativa, estabilidade química e sustentabilidade operacional reforça o potencial de aplicação em formulações alimentícias, farmacêuticas e cosméticas, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias verdes e para a conservação de recursos vegetais regionais.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, A. P.; CAPPER, G.; DAVIES, D. L.; RASHEED, R. K.; TAMBYRAJAH, V. Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. **Chemical Communications**, v. 1, p. 70-71, 2003. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2003/cc/b210714g>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- ABBOTT, A. P.; BOOTHBY, D.; CAPPER, G.; DAVIES, D. L.; RASHEED, R. K. Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: versatile alternatives to ionic liquids. **Journal of the American Chemical Society**, v. 126, n. 29, p. 9142-9147, 2004. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja048266j>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- ABBOTT, A. P.; HARRIS, R. C.; RYDER, K. S.; D'AGOSTINO, C.; GLADDEN, L. F.; MANTLE, M. D. Glycerol eutectics as sustainable solvent systems. **Green Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 82-90, 2011. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/gc/c0gc00395f>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- ABRANCHES, D. O.; COUTINHO, J. A. P. Type V deep eutectic solvents: Design and applications. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 35, 100612, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452223622000244>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- ALBERTI, A.; ZIELINSKI, A. A. F.; ZARDO, D. M.; DEMIATE, I. M.; NOGUEIRA, A.; MAFRA, L. I. Optimisation of the extraction of phenolic compounds from apples using response surface methodology. **Food Chemistry**, v. 149, p. 151-158, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814613015343>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- ALFEREZ, F.; CARVALHO, D. U.; BOAKYE, D. Interplay between abscisic acid and gibberellins, as related to ethylene and sugars, in regulating maturation of non-climacteric fruit. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 2, p. 669, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/2/669>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- ALI, A.; CHUA, B. L.; CHOW, Y. H.; CHONG, C. H. Development and characterisation of novel terpenoid-based hydrophobic deep eutectic solvents for sustainable extraction of bioactive antioxidants from *Rosmarinus officinalis* L. **Journal of Molecular Liquids**, v. 388, 122792, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732223015970>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- ALTEMIMI, A.; LAKHSSASSI, N.; BAHARLOUEI, A.; WATSON, D. G.; LIGHFOOT, D. A. Phytochemicals: extraction, isolation, and identification of bioactive compounds from plant extracts. **Medicinal Plants and Natural Product Research**, v. 6, n. 4, p. 42, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/6/4/42>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- AMARANTE, C. V. T.; MEGGUER, C. A. Qualidade pós-colheita de frutos de butiá em função do estágio de maturação na colheita e do manejo da temperatura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 46-53, 2008.

AMORIM, E.; BICALHO, M.; ARAGÃO, L. A.; SOARES, K.; GOMES, M. *Butia eriospatha* (Mart. ex Drude) Becc. (Arecaceae). In: **Lista Vermelha da Flora Brasileira**: Centro Nacional de Conservação da Flora, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: <https://cncflora.jbrj.gov.br/ficha/26574>. Acesso em: 10 out. 2025.

ANTUNES, B. F.; COSTA, I. H. L.; SILVA, K. G.; OLIVEIRA, R. M.; SANTANA, L. R.; FONSECA, L. M.; CARRENO, N. L. V.; DIAS, A. R. G.; ZAVAREZE, E. R. Chemical composition, bioactive compounds, biological activity, and applications of *Butia* spp.: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 148, 104510, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224424001869>. Acesso em: 17 fev. 2026.

AOAC. **Official Methods of Analysis**. Association of Official Analytical Chemists. 14 ed. Arlington: Sidney Williams (Ed.), 1984. 1141 p.

AOAC. **Official Methods of Analysis**. Association of Official Analytical Chemists. 22 ed. New York, 2023.

ARATHI, B. P.; SOWMYA, P. R.; VIJAY, K.; BASKARAN, V.; LAKSHMINARAYANA, R. Metabolomics of carotenoids: the challenges and prospects – a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 105-117, 2015. Disponível em: <http://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224415001466>. Acesso em: 17 fev. 2026.

AZAMBUJA, M. B.; NEVES, P. O.; CAÑEDO, A. D.; PEREIRA, A. B. *Butia eriospatha*: duas décadas de mudanças ambientais da região de ocorrência natural da espécie. **Destaques Acadêmicos**, Lajeado, v. 16, n. 3, p. 8-23, 2024. Disponível em: <https://univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/3546>. Acesso em: 17 fev. 2026.

AZMIR, J.; ZAIDUL, I. S. M.; RAHMAN, M. M.; SHARIF, K. M.; MOHAMED, A.; ASHENA, F.; JAHURUL, M. H. A.; GHAFOOR, K.; NORULAINI, N. A. N.; OMAR, A. K. M. Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 117, n. 4, p. 426-436, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877413000277>. Acesso em: 17 fev. 2026.

BASAK, S.; SHAIK, L.; CHAKRABORTY, S. Effect of ultraviolet and pulsed light treatments on ascorbic acid content in fruit juices - a review of the degradation mechanism. **Food Chemistry Advances**, v. 2, 100333, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772753X23001557>. Acesso em: 17 fev. 2026.

BASILJKOV, T.; DUJMIC, F.; BUBALO, M. C.; HRIBAR, J.; VIDRIH, R.; BRNCIC, M.; ZLATIC, E.; REDOVNIKOVIC, I. R.; JOKIC, S. Natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction: green approaches for extraction of wine lees anthocyanins. **Food and Bioproducts Processing**, v. 102, p. 195-203, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308516301808>. Acesso em: 17 fev. 2026.

BENASSI, M. T.; ANTUNES, A. J. A comparison of metaphosphoric and oxalic acids as extractant solutions for determination of vitamin C in selected vegetables. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 31, n. 4, p. 507-513, 1988.

BENZIE, I. F. F.; STRAIN, J. J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. **Analytical Biochemistry**, v. 239, n. 1, p. 70-76, 1996.

BESKOW, G. T.; HOFFMANN, J. F.; TEIXEIRA, A. M.; FACHINELLO, J. C.; CHAVES, F. C.; ROMBALDI, C. V. Bioactive and yield potential of jelly palms (*Butia odorata* Barb. Rodr.). **Food Chemistry**, v. 172, p. 699-704, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814614014964>. Acesso em: 17 fev. 2026.

BOTANIC GARDENS CONSERVATION INTERNATIONAL (BGCI). **Estratégia Global para a Conservação de Plantas**. Rio de Janeiro: Rede Brasileira de Jardins Botânicos, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, BGCI, 2006. 14 p. ISBN 85-98262-04-8. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biodiversidade1/convencao-sobre-diversidade-biologica>. Acesso em: 10 out. 2025.

BOX, G. E. P.; BEHNKEN, D. W. Some new three level designs for the study of quantitative variables. **Technometrics**, v. 2, n. 4, p. 455–475, 1960.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT – Food Science and Technology**, v. 28, n. 1, p. 25-30, 1995.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Decreto Legislativo nº 2, de 3 de fevereiro de 1994. Aprova o texto da Convenção sobre Diversidade Biológica, assinada durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada na Cidade do Rio de Janeiro, no período de 5 a 14 de junho de 1992. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 32, n. 25, p. 1693, 04 fev. 1994. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decleg/1994/decretolegislativo-2-3-fevereiro-1994-358280-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em: 10 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Estratégia e Plano de Ação Nacionais para a Biodiversidade – EPANB: 2016-2020**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade, Departamento de Conservação de Ecossistemas. Brasília, DF: MMA, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbio/departamento-de-conservacao-e-uso-sustentavel-da-biodiversidade/epanb>. Acesso em: 10 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portaria MMA nº 148, de 7 de junho de 2022. Altera os Anexos da Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014, da Portaria nº 444, de 17 de dezembro de 2014, e da Portaria nº 445, de 17 de dezembro de 2014, referentes à atualização da Lista Nacional de Espécies Ameaçadas de Extinção.

Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 160, n. 108, p. 74, 08 jun. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-148-de-7-de-junho-de-2022-406272733>. Acesso em: 10 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **6º Relatório Nacional para a Convenção sobre Diversidade Biológica**. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, Secretaria Nacional de Biodiversidade, Florestas e Direitos Animais. Brasília, DF: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biodiversidade1/convencao-sobre-diversidade-biologica>. Acesso em: 10 out. 2025.

BRUNS, R. E.; SCARMINIO, I. S.; BARROS NETO, B. **Statistical design – Chemometrics**. Amsterdam: Elsevier, 2006, p. 273.

CANDIDO-RIBEIRO, R.; LAUTERJUNG, M. B.; MONTAGNA, T.; BERNARDI, A. P.; COSTA, N. C. F.; HOELTGEBAUM, M. P.; REIS, M. S. Distinct seeds in contrasting habitats: morphological and reproductive responses in *Butia eriospatha* to new environmental conditions. **Acta Oecologica**, v. 99, 103447, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1146609X18304089>. Acesso em: 17 fev. 2026.

CANGUSSU, L. B.; FRONZA, P.; CAVALCANTI, W. M. Pós ricos em fibras de subprodutos de frutas tropicais: uma revisão bibliográfica sobre seus compostos bioativos. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, e80996803, 2020.

CANOINHAS ONLINE. **Canoinhas registrou uma das maiores temperaturas do Estado neste sábado**. Canoinhas Online, 2 dez. 2023a. Disponível em: <https://canoinhasonline.com.br/2023/12/canoinhas-registrou-uma-das-maiores-temperaturas-do-estado-neste-sabado.html>. Acesso em: 15 set. 2025.

CANOINHAS ONLINE. **Norte catarinense registra sensação térmica de 59 °C**. Canoinhas Online, 29 dez. 2023b. Disponível em: <https://canoinhasonline.com.br/2023/12/norte-catarinense-registra-sensacao-termica-de-59oc.html>. Acesso em: 15 set. 2025.

CANOINHAS ONLINE. **O pior está por vir: El Niño vai agravar o clima extremo em dezembro, alertam cientistas**. Canoinhas Online, 29 dez. 2023c. Disponível em: <https://canoinhasonline.com.br/2023/11/o-pior-esta-por-vir-el-nino-vai-agravar-o-clima-extremo-em-dezembro.html>. Acesso em: 15 set. 2025.

CÁRCAMO, J. M.; PEDRAZA, A.; BÓRQUEZ-OJEDA, O.; ZHANG, B.; SANCHEZ, R.; GOLDE, D. W. Vitamin C is a kinase inhibitor: dehydroascorbic acid inhibits IκBα kinase β. **Molecular and Cellular Biology**, v. 24, n. 15, p. 6645-6652, 2004. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1128/MCB.24.15.6645-6652.2004>. Acesso em: 17 fev. 2026.

CARR, A. C.; MAGGINI, S. Vitamin C and immune function. **Nutrients**, v. 9, n. 11, 1211, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6643/9/11/1211>. Acesso em: 17 fev. 2026.

CARVALHO, A. P. A.; CONTE-JÚNIOR, C. A. Health benefits of phytochemicals from Brazilian native foods and plants: antioxidant, antimicrobial, anti-cancer, and risk factors of metabolic/endocrine disorders control. **Trends in Food Science & Technology**, v. 111, p. 534-548, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224421001904>. Acesso em: 17 fev. 2026.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa, 2014, v. 5, 634 p.

CHEN, M.; ZHAO, Y.; YU, S. Optimisation of ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds, antioxidants, and anthocyanins from *sugar beet molasses*. **Food Chemistry**, v. 172, p. 543-550, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814614014952>. Acesso em: 17 fev. 2026.

CHOI, Y. H.; VAN SPRONSEN, J.; DAI, Y.; VERBERNE, M.; HOLLMANN, F.; ARENDS, I. W. C. E.; WITKAMP, G.; VERPOORTE, R. Are natural deep eutectic solvents the missing link in understanding cellular metabolism and physiology? **Plant Physiology**, v. 156, n. 4, p. 1701-1705, 2011. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article-abstract/156/4/1701/6108881>. Acesso em: 17 fev. 2026.

CIDÓN, C. F.; TURCHETTO-ZOLET, A. C.; BAJAY, M. M.; ZUCCHI, M. I.; ENÉAS, R. K. Phenotypic and molecular basis for genetic variation in jelly palms (*Butia* sp.): where are we now and where are we headed to? **Genetics and Molecular Biology**, v. 46, n. 3, e20230145, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gmb/a/gHBZcKhmp8GJSwvhHJFqJ6x/>. Acesso em: 17 fev. 2026.

CLIMATEMPO. **Climatologia e histórico meteorológico de Canoinhas (SC)** [dados meteorológicos]. São Paulo: Climatepo, 2025. Disponível em: <https://www.climatepo.com.br/climatologia/782/canoinhas-sc>. Acesso em: 21 nov. 2025.

CRAVEIRO, R.; AROSO, I.; FLAMMIA, V.; CARVALHO, T.; VICIOSA, M. T.; DIONÍSIO, M.; BARREIROS, S.; REIS, R. L.; DUARTE, A. R. C.; PAIVA, A. Properties and thermal behavior of natural deep eutectic solvents. **Journal of Molecular Liquids**, v. 215, p. 534-540, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732215303019>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DA COSTA, G. A.; MERCADANTE, A. Z. *In vitro* bioaccessibility of free and esterified carotenoids in cajá frozen pulp-based beverages. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 68, p. 53-59, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157517300583>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DAI, Y.; VERPOORTE, R.; CHOI, Y. H. Natural deep eutectic solvents providing enhanced stability of natural colorants from safflower (*Carthamus tinctorius*). **Food Chemistry**, v. 159, p. 116-121, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814614003586>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DAI, Y.; WITKAMP, G.; VERPOORTE, R.; CHOI, Y. H. Natural deep eutectic solvents as a new extraction media for phenolic metabolites in *Carthamus tinctorius* L. **Analytical Chemistry**, v. 85, n. 13, p. 6272-6278, 2013.

DA SILVA, R. F.; CARNEIRO, C. N.; DE SOUSA, C. B. C.; GOMEZ, F. J. V.; ESPINO, M.; BOITEUX, J.; FERNÁNDEZ, M. A.; SILVA, M. F. Sustainable extraction bioactive compounds procedures in medicinal plants based on the principles of green analytical chemistry: a review. **Microchemical Journal**, v. 175, 107184, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X22000121>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DAS, P.; NAYAK, P. K.; KESAVAN, R. K. Ultrasound assisted extraction of food colorants: principle, mechanism, extraction technique and applications: a review on recent progress. **Food Chemistry Advances**, v. 1, 100144, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772753X22001320>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DAUD, N. M.; PUTRA, N. R.; JAMALUDIN, R.; NORODIN, N. S. M.; SARKAWI, N. S.; HAMZAH, M. H. S.; NASIR, H. M.; ZAIDEL, D. N. A.; YUNUS, M. A. C.; SALLEH, L. M. Valorisation of plant seed as natural bioactive compounds by various extraction methods: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 119, p. 201-214, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224421006671>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DEBLE, L. P.; MARCHIORI, J. N. C.; ALVES, F. S.; OLIVEIRA-DEBLE, A. S. Survey on *Butia* (Becc.) Becc. (Arecaceae) from Rio Grande do Sul State (Brazil). **Balduinia**, v. 30, p. 3-24, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/index.php/balduinia/article/view/13883>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DELLA POSTA, S.; GALLO, V.; GENTILI, A.; FANALI, C. Strategies for the recovery of bioactive molecules from deep eutectic solvents extracts. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 157, 116798, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165993622002813>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DELLA POSTA, S.; GALLO, V.; ASCRIZZI, A. M.; GENTILI, A.; DE GARA, L.; DUGO, L.; FANALI, C. Development of a green ultrasound-assisted procedure for the extraction of phenolic compounds from avocado peel with deep eutectic solvents. **Green Analytical Chemistry**, v. 7, 100083, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772577423000344>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DENARDIN, C. C.; HIRSCH, G. E.; DA ROCHA, R. F.; VIZZOTTO, M.; HENRIQUES, A. T.; MOREIRA, J. C. F.; GUMA, F. T. C. R.; EMANUELLI, T. Antioxidant capacity and bioactive compounds of four brazilian native fruits. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 23, n. 3, p. 387-398, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1021949815000344>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DENG, J.; FANG, S.; FANG, X.; JIN, Y.; KUANG, Y.; LIN, F.; LIU, J.; MA, J.; NIE, Y.; OUYANG, J. R.; TIE, L.; TANG, S.; TAN, X.; WANG, X.; FAN, Z.; WANG, Q.; WANG, H.; LIU, C. Forest understory vegetation study: current status and future trends. **Forestry Research**, v. 3, n. 6, 2023. Disponível em: <https://www.maxapress.com/article/doi/10.48130/FR-2023-0006>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ, G.; AMADOR-LUNA, V. M.; CASTRO-PUYANA, M.; IBÁÑEZ, E.; MARINA, M. L. Sustainable strategies to obtain bioactive compounds from citrus peels by supercritical fluid extraction, ultrasound-assisted extraction, and natural deep eutectic solvents. **Food Research International**, v. 202, 115713, 2025a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996925000493>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ, G.; AMADOR-LUNA, V. M.; MENDIOLA, J. A.; PARADA-ALFONSO, F.; IBÁÑEZ, E. Development of a sustainable extraction and storage stability of antioxidant and anticholinergic pressurized natural deep eutectic solvent extracts from *Citrus reticulata* leaves. **Food and Bioproducts Processing**, v. 149, p. 70-81, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308524002281>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DOSEDL, M.; JIRKOVSKY, E.; MACÁKOVÁ, K.; KRČMOVÁ, L. K.; JAVORSKÁ, L.; POUROVÁ, J.; MERCOLINI, L.; REMIÃO, F.; NOVÁKOVÁ, L.; MLADĚNKA, P.; OMONOM. Vitamin C — sources, physiological role, kinetics, deficiency, use, toxicity, and determination. **Nutrients**, v. 13, n. 2, p. 615, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6643/13/2/615>. Acesso em: 17 fev. 2026.

DU, J.; CULLEN, J. J.; BUETTNER, G. R. Ascorbic acid: chemistry, biology and the treatment of cancer. **Biochimica et Biophysica Acta**, v. 1826, n. 2, p. 443-457, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304419X12000509>. Acesso em: 17 fev. 2026.

EPAGRI/CIRAM. **Dados meteorológicos da Estação Canoinhas-IFSC (código 1063)** [dados meteorológicos]. Florianópolis: Epagri/Ciram, 2025. Disponível em: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/dadosambientaispublicos/>. Acesso em: 21 nov. 2025.

ESLABÃO, M. P.; ELLERT-PEREIRA, P. E.; BARBIERI, R. L.; HEIDEN, G. Prioridades para a conservação de *Butia* (Arecaceae). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 4, p. 1733-1758, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/38770>. Acesso em: 17 fev. 2026.

FANALI, C.; GALLO, V.; DELLA POSTA, S.; DUGO, L.; MAZZEO, L.; COCCHI, M.; PIEMONTE, V.; DE GARA, L. Choline chloride–lactic acid-based nades as an extraction medium in a response surface methodology-optimized method for the extraction of phenolic compounds from hazelnut skin. **Molecules**, v. 26, n. 9, p. 2652, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/9/2652>. Acesso em: 17 fev. 2026.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound applications in drying of fruits from a sustainable development goals perspective. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 96, 106430, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417723001426>. Acesso em: 17 fev. 2026.

FERRÃO, T. S.; FERREIRA, D. F.; FLORES, D. W.; BERNARDI, G.; LINK, D.; BARRIN, J. S.; WAGNER, R. Evaluation of composition and quality parameters of jelly palm (*Butia odorata*) fruits from different regions of Southern Brazil. **Food Research**

International, v. 54, n. 1, p. 57-62, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996913003293>. Acesso em: 17 fev. 2026.

FERREIRA, B. L.; BEIK, J. V.; ALVES, S. J. Z.; HENRIQUE, F. A.; SAUER, E.; CHORNOBAI, C. A.; BOWLES, S.; CHAVES, E. S. Extração assistida por ultrassom para determinação de lipídeos em alimentos: um experimento de laboratório. **Química Nova**, v. 43, n. 9, p. 1320-1325, 2020.

FLIEGER, J.; FLIEGER, W.; BAJ, J.; MACIEJEWSKI, R. Antioxidants: classification, natural sources, activity/capacity measurements, and usefulness for the synthesis of nanoparticles. **Materials**, v. 14, n. 15, p. 4135, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/15/4135>. Acesso em: 17 fev. 2026.

FREITAS, D. S.; CAVACO-PAULO, A.; SILVA, C. Enhancing insights into the phenomena of deep eutectic solvents. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 41, e01039, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993724002197>. Acesso em: 17 fev. 2026.

FUAD, F. M.; NADZIR, M. M.; KAMARUDDIN, A. H. Hydrophilic natural deep eutectic solvent: a review on physicochemical properties and extractability of bioactive compounds. **Journal of Molecular Liquids**, v. 339, 116923, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732221016470>. Acesso em: 17 fev. 2026.

FUENTES, L.; FIGUEROA, C. R.; VALDENEGRO, M. Recent advances in hormonal regulation and cross-talk during non-climacteric fruit development and ripening. **Horticulturae**, v. 5, n. 2, p. 45, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/5/2/45>. Acesso em: 17 fev. 2026.

GIRELLI, A.; SANT'ANNA, V.; KLEIN, M. P. Drying of butiá pulp by the foam-layer method and characterization of the obtained powder. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 58, e03050, 2023.

GÓMEZ-URIOS, C.; VIÑAS-OSPINO, A.; PUCHADES-COLERA, P.; BLESÁ, J.; LÓPEZ-MALO, D.; FRÍGOLA, A.; ESTEVE, M. J. Choline chloride-based natural deep eutectic solvents for the extraction and stability of phenolic compounds, ascorbic acid, and antioxidant capacity from *Citrus sinensis* peel. **LWT**, v. 177, 114595, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643823001743>. Acesso em: 17 fev. 2026.

HALLIWELL, B. Understanding mechanisms of antioxidant action in health and disease. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 25, p. 13-33, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41580-023-00645-4>. Acesso em: 17 fev. 2026.

HAYYAN, A.; MJALLI, F. S.; ALNASHEF, I. M.; AL-WAHAIBI, Y. M.; AL-WAHAIBI, T.; HASHIM, M. A. Glucose-based deep eutectic solvents: physical properties. **Journal of Molecular Liquids**, v. 178, p. 137-141, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732212004382>. Acesso em: 17 fev. 2026.

HE, Q.; TANG, G.; HU, Y.; LIU, H.; TANG, H.; ZHOU, Y.; DENG, X.; PENG, D.; QIAN, Y.; GUO, W.; CHEN, D.; LI, X.; QIU, H. Green and highly effective extraction of bioactive flavonoids from *Fructus aurantii* employing deep eutectic solvents-based ultrasonic-assisted extraction protocol. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 102, 106761, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417724000099>. Acesso em: 17 fev. 2026.

HOFFMANN, J. F.; BARBIERI, R. L.; ROMBALDI, C. V.; CHAVES, F. C. *Butia* spp. (Arecaceae): an overview. **Scientia Horticulturae**, v. 179, p. 122-131, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030442381400449X>. Acesso em: 17 fev. 2026.

HOFFMANN, J. F.; ZANDONÁ, G. P.; DOS SANTOS, P. S.; DALLMANN, C. M.; MADRUGA, F. B.; ROMBALDI, C. V.; CHAVES, F. C. Stability of bioactive compounds in butiá (*Butia odorata*) fruit pulp and nectar. **Food Chemistry**, v. 237, p. 638-644, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814617309664>. Acesso em: 17 fev. 2026.

HU, Y.; ZHENG, Z.; ZHAI, D.; LIANG, P.; WANG, Z.; JIANG, C.; GUO, Y.; CHEN, H.; SHEN, C.; WU, Y.; LIU, L.; YI, Y.; ZHU, H.; LIU, Q. A mini-review: exploring the application prospects of the three major rules in the field of antioxidants. **Journal of Molecular Structure**, v. 1304, 137746, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022286024002692>. Acesso em: 17 fev. 2026.

HUANG, W.; ZHAO, D.; GUO, N.; XUE, C.; MAO, X. Green and facile production of chitin from crustacean shells using a natural deep eutectic solvent. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 45, p. 11897-11901, 2018.

HUNYADI, A. The mechanism(s) of action of antioxidants: from scavenging reactive oxygen/nitrogen species to redox signaling and the generation of bioactive secondary metabolites. **Medicinal Research Reviews**, v. 39, p. 2505-2533, 2019.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: IAL, 2008. 1020 p.

JAMSHAD, S.; AHMED, D. Optimization of ultrasound-assisted extraction of valuable compounds from fruit of *Melia azedarach* with glycerol-choline chloride deep eutectic solvent. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 29, 100827, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352554122002315>. Acesso em: 17 fev. 2026.

JHA, A. K.; SIT, N. Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 119, p. 579-591, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224421006191>. Acesso em: 17 fev. 2026.

JULSHAHIL, N. H.; PHUAH, E.; RAMBLI, M. M. Deep eutectic solvents in the extraction of bioactive compounds in agri-food industry. **Food and Humanity**, v. 4, 100468, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S294982442400243X>. Acesso em: 17 fev. 2026.

JUSTINO, H. F. M.; CUNHA, J. S.; PACHECO, A. F. C.; PACHECO, F. C.; MARTINS, C. C. N.; PAIVA, P. H. C.; LEITE JÚNIOR, B. R. C. Uso de tecnologias não convencionais para extração de compostos bioativos de subprodutos de frutas e vegetais: revisão. **Research, Society and Development**, v. 1, n. 14, p. e44111435488, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/35488>. Acesso em: 17 fev. 2026.

KINUPP, V. F. **Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC) no Brasil**: guia de identificação, aspectos nutricionais e receitas ilustradas. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2014.

KURUTAS, E. B. The importance of antioxidants which play the role in cellular response against oxidative/nitrosative stress: current state. **Nutrition Journal**, v. 15, n. 71, 2016.

LANJEKAR, K. J.; GOKHALE, S.; RATHOD, V. K. Utilization of waste mango peels for extraction of polyphenolic antioxidants by ultrasound-assisted natural deep eutectic solvent. **Bioresource Technology Reports**, v. 18, 101074, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X22001311>. Acesso em: 17 fev. 2026.

LANJEKAR, K. J.; RATHOD, V. K. Green extraction of glycyrrhizic acid from *Glycyrrhiza glabra* using choline chloride based natural deep eutectic solvents (NADESs). **Process Biochemistry**, v. 102, p. 22-32, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511320317359>. Acesso em: 17 fev. 2026.

LEITMAN, P.; SOARES, K.; HENDERSON, A.; NOBLICK, L.; MARTINS, R. C. Arecaceae. In: **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/consulta/ficha.html>. Acesso em: 17 fev. 2026.

LI, Y.; JIANG, F.; NIU, L.; WANG, G.; YIN, J.; SONG, X.; OTTOSEN, C.; ROSENQVIST, E.; MITTLER, R.; WU, Z.; ZHOU, R. Synergistic regulation at physiological, transcriptional and metabolic levels in tomato plants subjected to a combination of salt and heat stress. **The Plant Journal**, v. 117, n. 6, p. 1656-1675, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/tpj.16580>. Acesso em: 17 fev. 2026.

LI, Z.; SHU, X.; CHEN, Y.; GUO, Y.; YU, W.; QU, L.; WANG, Q.; ZHANG, Y.; NING, F.; LI, J.; LIU, T.; LUO, L. Ultrasound-assisted extraction with natural deep eutectic solvents coupled with metabolomic and KEGG pathway analyses for bioactive compounds from thinned young citrus fruits. **Food Chemistry**, v. 495, 146187, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814625034399>. Acesso em: 17 fev. 2026.

LIMA, M. **Maior parte de fevereiro com chuva escassa e mal distribuída, em SC**. Epagri/Ciram, 21 fev. 2024. Disponível em: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/2024/02/21/maior-parte-de-fevereiro-com-chuva-escassa-e-mal-distribuida-em-sc/>. Acesso em: 15 set. 2025.

LIMA, M.; CRUZ, G. **Chuva e temperatura em SC em fevereiro e início de março**. Epagri/Ciram, 5 mar. 2024. Disponível em: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/2024/03/05/32024/>. Acesso em: 15 set. 2025.

LORENZI, H.; NOBLICK, L. R.; KAHN, F.; FERREIRA, E. **Flora Brasileira: Arecaceae (Palmeiras)**. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2010. p. 368.

MACEDO, L. L.; CORRÊA, J. L. G.; FONNSECA, H. C.; ARAÚJO, C. S.; VIMERCATI, W. C.; GANDIA, R. M. Convective drying of *Butia capitata* pulp: effect of air temperature on kinetic and quality parameters. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, e73791110583, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/10583>. Acesso em: 17 fev. 2026.

MARTINS, N.; FERREIRA, I. C. F. R. Wastes and by-products: upcoming sources of carotenoids for biotechnological purposes and health-related applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 62, p. 33-48, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224416304939>. Acesso em: 17 fev. 2026.

MERCALI, G. D.; JAESCHKE, D. P.; TESSARO, I. C.; MARCZAK, L. D. F. Degradation kinetics of anthocyanins in acerola pulp: comparison between ohmic and conventional heat treatment. **Food Chemistry**, v. 136, n. 2, p. 853-857, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814612013088>. Acesso em: 17 fev. 2026.

MINOR, E. A.; COURT, B. L.; YOUNG, J. I.; WANG, G. Ascorbate induces ten-eleven translocation (Tet) methylcytosine dioxygenase-mediated generation of 5-hydroxymethylcytosine. **Journal Biological Chemistry**, v. 288, n. 19, p. 13669-13674, 2013. Disponível em: [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)54595-1/](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)54595-1/). Acesso em: 17 fev. 2026.

MISAN, A.; NADPAL, J.; STUPAR, A.; POJIC, M.; MANDIC, A.; VERPOORTE, R.; CHOI, Y. H. The perspectives of natural deep eutectic solvents in agri-food sector. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 60, n. 15, p. 2564-2592, 2020. Disponível em: <http://tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2019.1650717>. Acesso em: 17 fev. 2026.

MORAIS, R. A.; TEIXEIRA, G. L.; FERREIRA, S. R. S.; CIFUENTES, A.; BLOCK, J. M. Nutritional composition and bioactive compounds of native brazilian fruits of the Arecaceae family and its potential applications for health promotion. **Nutrients**, v. 14, n. 19, p. 4009, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6643/14/19/4009>. Acesso em: 17 fev. 2026.

MOSER, M. A.; CHUN, O. K. Vitamin C and heart health: a review based on findings from epidemiologic studies. **International Journal os Molecular Sciences**, v. 17, n. 8, p. 1328, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/17/8/1328>. Acesso em: 17 fev. 2026.

MUZAFFAR, K.; NAYIK, G. A.; KUMAR, P. Stickiness problem associated with spray drying of sugar and acid rich foods: a mini review. **Nutrition & Food Sciences**,

S12:003, 2015. Disponível em: <https://www.longdom.org/open-access-pdfs/stickiness-problem-associated-with-spray-drying-of-sugar-and-acid-rich-foods-a-mini-review-2155-9600-S12-003.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2026.

NAZARENO, A. G.; REIS, M. S. At risk of population decline? an ecological and genetic approach to the threatened palm species *Butia eriospatha* (Arecaceae) of southern Brazil. **Journal of Heredity**, v. 105, n. 1, p. 120-129, 2013. Disponível em: <https://academic.oup.com/jhered/article-abstract/105/1/120/856704>. Acesso em: 17 fev. 2026.

NEKKAA, A.; BENAÏSSA, A.; LALAOUNA, A. E. D.; DUPIRE, F.; RISLER, A.; MUTELET, F.; CANABADY-ROCHELLE, L. Green and innovative extraction of polyphenols from *Rhamnus alaternus* using natural deep eutectic solvents and evaluation of their bioactivities. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 35, 100503, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214786123000475>. Acesso em: 17 fev. 2026.

NIKI, E. Antioxidants: basic principles, emerging concepts, and problems. **Biomedical Journal**, v. 37, n. 3, p. 106-111, 2014.

NOBLICK, L. R. Validation of the name *Butia odorata*. **Palms**, v. 55, n. 1, p. 48-49, 2011.

OLFAT, A.; MOSTAGHIM, T.; SHAHRIARI, S.; SALEHIFAR, M. Extraction of bioactive compounds of *Hypnea flagelliformis* by ultrasound-assisted extraction coupled with natural deep eutectic solvent and enzyme inhibitory activity. **Algal Research**, v. 78, 103388, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926423004216>. Acesso em: 17 fev. 2026.

PANIC, M.; ANDLAR, M.; TISMA, M.; REZIC, T.; SIBALIC, D.; BUBALO, M. C.; REDOVNIKOVIC, I. R. Natural deep eutectic solvent as a unique solvent for valorisation of orange peel waste by the integrated biorefinery approach. **Waste Management**, v. 120, p. 340-350, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20306802>. Acesso em: 17 fev. 2026.

PATIST, A.; BATES, D. Ultrasonic innovations in the food industry: from the laboratory to commercial production. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 9, n. 2, p. 147-154, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146685640700121X>. Acesso em: 17 fev. 2026.

PEREIRA, D. M.; VALENTÃO, P.; PEREIRA, J. A.; ANDRADE, P. B. Phenolics: from chemistry to biology. **Molecules**, v. 14, n. 6, p. 2202-2211, 2009. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/14/6/2202>. Acesso em: 17 fev. 2026.

PERON, D. V.; FRAGA, S.; ANTELO, F. Thermal degradation kinetics of anthocyanins extracted from juçara (*Euterpe edulis* Martius) and “Italia” grapes (*Vitis vinifera* L.), and the effect of heating on the antioxidant capacity. **Food Chemistry**, v. 232, p. 836-840, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814617306593>. Acesso em: 17 fev. 2026.

PEROTTI, M. F.; POSÉ, D.; MARTÍN-PIZARRO, C. Non-climacteric fruit development and ripening regulation: 'the phytohormones show'. **Journal of Experimental Botany**, v. 74, n. 20, p. 6237-6253, 2023. Disponível em: <https://academic.oup.com/jxb/article/74/20/6237/7224223>. Acesso em: 17 fev. 2026.

PINTO, E. Pesquisas potencializam cultivo e qualificam exploração econômica do butiá. **Revista Rural**, São Paulo, ano 22, n. 253, p. 36-41, 2019. Disponível em: https://www.revistarural.com.br/sitenovo/wp-content/uploads/2019/05/Revista-Rural_253.pdf. Acesso em: 22 set. 2023.

RAMOS, R. T. M.; BEZERRA, I. C. F.; FERREIRA, M. R. A.; SOARES, L. A. L. Spectrophotometric quantification of flavonoids in herbal material, crude extract, and fractions from leaves of *Eugenia uniflora* Linn. **Pharmacognosy Research**, v. 9, n. 3, p. 253-260, 2017.

RASHID, R.; WANI, S. M.; MANZOOR, S.; MASOODI, F. A.; DAR, M. M. Green extraction of bioactive compounds from apple pomace by ultrasound assisted natural deep eutectic solvent extraction: optimisation, comparison and bioactivity. **Food Chemistry**, v. 398, 133871, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814622018337>. Acesso em: 17 fev. 2026.

RE, R.; PELLEGRINI, N.; PROTEGGENTE, A.; PANNALA, A.; YANG, M.; RICE-EVANS, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 26, n. 9-10, p. 1231-1237, 1999.

RIVAS, M.; BARBIERI, R. L. **Butiá: *Butia odorata***. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Edición 2018. Disponível em: https://www.proci-sur.org.uy/adjuntos/procisur_butia-procisur_67c.pdf. Acesso em: 22 set. 2023.

ROCHA, J. D. L.; GUILHERME, F. A. G.; ROCHA, D. I.; PEREIRA, K. A. R.; COELHO, C. P.; SOUZA, L. F. Morphometry of fruits and pyrenes in two morphotypes and populations of *Butia purpurascens* Glassman (Arecaceae). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 52, n. 8, e20210303, 2022.

RODRIGUES, C. E.; SCHÄFER, L.; GREGOLON, J. G. N.; OLIVEIRA, J. F.; BAEZ, O. P.; DEOLINDO, C. T. P.; MELO, A. P. Z.; SINGER, R. B.; KIST, T. B. L.; HOFF, R. Determination of amino acid content, fatty acid profiles, and phenolic compounds in non-conventional edible fruits of seven species of palm trees (Arecaceae) native to the southern half of South America. **Food Research International**, v. 163, 111995, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996922010535>. Acesso em: 17 fev. 2026.

RODRIGUES-AMAYA, B. B. **A guide to carotenoid analysis in foods**. Washington: ILST Press, 2001. 64p.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Avanços na pesquisa de carotenóides em alimentos: contribuições de um laboratório brasileiro. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, Campinas, v. 63, n. 2, p. 129-138, 2004.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; ESQUIVEL, P.; MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A. J. Comprehensive update on carotenoid colorants from plants and microalgae: challenges and advances from research laboratories to industry. **Foods**, v. 12, n. 22, p. 4080, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/22/4080>. Acesso em: 17 fev. 2026.

RODRIGUEZ-CONCEPCION, M.; AVALOS, J.; BONET, M. L.; BORONAT, A.; GOMEZ-GOMEZ, L.; HORNERO-MENDEZ, D.; LIMON, M. C.; MELÉNDEZ-MARTINEZ, A. J.; OLMEDILLA-ALONSO, B.; PALOU, A.; RIBOT, J.; RODRIGO, M. J.; ZACARIAS, L.; ZHU, C. A global perspective on carotenoids: metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health. **Progress in Lipid Research**, v. 70, p. 62-93, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0163782717300395>. Acesso em: 17 fev. 2026.

SAHU, S.; KUMARI, D.; KUSAM; KUILA, A.; GURJAR, R. S.; SHARMA, K.; VERMA, R. Deep eutectic solvent extraction of polyphenol from plant materials: current status and future prospects in food applications. **Food Chemistry**, v. 482, 144125, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814625013767>. Acesso em: 17 fev. 2026.

SAITO, T.; KONDO, S.; OHKAWA, K.; OHARA, H. How does abscisic acid control fruit quality as a plant bioregulator? **The Horticulture Journal**, v. 94, n. 1, p. 1-14, 2025. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/hortj/94/1/94_QH-R003/_article. Acesso em: 17 fev. 2026.

SCHOENFELD, J. D.; SIBENALLER, Z. A.; MAPUSKAR, K. A.; BRADLEY, M. D.; WAGNER, B. A.; BUETTNER, G. R.; MONGA, V.; MILHEM, M.; SPITZ, D. R.; ALLEN, B. G. Redox active metals and H₂O₂ mediate the increased efficacy of pharmacological ascorbate in combination with gemcitabine or radiation in pre-clinical sarcoma models. **Redox Biology**, v. 14, p. 417-422, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213231717305827>. Acesso em: 17 fev. 2026.

SGANZERLA, M. **Caracterização físico-química e capacidade antioxidante do butiá**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010. Disponível em: https://www.dctaufpel.com.br/ppgcta/manager/uploads/thesis/mest_marla_sganzerla.pdf. Acesso em: 10 out. 2025.

SHARMA, M.; DASH, K. K. Deep eutectic solvent-based microwave-assisted extraction of phytochemical compounds from black jamun Pulp. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 8, e13750, 2021.

SILVA, J. V. M.; SANTOS, A. S.; PEREIRA, G. A.; CHISTÉ, R. C. Ultrasound-assisted extraction using ethanol efficiently extracted carotenoids from peels of peach palm fruits (*Bactris gasipaes* Kunth) without altering qualitative carotenoid profile. **Heliyon**, v. 9, n. 4, e14933, 2023. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/full-text/S2405-8440\(23\)02140-0](https://www.cell.com/heliyon/full-text/S2405-8440(23)02140-0). Acesso em: 17 fev. 2026.

SIM, Y. Y.; ONG, W. T. J.; NYAM, K. L. Effect of various solvents on the pulsed ultrasonic assisted extraction of phenolic compounds from *Hibiscus cannabinus* L. leaves. **Industrial Crops and Products**, v. 140, 111708, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669019307186>. Acesso em: 17 fev. 2026.

SINGLETON, V.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdicphosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, v.16, p. 144–158, 1965.

SMITH, E. L.; ABBOTT, A. P.; RYDER, K. S. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. **Chemical Reviews**, v. 114, n. 21, p. 11060-11082, 2014.

SOARES, K. P.; LONGHI, S. J. Uma nova espécie de *Butia* (Becc.) Becc. (Arecaceae) para o Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 203-208, Santa Maria, 2011.

SWAINT, T.; HILLIS, W. E. The phenolic constituents of *Prunus domestica* – the quantitative analysis of phenolic constituents. **Journal Science Food Agriculture**, v.135, p. 135-144, London, 2000. Disponível em: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jsfa.2740100110>. Acesso em: 17 fev. 2026.

TABELA BRASILEIRA DE COMPOSIÇÃO DE ALIMENTOS. Universidade de São Paulo. Food Research Center. Versão 7.2. São Paulo, 2023. Disponível em: <http://www.fcf.usp.br/tbca>. Acesso em: 29 nov. 2023.

TANG, W.; CHEN, C.; ZHANG, Y.; CHU, Y.; YANG, W.; CUI, Y.; KOU, G.; CHEN, H.; SONG, H.; GONG, R. Effect of low-light stress on sugar and acid accumulation during fruit development and ripening of sweet cherry. **Horticulturae**, v. 9, n. 6, p. 654, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/9/6/654>. Acesso em: 17 fev. 2026.

TARAH, M.; AGHABABAEI, F.; MCCLEMENTS, D. J.; HADIDI, M. The potential of deep eutectic solvents in the extraction of alternative proteins. **Food Hydrocolloids**, v. 168, 111552, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X25005120>. Acesso em: 17 fev. 2026.

TEBBI, S. O.; DEBBACHE-BENAIIDA, N.; KADRI, N.; KADI, R.; ZAIDI, S. A novel strategy to improve the recovery of phenolic compounds from *Pistacia lentiscus* L. fruits using design-based statistical modeling for ultrasound-deep eutectic solvents extraction and the evaluation of their antioxidant potential. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 31, 100933, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352554122003370>. Acesso em: 17 fev. 2026.

UEDA, J. M.; MORALES, P.; FERNÁNDEZ-RUIZ, V.; FERREIRA, A.; BARROS, L.; CAROCHO, M.; HELENO, S. A. Powdered foods: structure, processing, and challenges: a review. **Applied Sciences**, v. 13, n. 22, p. 12496, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/22/12496>. Acesso em: 17 fev. 2026.

VALERO-MENDOZA, A. G.; MELÉNDEZ-RENTERIA, N. P.; CHÁVEZ-GONZÁLEZ, M. L.; FLORES-GALLEGOS, A. C.; WONG-PAZ, J. E.; GOVEA-SALAS, M.; ZUGASTI-CRUZ, A.; ASCACIO-VALDÉS, J. A. The whole pomegranate (*Punica granatum* L), biological properties and important findings: a review. **Food Chemistry Advances**, v. 2, 100153, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772753X22001411>. Acesso em: 17 fev. 2026.

VALKO, M.; JOMOVA, K.; RHODES, C. J.; KUČA, K.; MUSÍLEK, K. Redox- and non-redox-metal-induced formation of free radicals and their role in human disease. **Archives of Toxicology**, v. 90, p. 1-37, 2016.

VARGAS-SERNA, C. L.; OCHOA-MARTÍNEZ, C. I.; VÉLEZ-PASOS, C. Microwave-assisted extraction of phenolic compounds from pineapple peel using deep eutectic solvents. **Horticulturae**, v. 8, n. 9, p. 791, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/8/9/791>. Acesso em: 17 fev. 2026.

VENTURA, L. J. M. **Desenvolvimento do fruto de *Butia capitata* (Arecaceae) – aspectos estruturais, ultraestruturais e físico-químicos**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2021. 84 p. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/5a4e224c-745f-47d3-99a9-f67b3f8ca763>. Acesso em: 15 out. 2025.

VILKOVÁ, M.; PŁOTKA-WASYLKA, J.; ANDRUCH, V. The role of water in deep eutectic solvent-base extraction. **Journal of Molecular Liquids**, v. 304, 112747, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732220306577>. Acesso em: 17 fev. 2026.

WAGNER, J. G.; CRUZ, J. G.; SILVEIRA, T.; FERRI, N. M. L.; RICHTER, V. B.; LIMA, F. M.; FIGUEIRA, K. U.; MISTURA, C. C.; VIZZOTTO, M.; BARBIERI, R. L. Accessing the nutritional variability of *Butia odorata*: a food with identity. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 42, e54822, 2022a. Disponível em: <http://scielo.br/j/cta/a/mLf6pqBQJ6YcsQYgqGs8L5x/>. Acesso em: 17 fev. 2026.

WAGNER, J. G.; FERRI, N. M. L.; LUCAS, J. V.; HEIDEN, G.; VIZZOTTO, M.; BARBIERI, R. L. Herança alimentar: Investigação do uso e da variabilidade físico-química do butiá-da-serra (*Butia eriospatha*, Arecaceae). **Revista Ambientes em Movimento**, v. 2, n. 1, p. 31-34, 2022b. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/am/article/view/5368>. Acesso em: 10 out. 2025.

WANG, Z.; QIN, K.; FANG, W.; WANG, H. Neighborhood competition and understory-associated vegetation are important factors influencing the natural regeneration of subtropical mountain forests. **Forests**, v. 15, n. 6, 1017, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/15/6/1017>. Acesso em: 17 fev. 2026.

WEI, J.; ZHAO, G.; WU, G.; BO, Y.; YANG, D.; GUO, J.; MA, Y.; NA, M. An ultrasound-assisted extraction using an alcohol-based hydrophilic natural deep eutectic solvent for the determination of five flavonoids from *Platycladi Cacumen*. **Microchemical Journal**, 110076, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X24001887>. Acesso em: 17 fev. 2026.

WEREMFO, A.; ADULLEY, F.; DABIE, K.; ABASSAH-OPPONG, S.; PEPRAH-YAMOA, E. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic antioxidants from turkey berry (*Solanum torvum* Sw) fruits using response surface methodology. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 30, 100387, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214786122000195>. Acesso em: 17 fev. 2026.

XIA, P.; AHMMED, M. K.; RASHIDINEJAD, A. Exploring efficient extraction methods: Bioactive compounds and antioxidant properties from New Zealand damson plums. **Food Bioscience**, v. 55, 103057, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429223007083>. Acesso em: 17 fev. 2026.

XU, B.; TILIWA, E. S.; YAN, W.; AZAM, S. M. R.; WEI, B.; ZHOU, C.; MA, H.; BHANDARI, B. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: a review. **Food Research International**, v. 152, 110744, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096399692100644X>. Acesso em: 17 fev. 2026.

YIGIT, D.; YIGIT, N.; MAVI, A. Antioxidant and antimicrobial activities of bitter and sweet apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernels. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v. 42, n. 4, p. 346-352, 2009.

ZACCARI VEIGA, F. I.; DEL PUERTO, M.; CABRERA, M. C. *Butia*: physical, nutritional and antioxidant Properties of red, orange and yellow fruits. **Agrociencia Uruguay**, v. 25, n. NE2, e789, 2021. Disponível em: <https://agrocienciauruguay.uy/index.php/agrociencia/article/view/789>. Acesso em: 17 fev. 2026.

ZARIC, B. L.; MACVANIN, M. T.; ISENOVIC, E. R. Free radicals: relationship to human diseases and potential therapeutic applications. **The International Journal of Biochemistry & Cell Biology**, v. 154, 106346, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1357272522001911>. Acesso em: 17 fev. 2026.

ZHANG, J.; LI, Y.; ZHOU, T.; XU, D.; ZHANG, P.; LI, S.; LI, H. Bioactivities and health benefits of mushrooms mainly from China. **Molecules**, v. 21, n. 7, p. 938, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/21/7/938>. Acesso em: 17 fev. 2026.

ZHOU, P.; WANG, X.; LIU, P.; HUANG, J.; WANG, C.; PAN, M.; KUANG, Z. Enhanced phenolic compounds extraction from *Morus alba* L. leaves by deep eutectic solvents combined with ultrasonic-assisted extraction. **Industrial Crops and Products**, v. 120, p. 147-154, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669018303820>. Acesso em: 17 fev. 2026.

ZHU, Z.; GUAN, Q.; GUO, Y.; HE, J.; LIU, G.; LI, S.; BARBA, F. J.; JAFFRIN, M. Green ultrasound-assisted extraction of anthocyanin and phenolic compounds from purple sweet potato using response surface methodology. **International Agrophysics**, v. 30, p. 113-122, 2016. Disponível em: <https://www.international-agrophysics.org/Green-ultrasound-assisted-extraction-of-anthocyanin-and-phenolic-compounds-from-purple,104182,0,2.html>. Acesso em: 17 fev. 2026.