



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DANUBIA ANIELE FERNANDES DE AQUINO

**OTIMIZAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DA CASCA DE
MELÃO PELE DE SAPO (*Cucumis melo L.*) UTILIZANDO SOLVENTE EUTÉTICO
PROFUNDO ASSISTIDA POR ULTRASSOM**

PAU DOS FERROS

2026

DANUBIA ANIELE FERNANDES DE AQUINO

**OTIMIZAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DA CASCA DE
MELÃO PELE DE SAPO (*Cucumis melo L.*) UTILIZANDO SOLVENTE EUTÉTICO
PROFUNDO ASSISTIDA POR ULTRASSOM**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharela Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: José Mariano da Silva Neto, Prof. Dr.

Coorientadora: Shirlene Kelly Santos Carmo, Prof. Dra.

PAU DOS FERROS

2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A657o Aquino, Danubia Aniele Fernandes de.
Otimização da extração de compostos fenólicos da
casca de melão pele de sapo (*Cucumis melo* L.)
utilizando solvente eutético profundo assistida
por ultrassom / Danubia Aniele Fernandes de
Aquino. - 2026.
52 f. : il.

Orientador: José Mariano da Silva Neto.
Coorientadora: Shirlene Kelly Santos Carmo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2026.

1. Compostos fenólicos. 2. Solventes eutéticos
profundos. 3. Ultrassom. 4. Resíduos
agroindustriais. 5. *Cucumis melo* L.. I. Silva
Neto, José Mariano da, orient. II. Carmo,
Shirlene Kelly Santos, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DANUBIA ANIELE FERNANDES DE AQUINO

**OTIMIZAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DA CASCA
DE MELÃO PELE DE SAPO (*Cucumis melo L.*) UTILIZANDO SOLVENTE
EUTÉTICO PROFUNDO ASSISTIDA POR ULTRASSOM**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharela Interdisciplinar em Ciência e
Tecnologia.

Defendida em: 02/07/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JOSE MARIANO DA SILVA NETO**
Data: 07/07/2026 16:44:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

José Mariano da Silva Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **SHIRLENE KELLY SANTOS CARMO**
Data: 07/07/2026 18:05:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Shirlene Kelly Santos Carmo, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **ALINE MARA MAIA BESSA**
Data: 08/07/2026 12:51:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aline Mara Maia Bessa, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **LIBIA DE SOUSA CONRADO OLIVEIRA**
Data: 09/07/2026 15:33:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Líbia de Sousa Conrado Oliveira, Profa. Dra. (UFCG)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Antônio Vicente de Aquino (Toinho) por sempre confiar em mim e acreditar no meu potencial. Mesmo não estando presente fisicamente para compartilhar este momento, seu amor, seus ensinamentos e suas lembranças permanecem vivos em meu coração e me acompanham em cada conquista. Dedico esta realização à sua memória, com gratidão por tudo o que fez por mim e por ter contribuído para a pessoa que sou hoje. Sei que, de alguma forma, o senhor está celebrando esta vitória ao meu lado (*In Memoriam*).

A minha mãe, Diana Fernandes por ser meu suporte de vida; E a todos que contribuíram para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, por me sustentar nos momentos mais difíceis e por me guiar durante toda esta trajetória acadêmica. Foi por Ele que encontrei forças para seguir em frente e superar os desafios encontrados ao longo do caminho.

À minha mãe, Diana Fernandes, que, apesar de todas as dificuldades enfrentadas pela vida, sempre foi a primeira a acreditar que eu era capaz e a me ajudar de forma direta sempre que precisei. Obrigada por estar sempre ao meu lado, por me incentivar e apoiar minhas decisões. Sua presença constante e suas orações diárias me fortaleceram em todos os dias em que saía de casa.

À minha irmã, Dayane Daniele, por sempre estar ao meu lado nos momentos bons e ruins. Por todas as noites em que preparava meu lanche para que, quando eu chegasse, tudo estivesse pronto. Sua presença, amor e cuidado foram essenciais durante esses anos acadêmicos. Ao meu irmão, Diego Adriano, por sempre apoiar meus estudos e contribuir para que esse sonho fosse realizado. Muito obrigada!

À minha sobrinha, Isis Rebeca, que transformou minha vida com sua chegada. Ela se tornou meu combustível para prosseguir e foi responsável por me salvar tantas vezes do cansaço apenas com um sorriso e um abraço. De forma geral, agradeço a toda a minha família, por acreditarem em mim, e por todo apoio recebido.

Ao meu namorado, Luís Vinícius, por ser meu companheiro e por acreditar no meu potencial, por me incentivar e me fortalecer. Pela presença constante e por me acompanhar durante parte dessa jornada. Sua determinação me motiva a alçar voos cada vez maiores. Agradeço por ter você ao meu lado e por ser um incentivo diário, sou muito grata por isso. Com você, tudo fica mais feliz.

Aos meus amigos e companheiros de curso, José Eduardo e Paulina Viana, que, durante todo esse percurso, formaram o meu trio e que, além de amigos, tornaram-se irmãos. Agradeço pela paciência, pelo incentivo e pela parceria. Vocês tornaram esse processo mais leve. Agradeço também a todas as amizades construídas ao longo do curso, que, de forma direta ou indireta, contribuíram para este momento.

Aos meus primos e amigos de infância, Maria Edineuda e Genilson de Freitas, que dividiram comigo os primeiros aprendizados e as primeiras conquistas. Obrigada pelo apoio constante.

Ao meu orientador, José Mariano da Silva Neto, que desempenhou esse papel com excelência. Obrigada por toda a paciência, contribuição e incentivo durante este processo.

Agradeço também à minha coorientadora, Shirlene Kelly Santos Carmo, pelas contribuições e dedicação ao longo desta jornada. É perceptível quando um profissional exerce sua profissão por amor, e vocês fazem isso com admirável dedicação.

Ao GPAQ – Grupo de Processos e Análises Químicas, por me acolher e me permitir vivenciar o mundo da pesquisa, contribuindo diretamente para o meu conhecimento e para o fortalecimento do meu amor pela Química.

Por fim, agradeço à UFERSA e a todos os docentes que contribuíram para o meu amadurecimento pessoal e profissional ao longo desta jornada. Os ensinamentos, conselhos e incentivos foram essenciais para a conclusão desta importante etapa da minha vida.

"Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar."

Josué 1:9

RESUMO

A crescente produção de melão no semiárido brasileiro tem contribuído para a geração de grandes quantidades de resíduos agroindustriais, especialmente cascas e sementes, que apresentam elevado potencial para o aproveitamento biotecnológico. Nesse contexto, a casca do melão pele de sapo (*Cucumis melo L.*) destaca-se como uma fonte promissora de compostos fenólicos com reconhecida atividade antioxidante. Assim, este trabalho teve como objetivo otimizar a extração de compostos fenólicos da casca de melão pele de sapo utilizando solvente eutético profundo (DES) assistida por ultrassom. O solvente eutético profundo foi preparado utilizando cloreto de colina e ácido cítrico na proporção molar 1:1, sendo posteriormente diluído em diferentes concentrações. A extração foi conduzida por meio de planejamento experimental fatorial 2^3 , com três pontos centrais, avaliando os efeitos da concentração de DES (10, 20 e 30%), da razão da casca de melão/volume de DES (1:20, 1:30 e 1:40) e do tempo de extração (30, 40 e 50 min). Após a extração foram determinadas as concentrações de compostos fenólicos totais e as atividades antioxidantes pelo método da captura dos radicais livres ABTS e DPPH. Os resultados mostraram que os teores de compostos fenólicos totais variaram entre 748,4 e 1202,6 mg GAE/100 g de base úmida. Os valores de atividade antioxidante variaram de 35,0 a 73,8 $\mu\text{mol TEAC/g}$ para o método DPPH e de 33,5 a 127,1 $\mu\text{mol TEAC/g}$ para o método ABTS. A maior recuperação desses compostos e das atividades antioxidantes utilizando solventes eutéticos profundos e banho ultrassônico foram obtidas utilizando DES a 30%, razão massa/volume de 1:20 e tempo de extração de 50 minutos. A análise estatística indicou que o tempo foi a variável com influência significativa sobre a resposta concentração de compostos fenólicos totais e a variável razão massa/volume mostrou-se significativa para as atividades antioxidantes determinadas pelos métodos ABTS e DPPH, com nível de confiança de 95%. Os resultados evidenciam o potencial da combinação entre solventes eutéticos profundos e ultrassom como alternativa sustentável e eficiente para a valorização de resíduos agroindustriais e obtenção de compostos bioativos de interesse industrial.

Palavras-chave: compostos fenólicos; solventes eutéticos profundos; ultrassom; resíduos agroindustriais; *Cucumis melo L.*

ABSTRACT

The increasing production of melons in the Brazilian semi-arid region has contributed to the generation of large quantities of agro-industrial waste, especially peels and seeds, which have high potential for biotechnological use. In this context, the rind of the honeydew melon (*Cucumis melo* L.) stands out as a promising source of phenolic compounds with recognized antioxidant activity. Thus, this work aimed to optimize the extraction of phenolic compounds from the peel of the honeydew melon using ultrasound-assisted deep eutectic solvents (DES). The deep eutectic solvent was prepared using choline chloride and citric acid in a 1:1 molar ratio, and subsequently diluted to different concentrations. The extraction was conducted using a 23 factorial experimental design with three central points, evaluating the effects of DES concentration (10, 20, and 30%), mass/volume ratio (1:30, 1:20, and 1:10), and extraction time (30, 40, and 50 min). Following extraction, total phenolic compound concentrations and antioxidant activities were determined using the ABTS and DPPH free radical scavenging methods. The results showed that total phenolic compound contents ranged from 748.4 to 1202.6 mg GAE/100 g (wet basis). Antioxidant activity values ranged from 35.0 to 73.8 $\mu\text{mol TEAC/g}$ for the DPPH method and from 33.5 to 127.1 $\mu\text{mol TEAC/g}$ for the ABTS method. The highest recovery of these compounds and antioxidant activities using deep eutectic solvents and an ultrasonic bath was achieved using 30% DES, a 1:20 mass/volume ratio, and an extraction time of 50 minutes. Statistical analysis indicated that time was the variable with a significant influence on the total phenolic compound concentration response, and the mass/volume ratio was significant for the antioxidant activities determined by the ABTS and DPPH methods, at a 95% confidence level. The results demonstrate the potential of combining deep eutectic solvents and ultrasound as a sustainable and efficient alternative for the valorization of agro-industrial waste and the recovery of bioactive compounds of industrial interest.

Keywords: phenolic compounds; deep eutectic solvents; ultrasound; agro-industrial waste; *Cucumis melo* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do procedimento experimental.	29
Figura 2 - Fluxograma da preparação do DES.	31
Figura 3 - Diagrama de Pareto para Compostos Fenólicos Totais.	38
Figura 4 - Superfície de resposta sobre o teor de compostos fenólicos totais: influência da concentração do DES e do tempo e influência da razão e do tempo.	40
Figura 5 - Diagrama de Pareto para atividade antioxidante DPPH.	42
Figura 6 - Superfície de resposta sobre a atividade antioxidante DPPH: influência da razão e do tempo e influência da razão e da concentração do DES.	44
Figura 7 - Diagrama de Pareto para atividade antioxidante ABTS.	46
Figura 8 - Superfície de resposta sobre a atividade antioxidante ABTS: influência da razão e do tempo e influência da razão e da concentração do DES.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre as técnicas extrativas	28
Tabela 2 - Níveis do planejamento experimental	32
Tabela 3 - Matriz do planejamento experimental 2 ³ mais três repetições no ponto central.	32
Tabela 4 - Teor de compostos fenólicos totais com DES	36
Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA).	39
Tabela 6 - Determinação da atividade antioxidante (DPPH).....	41
Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) para DPPH.	43
Tabela 8 - Determinação da atividade antioxidante (ABTS).....	44
Tabela 9 - Análise de variância (ANOVA) para ABTS.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABTS	2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)
CFT	Compostos Fenólicos Totais
$C_6H_8O_7 \cdot H_2O$	Ácido Cítrico Monoidratado
DES	Deep Eutectic Solvents
DPPH	(2,2 - Diphenyl-1-picryl-hidrazil)
EAE	Extração Assistida por Enzimas
EAM	Extração Assistida por Micro-ondas
EAU	Extração Assistida por Ultrassom
EM	Extração por Maceração
HBA	Hydrogen Bond Acceptor
HBD	Hydrogen Bond Donor
kHz	Quilohertz
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
TEAC	<i>Trolox Equivalent Antioxidant Capacity</i>
GAE	Equivalente de Ácido Gálico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 O melão (<i>Cucumis melo L.</i>) e seus resíduos	18
3.2 Compostos Fenólicos	20
3.3 Solventes eutéticos profundos (<i>Deep Eutectic Solvents</i> – DES).....	21
3.4 Técnicas de extração de compostos fenólicos	22
3.4.1 <i>Extração por Agitação Tradicional (Maceração)</i>	23
3.4.2 <i>Extração Assistida por Micro-ondas (EAM)</i>	24
3.4.3 <i>Extração Assistida por Enzimas (EAE)</i>	25
3.4.4 <i>Extração Assistida por Ultrassom (EAU).....</i>	26
4 METODOLOGIA.....	29
4.1 Obtenção e preparação da matéria prima.....	29
4.2 Preparo dos solventes eutéticos profundos (DES)	30
4.3 Extração dos compostos fenólicos totais	31
4.4 Determinação dos compostos fenólicos totais (CFT).....	33
4.5 Atividade Antioxidante pela captura do radical DPPH	33
4.6 Atividade Antioxidante pela captura do radical catiônico ABTS	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5.1 Efeito das variáveis de processo na recuperação de compostos fenólicos totais da casca de melão pele de sapo	36
5.2 Análise da Atividade Antioxidante pela captura do radical DPPH	40
5.3 Análise da Atividade Antioxidante pela captura do radical ABTS	44
6 CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro apresenta condições climáticas favoráveis ao cultivo de frutas tropicais e hortaliças, entre as quais se destaca o melão (*Cucumis melo L.*), uma das culturas mais relevantes dessa região (Nascimento *et al.*, 2012). Nesse contexto, a produção nacional concentra-se na região Nordeste, especialmente nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, onde o clima seco e ensolarado favorece o desenvolvimento da cultura.

Em 2024, o Rio Grande do Norte consolidou-se como o maior produtor nacional de melão, com uma produção de 505.212 toneladas. O valor da produção ultrapassou R\$ 858.141.000,00, evidenciando a expressiva importância socioeconômica dessa cultura. No mesmo período, foram cultivados 18.943 hectares, dos quais 18.930 hectares foram efetivamente colhidos, indicando elevada eficiência produtiva associada às condições climáticas favoráveis e ao uso de tecnologias de cultivo (IBGE, 2024).

Entre os diferentes tipos cultivados, destacam-se o melão amarelo e o melão pele-de-sapo. Além de sua relevância econômica, o melão apresenta importante valor nutricional e funcional, sendo rico em fibras, vitaminas, sais minerais, polifenóis, ácidos orgânicos e lignanas. Em função dessa composição, o fruto possui propriedades benéficas à saúde, como efeitos laxantes, calmantes, refrescantes e diuréticos (Embrapa, 2023).

Paralelamente à sua relevância produtiva e nutricional, a cadeia do melão gera quantidades significativas de resíduos agroindustriais, principalmente cascas, sementes e talos, que muitas vezes são descartados sem aproveitamento adequado (Mallek-Ayadi *et al.*, 2017). Estima-se que a casca possa representar entre 25 e 44% do peso total do fruto, o que reforça o potencial de seu reaproveitamento e tem motivado estudos voltados à sua valorização (Ylmaz *et al.*, 2021).

Nesse cenário, o aproveitamento desses resíduos tem despertado crescente interesse científico e industrial, especialmente pela possibilidade de extração de compostos bioativos de alto valor agregado, como os compostos fenólicos. Esses compostos são amplamente distribuídos em frutas, vegetais e grãos e se destacam por suas propriedades antioxidantes, sendo aplicados nas indústrias alimentícia, farmacêutica, têxtil e cosmética. Além disso, estão associados a diversos benefícios à saúde, incluindo a prevenção de doenças cardiovasculares e diabetes, a redução do risco de distúrbios neurodegenerativos e a atuação na prevenção da osteoporose (Suliman *et al.*, 2023).

Diferentes técnicas têm sido empregadas para a extração desses compostos, como extração por solventes convencionais, extração assistida por ultrassom, destilação, adsorção,

tratamento enzimático, filtração por membranas e oxidação eletroquímica. Apesar da eficiência de algumas dessas abordagens, muitas ainda apresentam limitações, como elevado custo operacional e o uso de solventes orgânicos voláteis, que podem apresentar baixa eficiência, alta emissão atmosférica e impactos ambientais significativos, contribuindo para o aquecimento global (Cañadas *et al.*, 2021). Assim, há uma crescente demanda pelo desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis.

Nesse contexto, os solventes eutéticos profundos (*Deep Eutectic Solvents* – DES) surgem como uma alternativa promissora aos solventes convencionais, devido às suas propriedades de baixa volatilidade, baixa toxicidade, biodegradabilidade, sustentabilidade e capacidade de estabilização de solutos. Além disso, suas propriedades físico-químicas podem ser ajustadas conforme a combinação de seus constituintes, como viscosidade, polaridade e tensão superficial, o que amplia suas aplicações em processos de extração (Fernández *et al.*, 2018).

Associada ao uso de solventes verdes, a extração assistida por ultrassom (EAU) tem se destacado como uma técnica eficiente para a obtenção de compostos fenólicos, proporcionando aumento de rendimento, redução do tempo de extração e obtenção de extratos de melhor qualidade, contribuindo para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis (Bosiljkov *et al.*, 2017; Esclapez *et al.*, 2011). Essa técnica baseia-se no fenômeno de cavitação acústica, que promove a ruptura das paredes celulares e melhora a transferência de massa, operando em frequências entre 18 e 40 kHz, sendo amplamente reconhecida como uma das abordagens mais eficientes para esse tipo de extração (Casazza *et al.*, 2010; Novak *et al.*, 2008).

Dessa forma, considerando o crescimento da produção e do consumo de melão, a elevada geração de resíduos agroindustriais e a necessidade de soluções sustentáveis para sua valorização, a casca do melão pele-de-sapo se apresenta como uma matéria-prima promissora para a obtenção de compostos fenólicos. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a eficiência da extração de compostos fenólicos totais a partir da casca de melão, utilizando solvente eutético profundo associado à técnica de ultrassom, com aplicação de planejamento experimental para otimização do processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar e otimizar a extração de compostos fenólicos totais da casca do melão pele de sapo (*Cucumis melo L.*) utilizando solvente eutético profundo (DES) assistida por ultrassom, visando o aproveitamento sustentável desse resíduo agroindustrial.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter e preparar a biomassa da casca do melão pele de sapo para utilização nos ensaios de extração;
- Preparar o solvente eutético profundo à base de cloreto de colina e ácido cítrico em diferentes concentrações;
- Avaliar a influência da concentração do DES, da razão massa/volume e do tempo de extração sobre o rendimento de compostos fenólicos totais;
- Aplicar a técnica de extração assistida por ultrassom através do banho ultrassônico para obtenção dos compostos fenólicos presentes na casca do melão pele de sapo;
- Quantificar os compostos fenólicos totais dos extratos;
- Determinar a atividade antioxidante dos extratos pelos métodos de captura dos radicais DPPH e ABTS;
- Utilizar planejamento experimental fatorial para identificar as variáveis mais significativas e otimizar as condições de extração;
- Contribuir para a valorização e o aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais provenientes da cadeia produtiva do melão.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O melão (*Cucumis melo L.*) e seus resíduos

O melão (*Cucumis melo L.*) pertence à família das *Cucurbitaceae* e é um tipo de hortaliça que apresenta características rasteiras e ciclo de vida curto. É distribuído comercialmente como fruta e, por apresentar sabor e textura agradáveis, constitui uma das frutas mais consumidas do mundo (Embrapa, 2023). Em razão ao seu aroma fascinante e ao sabor doce de sua polpa, o cultivo e o consumo de melões aumentam cada vez mais, apresentando uma produção global de cerca de 28,5 milhões de toneladas em 2022 (Zhang *et al.*, 2024; Faostat, 2022).

Quando se trata da composição química da casca do melão, podemos destacar a presença de proteínas, lipídios, carboidratos, fibra alimentar e elementos minerais como cálcio, potássio, magnésio e sódio. Drishya e Wani (2024), destacam em seu estudo a caracterização e propriedades funcionais da casca do melão, onde apresentam 7,48% de proteína total, 69,77% de carboidratos totais e 41,69% de fibra alimentar total. Com relação aos elementos minerais, o cálcio apareceu como elemento predominante no melão com (1 153,12 mg/100 g), se tornando ainda mais relevante, já que, o cálcio é um elemento fundamental para a composição da estrutura humana, enquanto o potássio, magnésio e sódio apresentaram (884,68 mg/100 g), (389,65 mg/100 g) e (144,83 mg/100 g), respectivamente. Além do mais, Drishya e Wani, (2024) evidenciaram em seus estudos que as sementes de melão demonstram presenças significativas de compostos bioativos benéficos a saúde, como fenólicos, tocoferóis e fitosteróis. Dessa maneira, é perceptível como a casca e a semente do melão são subprodutos ricos em nutrientes, surgindo como uma opção eficiente para o reaproveitamento desse subproduto.

O crescente consumo de melão no Brasil e no mundo tem impulsionado sua produção em larga escala, além de ser amplamente consumido in natura, o fruto é utilizado na elaboração de diversos produtos alimentícios, como saladas, sucos e conservas, o que também resulta na geração de quantidades significativas de resíduos agroindustriais. Entre os produtores de melão, destacam-se a China, a Turquia, a Índia e o Brasil, que se encontram em países tropicais e subtropicais (Zhang *et al.*, 2026; Cui *et al.*, 2022; Faostat, 2024).

No Brasil destacam-se os polos Mossoró-Açu e Baixo Jaguaribe, sendo os maiores produtores e exportadores do país, indicando a sua importância econômica para a geração de

empregos nos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará, gerando em torno de 28 mil empregos diretos e 94 mil empregos indiretos, destacando a eficiência da cadeia produtiva do melão (Embrapa, 2009).

Na exportação de frutas, o Rio Grande do Norte é o estado de maior destaque no Brasil, ocupando o primeiro lugar dos anos 2020 a 2023, destacando a importância da fruticultura potiguar (Martins, 2024; Agrostat, 2024). Nos polos Mossoró-Açu (RN) e Baixo Jaguaribe (CE) o Melão é a fruta mais produzida, e possui elevada importância na economia dos estados no setor de fruticultura (Martins, 2024). Os estados do Rio Grande do Norte e do Ceará se apresentam como destaque em termos de exportação e são responsáveis por inserir o Brasil como segundo maior exportador de melão no cenário internacional (Gazzola et al. 2020; Penha e Alves, 2018).

Um desafio impactante e que demonstra situação crítica é a geração e gestão dos resíduos e subprodutos de frutas e vegetais, apesar de que os trabalhos para reduzir esse tipo de desperdício alimentar estão ganhando força, ainda expõe quantidades significativas de produtos que não são utilizadas e são descartadas em vários estágios da cadeia de suprimentos (Gupta *et al.*, 2024).

As cascas, sementes e outros restos de frutas, são materiais residuais, que demonstram riscos significativos ao meio ambiente se não forem tratados adequadamente, sendo que os subprodutos de frutas representam aproximadamente 16% do total de resíduos alimentares. Associado ao consumo elevado de melão no Brasil e no mundo, a geração de resíduos também é um fator a ser observado. É gerado uma quantidade significativa de resíduos, principalmente na forma de cascas, através da produção anual de frutas cítricas, especialmente sucos concentrados e congelados, os resíduos não só contribuem para a poluição ambiental, como também representam um recurso subutilizado do fruto (Akachat *et al.*, 2025).

Segundo Arumuganainar *et al.* (2025),

pesquisas modernas elucidaram as consequências ambientais do gerenciamento inadequado de resíduos de frutas. Métodos de descarte impróprios podem resultar em odores desagradáveis, contaminação de ecossistemas aquáticos e terrestres e proliferação de microrganismos patogênicos. No entanto, está ocorrendo uma mudança típica na conceitualização dos resíduos de frutas. Em vez de serem percebidos como um passivo, esses subprodutos são cada vez mais reconhecidos como valiosos reservatórios de nutrientes e compostos bioativos (Arumuganainar, 2025).

Dessa forma, resíduos agroindustriais deixaram de ser considerados apenas materiais sem valor econômico e passaram a ser reconhecidos como importantes fontes de compostos

bioativos. Esse cenário tem impulsionado pesquisas voltadas ao aproveitamento desses resíduos, reduzindo seu descarte inadequado e promovendo a extração de compostos fenólicos (Gupta *et al.*, 2024). Como os resíduos do processamento do melão, especialmente a casca, que se apresenta como fonte promissora para a extração de compostos fenólicos e antioxidantes.

3.2 Compostos Fenólicos

Os compostos fenólicos por definição, são aqueles que possuem em sua estrutura um anel aromático com um ou mais substituintes hidroxila (Golmakani *et al.*, 2025; Balboa *et al.*, 2013). Destacam-se na classe de moléculas promissoras para a conservação de alimentos, derivados de plantas medicinais ou como conservantes naturais (Mourão e Sant'Ana., 2026; Ali *et al.*, 2025; Elnahal *et al.*, 2022). Além disso, esses compostos são metabólicos secundários facilmente encontrados em frutas, vegetais e grãos (Flores *et al.*, 2012; Bernal, *et al.*, 2010).

A sua estrutura química é composta por anéis aromáticos hidroxilados, e apresentam forte capacidade antioxidante por meio da eliminação dos radicais livres e quelação de metais, inibição enzimática, interferência no metabolismo microbiano e atividade antimicrobiana via ruptura da membrana (Mourão e Sant'Ana., 2026; Jomova *et al.*, 2025).

Por conta das suas atividades antioxidantes e antimicrobianas, os compostos fenólicos derivados de alimentos têm despertado um grande interesse em pesquisas, pois, está relacionado a prevenção do câncer, doenças cardiovasculares e distúrbios inflamatórios (Fernández *et al.*, 2018; Romero-González, Frenich e Vidal, 2012; Flores *et al.*, 2012; Działo *et al.*, 2016; Lou *et al.*, 2012). Os compostos fenólicos podem ser solúveis em água como os ácidos fenólicos, fenilpropanoides, flavonoides e quinonas ou então insolúveis em água como os taninos condensados, ligninas e ácidos hidroxicinâmicos, que diferenciam com base na sua estrutura química (Taheri e Jafari, 2019).

Por exibirem atividades biológicas como atividades antioxidantes e antimicrobianas, esses compostos são amplamente utilizados em áreas como a medicina. As atividades antioxidantes presentes em compostos, baseiam-se na capacidade que o composto possui em bloquear ou inibir processos oxidativos influenciados por espécies reativas de oxigênio como radical hidroxila, radical lipídico e óxido nítrico, a fim de proteger moléculas de proteínas, lipídeos e carboidratos que são os principais alvos em um processo de oxidação (Cavalcante *et al.*, 2024; Matkowski, 2008; Reische; Lillard; Eitenmiller, 2008). Os métodos mais utilizados para medir as atividades antioxidantes, são os de captura do radical ABTS (2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)) e DPPH (2,2 - Diphenyl-1-picryl-hidrazil).

O DPPH é um radical livre obtido de forma direta por meio da dissolução do reagente em meio orgânico. É um método bastante utilizado para avaliar o potencial antioxidante em frutas, baseado na captura do radical DPPH por antioxidantes, causando uma redução da absorbância a 515 nm (Rufino *et al.*, 2007). Na captura do radical DPPH, a reação ocorre entre as moléculas antioxidantes com o radical DPPH, onde transferem átomos de hidrogênio ou elétrons, e com isso, reduzem sua coloração púrpura (Donoso-Bustamante *et al.*, 2025).

A captura do radical ABTS é um dos métodos mais empregados para medir atividades antioxidantes (Rufino *et al.*, 2007). Nesse método, a reação ocorre entre os antioxidantes e o ABTS^{•+}, ocorrendo assim, a transferência de elétrons, que o convertem de sua forma radical colorida para sua forma reduzida incolor, e com isso, o grau de redução está correlacionado com a capacidade antioxidante da molécula púrpura (Donoso-Bustamante *et al.*, 2025).

3.3 Solventes eutéticos profundos (*Deep Eutectic Solvents* – DES)

Os Solventes Eutéticos Profundos (DES) são solventes verdes, formados a partir de interações de ligações de hidrogênio entre um doador (HBD) e um aceptor de ligação (HBA), com proporções molares específicas (Alasalvar, 2025). Uma das características mais evidentes presentes nos solventes eutéticos profundos é o ponto de fusão, que se caracteriza por ser mais baixo quando comparado ao receptor ou doador de ligação de hidrogênio, já que as fortes interações de ligação de hidrogênio impedem a cristalização dos componentes originais (Duan *et al.* 2018; Wagle *et al.* 2014).

Surgiram como uma alternativa sustentável aos solventes tradicionais utilizados na extração de compostos, como o metanol e o etanol, que são solventes caracterizados, principalmente, pelo seu baixo custo, porém, diversas limitações estão associadas ao seu uso, já que esses solventes podem ser tóxicos, em níveis e formas diferentes, podendo causar inflamabilidade, toxicidade e principalmente, riscos ao meio ambiente (Dong *et al.*, 2025; Cegledi *et al.*, 2024).

A partir disso, evidência que os usos dos solventes naturais se revelam como alternativas mais ecológicas na extração dos compostos fenólicos, destacando-se por não apresentarem toxicidade ao ambiente, são biodegradáveis, estão alinhados aos princípios da química verde e proporcionam extrações eficientes, sendo superiores aos solventes sintéticos.

Os DES se destacam pela facilidade na preparação e por apresentarem propriedades físico-químicas ajustáveis, densidade, viscosidade, tensão superficial e polaridade são as

principais responsáveis por maximizar a eficiência de extração dos compostos fenólicos (Dong *et al.*, 2025; Tegi *et al.*, 2024). A possibilidade de ajuste das propriedades físico-químicas é um fator crucial na utilização dos DES, o que amplia o desenvolvimento de abordagens eficientes na extração de compostos fenólicos. A principal desvantagem dos solventes eutéticos profundos (DES) em comparação com os solventes orgânicos é a alta viscosidade, que impacta diretamente na capacidade extrativa do composto (Alasalvar, 2025; Fu *et al.*, 2021), ainda assim, é a solução mais ambientalmente correta para a extração de biomassa.

Sua aplicação está diretamente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial à ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis, que preconiza a implementação de práticas que promovam a gestão sustentável de recursos, a redução de impactos ambientais e o desenvolvimento de processos mais limpos e eficientes. Ressaltando como a adoção dos DES é importante dentro do conceito de sustentabilidade, já que podem proporcionar melhores condições de extração, dependendo da combinação de técnicas envolvidas (Onu, 2015).

Arelado a isso, tem-se o conceito de química verde, que busca soluções para redução exacerbada da poluição por meio de processos mais limpos. Existem 12 princípios da química verde que propõem melhorias eficientes em sua aplicação, dentre esses, o 3 - síntese de compostos menos tóxicos e o 4 – desenvolvimento de produtos seguros, estão interligados com o que é definido para o uso de DES em extração de compostos fenólicos, já que, empregam a substituição de compostos de alta toxicidade por compostos de menor toxicidade e a produção de produtos que desenvolvam funções semelhantes e que sejam, consequentemente, menos tóxicos ambientalmente (Prado, 2003; Anatas *et al.*, 2002; Winterton, 2001; Hjeresen, *et al.*, 2000; Trost, 1995).

Existem variáveis associadas para que o uso do DES seja eficiente na extração dos compostos fenólicos, como por exemplo a razão massa volume, proporção de HBA e HBD, a técnica e o tempo de extração. O aumento na eficiência de extração de compostos fenólicos é significativo quando se utiliza a otimização dos doadores e receptores de ligação de hidrogênio dos DES (Chen *et al.*, 2025).

3.4 Técnicas de extração de compostos fenólicos

Diversas técnicas são empregadas para a extração de compostos fenólicos, entre os variados tipos, destacam-se a extração por solvente, adsorção, destilação, maceração, extração assistida por ultrassom, extração assistida por micro-ondas, tratamento enzimático, filtração por

membrana e oxidação eletroquímica. Apesar da maioria desses métodos serem frequentemente utilizados e demonstrarem um elevado potencial de extração, alguns desses apresentam desvantagens significativas, como o alto custo operacional, geração de poluentes secundários e a necessidade de pós-tratamento adicional, afetando o desempenho da sua aplicação na indústria (Suliman *et al.*, 2023). Com isso, torna-se perceptível a necessidade de substituir métodos convencionais utilizando solventes voláteis, por técnicas de extração sustentáveis e aliadas as tecnologias verdes, promovendo de forma eficiente a utilização dos resíduos agrícolas e do seu valor agregado.

3.4.1 Extração por Agitação Tradicional (Maceração)

A extração por maceração (EM) é um método amplamente utilizado para a obtenção de compostos fenólicos, por se tratar de uma técnica tradicional e de fácil aplicação. Entretanto, apresenta menor rendimento quando comparada a tecnologias mais recentes, como a extração assistida por ultrassom (Deng *et al.*, 2017).

Apesar disso, de acordo com Zhu *et al.* (2025), o método de extração por maceração apresenta vantagens, como a baixa probabilidade de degradação química, a preservação da estabilidade estrutural dos componentes termossensíveis e, é uma das técnicas que mais se alinham as demandas do processo produtivo. Os autores ainda destacam que melhorias podem ser acrescentadas ao método, principalmente relacionadas ao tipo de solvente utilizado, onde uma solução viável seria a substituição dos solventes comuns, por solventes eutéticos profundos (DES), já que são sustentáveis e proporcionam uma menor degradação ambiental.

Nos sistemas convencionais de extração, como a maceração, é necessária a utilização de grandes quantidades de solventes, além disso, esses processos levam um maior tempo de execução (Vieira *et al.*, 2017). Nesse contexto, a substituição dos solventes orgânicos por alternativas mais sustentáveis em processos de extração de compostos tem sido considerada uma estratégia eficiente, contribuindo para o avanço dos princípios da química verde.

Deng *et al.* (2017) demonstraram em um estudo comparativo a extração de compostos fenólicos totais utilizando os métodos de maceração e de ultrassom, aplicando como matéria prima a *Olea europaea* L. Como resultado, para a extração EM obtiveram 5,18 mg/g, já para extração EAU o resultado obtido foi de 7,01 mg/g. As condições ótimas encontradas foram de (24 mL/g, 50 °C e tempo 4,7 h) e (22 mL/g, 47 °C e tempo 30 min), respectivamente.

Ao analisar essa comparação, observa-se que a EAU, neste estudo, proporcionou maior rendimento de compostos fenólicos em menor tempo, indicando maior eficiência da técnica

quando comparada as técnicas convencionais. Apesar de operar em temperaturas maiores que a maceração, a extração assistida por ultrassom continua demonstrando maior potencial na extração de compostos fenólicos.

3.4.2 Extração Assistida por Micro-ondas (EAM)

A extração assistida por micro-ondas (EAM) é um método de extração de compostos fenólicos ecologicamente correto, apresentando vantagens significativas, como por exemplo reduzir o gasto de energia, preservar a qualidade, a estabilidade das estruturas e propriedades dos compostos. A difusividade e a solubilidade são as principais características da EAM, proporcionando uma melhor afinidade com compostos bioativos (Cano-Gonzalez *et al.*, 2025). Além disso, quando comparada às técnicas convencionais, a extração assistida por micro-ondas apresenta menor tempo de processamento e menor consumo de solventes (Vieira *et al.*, 2017; Destandau *et al.*, 2013; Routray and Orsat, 2012).

Na técnica de extração assistida por micro-ondas, a potência e o tempo de irradiação influenciam na efetividade do processo, melhorando a penetração do solvente na matriz vegetal e a ruptura da membrana celular (Jaouhari *et al.*, 2025; Del-Castillo-Llamosas *et al.*, 2023). Os autores destacam que temperaturas elevadas e tempos de extração mais longos podem afetar a estabilidade dos compostos, como por exemplo antocianinas, já que possuem uma maior sensibilidade térmica.

O aquecimento no método de micro-ondas é capaz de destruir a parede celular da planta e, assim, liberar os compostos ativos, fornecendo uma extração mais eficiente (Miranda *et al.*, 2025). Com base nisso, as tecnologias ecológicas tem ganhando destaque em pesquisas para potencializar as estratégias da química verde, visto que um dos principais problemas associados as técnicas convencionais, a exemplo a de maceração, está relacionado ao tempo de extração e a elevada quantidade de solventes, podendo associar a problemas ambientais.

Destacando a capacidade extrativa da EAM, Vieira *et al.*, (2017) realizaram um estudo de comparação entre as técnicas de maceração e micro-ondas para a otimização e extração de compostos fenólicos, a biomassa utilizada foi as folhas de *Juglans regia* L, as variáveis analisadas na pesquisa foram tempo, temperatura e proporção etanol/água. Os resultados maximizados para as técnicas EM e EAM foram semelhantes, com teor de fenólicos totais de 124.0 mg CAE/g de massa seca e 194.9 mg CAE/g de massa seca, respectivamente. As condições experimentais otimizadas foram de, 112,5 min, 61,3 °C e 50,4% de etanol para maceração e 3 min, 107,5 °C e 67,9% de etanol para micro-ondas.

3.4.3 Extração Assistida por Enzimas (EAE)

Este método depende de propriedades enzimáticas como regioseletividade e especificidade. A regioseletividade permite a atuação seletiva das enzimas sobre determinadas regiões das moléculas presentes na parede celular vegetal e, na especificidade a enzima atua apenas em determinados tipos de ligações químicas, assim, preservando as propriedades biológicas dos bioativos. A técnica baseia-se em um processo de extração sustentável (Rodrigues *et al.*, 2026; Nadar *et al.*, 2018). Através da hidrólise enzimática, ocorre a ruptura das paredes celulares, promovendo a liberação de compostos com alto valor agregado.

O procedimento ocorre em condições de reações brandas com baixas temperaturas em período de tempo curto, além de ser determinado em poucas etapas, esse processo reduz os custos operacionais de extração (Rodrigues *et al.*, 2026; Sheldon e van Pelt 2013; Gligor *et al.*, 2019).

Algumas variáveis são analisadas no processo de extração com enzimas, como por exemplo a atividade enzimática e o tempo de incubação da enzima. De acordo com Vo *et al.* (2025) a atividade enzimática é uma variável que influencia consideravelmente a capacidade de extração dos fenólicos totais. Isso destaca a importância de conhecer as variáveis e entender como a otimização das mesmas favorece o processo extrativo. A otimização da atividade enzimática favorece a formação de complexos enzima-substrato, onde, estimula a quebra pela água de componentes encontrados na parede celular vegetal.

Em relação ao tempo de incubação da enzima foi destacado por Vo *et al.* (2025) que com tempos próximos de zero, os rendimentos totais dos compostos fenólicos foram mínimos. Já com o aumento gradual do tempo de incubação os resultados notavelmente melhoraram, atingindo seu máximo com um tempo aproximado de 30 minutos, o teor de compostos fenólicos totais obtido com esse tempo foi de $30,00 \pm 0,70$ mg GAE/g. Os autores também destacam que tempos elevados podem causar degradação ou oxidação dos compostos, limitando a eficiência do processo e o propósito da técnica.

Esta abordagem envolve o aprimoramento da utilização mínima de recursos, como energia, tempo e solvente, buscando práticas ecologicamente corretas. Martínez-Zamora *et al.* (2025) destacaram que a extração assistida por enzimas é ainda mais eficaz quando combinadas com outras técnicas de extração verde, visto que, vai proporcionar uma extração de fenólicos com menor degradação. Além disso, o reaproveitamento dos subprodutos oriundos de frutas e

vegetais são intensificados, uma vez que esses materiais são abundantes em compostos benéficos a saúde, contribuindo também com a redução de resíduos descartados no ambiente.

3.4.4 Extração Assistida por Ultrassom (EAU)

Aliado ao uso de solventes verdes, a extração assistida por ultrassom (EAU) tem se consolidado como uma fonte de energia eficiente para a extração de compostos fenólicos, uma vez que promove aumento do rendimento, redução do tempo de extração e obtenção de extratos de melhor qualidade, contribuindo para o avanço das tecnologias verdes (Bosiljkov *et al.*, 2017).

A extração assistida por ultrassom (EAU) é uma das técnicas de extração de compostos fenólicos alinhada a química verde, que demonstra resultados eficientes, como a redução de energia e do tempo de extração, comparado aos métodos convencionais, tornando o processo mais sustentável. Esse tipo de extração rompe a parede celular da planta por meio da cavitação, produzindo concentrações maiores e melhorando a qualidade do produto extraído (Jiao *et al.*, 2025; Belwal *et al.*, 2020). No entanto, a alta frequência das vibrações presentes nesse tipo de método ultrassônico, podem levar a ocorrência de altas temperaturas ou forças de cisalhamento, capazes de degradar compostos sensíveis ao calor, como os flavonoides, reduzindo sua bioatividade (Zhu *et al.*, 2025; Bankova *et al.*, 2021).

Para demonstrar a importância dessa técnica e de seus resultados, em seu estudo Abera *et al.* (2025) utilizaram como comparação os métodos de ultrassom e de micro-ondas para a extração dos compostos fenólicos, utilizando a água como solvente e como matéria prima folhas de *Ficus vasta*. Os resultados obtidos para a extração por micro-ondas, foram de 152,5 mg/g de compostos fenólicos totais, os parâmetros ótimos de extração foram proporção sólido-solvente 0,075 g/mL, potência de 480 watts e um tempo de 60 minutos. Já utilizando a extração assistida por ultrassom, os resultados apresentados foram de 214,9 mg/g para compostos fenólicos totais, com variáveis ótimas de extração sendo, frequência ultrassônica 50 kHz, tempo de extração de 60 minutos e proporção sólido-solvente de 0,075 g/mL, os autores destacam que a combinação de tempo e frequência de ultrassom alteram significativamente o rendimento extrativo, pois, à medida que o tempo e a frequência aumentam, o rendimento de compostos fenólicos atinge seu máximo (Abera *et al.*, 2025). De acordo com esse estudo de comparação, a extração assistida por ultrassom se destacou com a maior eficiência, produzindo quantidades maiores do composto, demonstrando como a utilização da técnica é eficiente quando comparada

a outras, se consolidando como uma opção eficaz para a maximização dos resultados causando o mínimo possível de impacto ambiental.

A técnica de ultrassom (EAU) combinada com solventes eutéticos profundos (DES) destaca-se em relação as técnicas convencionais, como a maceração. A combinação desses fatores é intensificada pela cooperação entre o efeito das ondas ultrassônicas com o DES que facilitam o processo de extração, além disso, a EAU utiliza a cavitação para rompimento das paredes celulares das plantas, resultando em teores consideráveis de extração e de recuperação dos compostos fenólicos, com redução de solvente, tempo de extração e energia (Jiao *et al.*, 2025; Cheng *et al.*, 2024; Belwal *et al.*, 2020).

Em seu trabalho, Liu *et al.* (2023) utilizaram a extração assistida por ultrassom combinada com solvente eutético profundo e como matéria prima a planta *Cosmos sulphureus* destacaram excelentes resultados comparado ao uso da UAE convencional com etanol, sendo superior 21%, o maior teor fenólico total obtido foi de $(3,53 \pm 0,03 \text{ g GAE}/100 \text{ g de massa seca})$, com condições ótimas de extração, sendo temperatura de $47,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, densidade de energia ultrassônica de $4,0 \text{ W/mL}$ e com 32,6% de teor de água o DES que obteve os melhores resultados foi através da combinação de cloreto de colina e ácido láctico na proporção molar de (1:2).

Corroborando com isso, Illoussamen *et al.* (2025) obtiveram bons resultados, para extração de compostos do alperujo, principal subproduto da extração de azeite de oliva, onde o maior rendimento foi de $1,56 \text{ mg AA eq/g}$ para atividade antioxidante e um teor total de fenólicos de $276,44 \text{ mg GAE/g}$ de extrato, que ocorreram, utilizando betaína: ácido láctico [1:2] durante 10 minutos, a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ com 96% de amplitude de ultrassom.

A Tabela 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens associadas as técnicas de extração por ultrassom, maceração, micro-ondas e enzimas.

Tabela 1 - Comparação entre as técnicas extrativas

Extração	Vantagens	Desvantagens
Maceração (EM)	Baixo custo, manutenção da estabilidade de compostos sensíveis ao calor e facilidade de escala industrial. ¹	Tempo demorado, requer grandes volumes de solventes e tem menor rendimento comparado a métodos modernos. ^{2,3}
Ultrassom (EAU)	Técnica verde, segura, não poluente e melhora a recuperação de compostos por efeitos de cavitação e cisalhamento. ^{4,5}	Risco de degradação de compostos devido ao calor localizado e forças de cisalhamento em altas amplitudes. ¹
Micro-ondas (EAM)	Curto tempo de extração, opera em altas temperaturas/pressões e reduz o consumo de solvente. ^{6,7}	A sensibilidade térmica de certos compostos como antocianinas, pode levar à rápida degradação em altas temperaturas. ⁶
Enzimas (EAE)	Sustentável, condições brandas: baixa temperatura e tempo, rompe especificamente as paredes celulares vegetais. ⁸	Tempos elevados degradam ou oxidam os compostos, limitando a eficiência do processo. ⁹

¹ Zhu *et al.* (2025), ² Deng *et al.* (2017), ³ Vieira *et al.* (2017), ⁴ Bosiljkov *et al.* (2017), ⁵ Jiao *et al.* (2025), ⁶ Jaouhari *et al.* (2025), ⁷ Miranda *et al.* (2025), ⁸ Rodrigues *et al.* (2026), ⁹ Vo *et al.* (2025).

Fonte: Autoria própria (2026).

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como experimental, de natureza aplicada e com abordagem quantitativa, otimizada por um planejamento experimental e conduzida sob condições controladas em ambiente laboratorial. Fundamentada na extração assistida por ultrassom de compostos fenólicos, utilizando DES como solvente, com a finalidade de promover de forma eficaz o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, como a casca do melão pele de sapo (*Cucumis melo L.*) para a recuperação de compostos bioativos. A Figura 1 apresenta as etapas que foram seguidas na parte metodológica do presente trabalho.

Figura 1 - Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Elaborado pela autora (2026), com auxílio do ChatGPT (OpenAI).

4.1 Obtenção e preparação da matéria prima

A matéria-prima utilizada nesta pesquisa foi o melão pele de sapo (*Cucumis melo L.*), sendo empregada especificamente a casca do fruto. Os melões foram cultivados na fazenda experimental da Universidade Federal do Semi-Árido (UFERSA), localizada no município de

Mossoró, estado do Rio Grande do Norte, e posteriormente disponibilizados por meio de doação. Os experimentos realizados para essa pesquisa foram conduzidos no Laboratório de Química Geral e de Química Aplicada da Universidade Federal do Semi-Árido, campus Pau dos Ferros.

No preparo do resíduo foi realizada as etapas de secagem e moagem. Para a secagem as cascas já cortadas e lavadas foram colocadas em estufa da marca Solab (SL-102) com circulação e renovação de ar, a uma temperatura de 70°C, até massa constante. Logo após, foi realizada a moagem, nessa etapa o resíduo foi triturado com auxílio de um moinho de facas tipo willye, da marca Fortinox, e assim, obteve-se o pó da casca do melão pele de sapo, que foram armazenados em sacos plásticos e mantidos em temperatura ambiente para posterior análise.

4.2 Preparo dos solventes eutéticos profundos (DES)

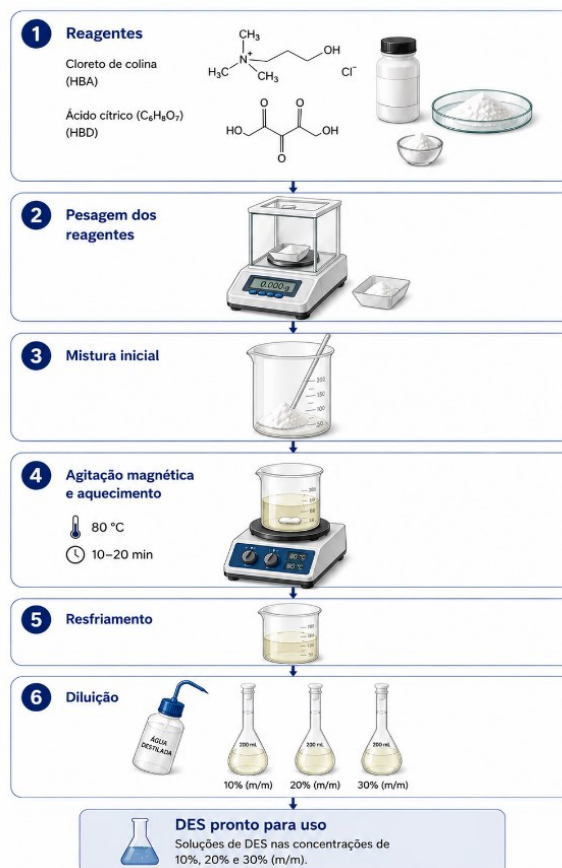
Inicialmente, foi preparado um DES utilizando-se cloreto de colina como receptor de ligações de hidrogênio (*Hydrogen Bond Acceptor* – HBA) e ácido cítrico monoidratado ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$) como doador de ligações de hidrogênio (*Hydrogen Bond Donor* – HBD).

O preparo do DES foi realizado com base na metodologia proposta por Dai *et al.* (2013), com adaptações. Inicialmente, os reagentes foram pesados em balança analítica (da marca marte, modelo AUW220D), foi realizada a proporção molar 1:1, onde foram pesados 32g de cloreto de colina e 48g do ácido cítrico monoidratado. Em seguida, os componentes foram misturados manualmente com auxílio de um bastão de vidro para promover uma homogeneização inicial.

Posteriormente, a mistura foi submetida à agitação magnética em agitador magnético com controle de temperatura (marca Inova), sendo mantida a 80 °C até a formação de um líquido homogêneo, transparente e viscoso. O tempo necessário para a formação do DES variou entre 10 e 20 minutos.

Após o resfriamento à temperatura ambiente, o DES obtido foi diluído com água destilada para obtenção das concentrações de 10%, 20% e 30% (m/m), utilizadas nos ensaios experimentais. O procedimento de preparação do solvente eutético profundo está apresentado esquematicamente na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma da preparação do DES.



Fonte: Elaborado pela autora (2026), com auxílio do ChatGPT (OpenAI)

4.3 Extração dos compostos fenólicos totais

Para a extração dos compostos fenólicos totais foi empregada a junção do solvente eutético profundo com a extração assistida por ultrassom, como combinação de técnicas sustentáveis e ecológicas.

Neste estudo, empregou-se um planejamento experimental do tipo 2^3 para analisar como as variáveis independentes concentração de DES, razão massa/volume de DES e tempo (minutos) influenciam o processo de extração. O planejamento incluiu três repetições no ponto central, totalizando onze experimentos realizados de forma aleatória.

Os níveis determinados para cada variável estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Níveis do planejamento experimental

	Níveis		
Fatores	-1	0	+1
Concentração do DES (%)	10	20	30
Razão massa/volume	1:40	1:30	1:20
Tempo (min)	30	40	50

Fonte: Autoria Própria (2026).

A matriz do planejamento experimental, com as codificações e níveis correspondentes das variáveis, é apresentada na Tabela 3. A análise dos dados foi conduzida usando o software *Statistica* 12.0.

Tabela 3 - Matriz do planejamento experimental 2³ mais três repetições no ponto central.

Ensaio	Concentração do DES (%)	Razão massa/volume	Tempo (min)
1	(-1) 10	(-1) 1:40	(-1) 30
2	(-1) 10	(-1) 1:40	(+1) 50
3	(-1) 10	(+1) 1:20	(-1) 30
4	(-1) 10	(+1) 1:20	(+1) 50
5	(+1) 30	(-1) 1:40	(-1) 30
6	(+1) 30	(-1) 1:40	(+1) 50
7	(+1) 30	(+1) 1:20	(-1) 30
8	(+1) 30	(+1) 1:20	(+1) 50
9	(0) 20	(0) 1:30	(0) 40
10	(0) 20	(0) 1:30	(0) 40
11	(0) 20	(0) 1:30	(0) 40

Fonte: Autoria Própria (2026).

Para cada ensaio experimental, foi pesada uma amostra de 1 g da casca de melão pele de sapo previamente seca e moída. Em seguida, adicionou-se o volume de solvente DES correspondente às condições estabelecidas no planejamento experimental. O sistema extrativo foi submetido à extração assistida por ultrassom durante o tempo determinado para cada ensaio, conforme descrito na Tabela 3, a metodologia adotada foi adaptada de Martins *et al.* (2023).

Cada amostra foi colocada em uma cuba ultrassônica, da marca Cristófoli, com frequência de 42 kHz, potência de 170W em temperatura ambiente. O sistema foi submetido a banho ultrassônico nos tempos estabelecidos no planejamento experimental. Após cada ensaio, os extratos foram filtrados e armazenados em tubos identificados, para análises futuras. Após a extração de cada ensaio as amostras foram armazenadas para posterior análise.

4.4 Determinação dos compostos fenólicos totais (CFT)

A quantificação dos compostos fenólicos totais foi determinada utilizando o método colorimétrico de Folin–Ciocalteu (Singleton & Rossi, 1965). Primeiramente, em tubos de ensaio cobertos com papel alumínio foram adicionados 75 µL da amostra, 2050 µL de água destilada e 125 µL do reagente Folin–Ciocalteu (2N). Em sequência com agitador de tubo vortex, foi agitado por 30 segundos e mantido em repouso por 5 minutos sem presença de luz.

Após isso, adicionaram-se 250 µL de carbonato de sódio (Na_2CO_3 , 20%), agitado em agitador vortex e os tubos foram dispostos em banho-maria durante 30 minutos, a temperatura de 40°C.

Posteriormente, as leituras foram realizadas no espectrofotômetro UV-Vis modelo T80+, marca PG Instruments Ltd, a absorbância foi lida em um comprimento de onda de 765 nm. A prova em branco foi realizada utilizando água destilada, reagente de Folin-Ciocalteu e a solução de carbonato de sódio a 20%, para garantir a eficiência e utilizado no espectro antes da leitura das amostras. Todas as leituras foram realizadas em triplicata. Os valores de compostos fenólicos totais (CFT) foram expressos em mg de equivalente ácido gálico por 100 g de casca (mg GAE 100 g⁻¹).

4.5 Atividade Antioxidante pela captura do radical DPPH

A atividade antioxidante foi determinada pelo método de sequestro do radical livre DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil), conforme metodologia proposta por Rufino *et al.* (2007), com adaptações.

Inicialmente, foi preparada uma solução estoque de DPPH na concentração de 60 µM. Para isso, foram pesados 2,4 mg de DPPH ($\text{PM} = 394,3 \text{ g mol}^{-1}$) em balança analítica e, posteriormente, o reagente foi dissolvido em álcool metílico. A solução foi transferida para um balão volumétrico de 100 mL e o volume completado com álcool metílico até a marca de aferição.

A partir da solução estoque, foram preparadas soluções padrão com concentrações variando de 10 a 60 μM . As diluições foram realizadas em tubos de ensaio protegidos da luz com papel alumínio, utilizando-se pipetas volumétricas para garantir maior precisão. As absorbâncias das soluções padrão foram determinadas em espectrofotômetro UV-Vis (modelo T80+) no comprimento de onda de 515 nm, utilizando álcool metílico como branco. Todas as leituras foram realizadas em ambiente protegido da luz para evitar a degradação do radical DPPH. Posteriormente, os valores de absorbância foram correlacionados com as respectivas concentrações de DPPH, permitindo a construção da curva padrão e a obtenção da equação de regressão linear, utilizada para a determinação da concentração residual de DPPH nas amostras analisadas.

Para cada ensaio, foram adicionados 3,9 mL da solução de DPPH 0,06 mM e 0,1 mL do extrato previamente diluído em tubos de ensaio protegidos da luz. Em seguida, as amostras foram homogeneizadas em agitador de tubos tipo vortex e mantidas em ambiente escuro. A absorbância das amostras foi lida em um comprimento de onda de 515 nm até a estabilização das leituras. Para a calibração do equipamento, utilizou-se álcool metílico como branco. Todas as análises foram realizadas em triplicata, sendo os resultados expressos como atividade antioxidante com base na redução da concentração do radical DPPH em relação ao controle.

4.6 Atividade Antioxidante pela captura do radical catiônico ABTS

A atividade antioxidante pelo método de captura do radical ABTS foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Rufino *et al.* (2007). Inicialmente, foram preparadas as soluções necessárias para a análise, incluindo a solução estoque de ABTS 7 mM, a solução de persulfato de potássio 140 mM, o radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ e a solução padrão de Trolox 2 mM.

Para o preparo da solução estoque de ABTS, foram pesados 192 mg de ABTS [2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico) sal diamônio; $\text{PM} = 548,68 \text{ g mol}^{-1}$], os quais foram dissolvidos em água destilada e transferidos para um balão volumétrico de 50 mL, completando-se o volume com o mesmo solvente. A solução de persulfato de potássio 140 mM foi preparada pela dissolução de 378,4 mg de persulfato de potássio em água destilada, seguida da transferência para um balão volumétrico de 10 mL, completando-se o volume final com água destilada.

O radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ foi obtido pela mistura de 88 μL da solução de persulfato de potássio com 5 mL da solução estoque de ABTS. A mistura foi mantida em recipiente protegido da luz com papel alumínio e armazenada à temperatura ambiente por 16 horas para permitir a

formação do radical. Após esse período, a solução foi diluída em álcool etílico até atingir absorvância de $0,70 \pm 0,05$ a 734 nm. A solução padrão de Trolox (2 mM) foi preparada pela dissolução de 25 mg de Trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-ácido carboxílico; PM = 250,29 g mol⁻¹) em álcool etílico, com posterior transferência para balão volumétrico de 50 mL e complementação do volume com o mesmo solvente.

Para a construção da curva padrão, foram preparadas soluções de Trolox nas concentrações de 100, 500, 1.000, 1.500 e 2.000 µM por meio de diluições da solução padrão de 2.000 µM em álcool etílico. Em seguida, foram transferidos 30 µL de cada solução padrão para tubos de ensaio protegidos da luz, aos quais foram adicionados 3,0 mL da solução do radical ABTS•+. Após homogeneização em agitador de tubos tipo vortex, as amostras permaneceram em repouso por 6 minutos na ausência de luz. Posteriormente, as leituras de absorvância foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis a 734 nm, utilizando álcool etílico como branco. Os valores de absorvância obtidos foram correlacionados com as respectivas concentrações de Trolox para construção da curva analítica e determinação da equação de regressão linear.

A atividade antioxidante total das amostras foi determinada utilizando-se 3,0 mL da solução do radical ABTS•+ e 30 µL de cada diluição do extrato. Após a adição dos reagentes, as amostras foram homogeneizadas em agitador vortex e mantidas em repouso por 6 minutos na ausência de luz. Em seguida, as leituras de absorvância foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis a 734 nm, utilizando álcool etílico como branco. Todas as análises foram realizadas em triplicata, sendo os resultados expressos em capacidade antioxidante equivalente ao Trolox (*Trolox Equivalent Antioxidant Capacity* - TEAC), obtidos a partir da equação da curva padrão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Efeito das variáveis de processo na recuperação de compostos fenólicos totais da casca de melão pele de sapo

Nesta seção, serão discutidos os efeitos das variáveis do processo na extração de compostos fenólicos totais (CFT) da casca do melão pele de sapo (*Cucumis melo L.*). As variáveis experimentais, como a concentração do DES, a proporção massa/volume e a variação do tempo, foram avaliadas com o objetivo de identificar as condições que proporcionam maior eficiência na recuperação desses compostos.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para o teor de compostos fenólicos totais.

Tabela 4 - Teor de compostos fenólicos totais com DES

Ensaio	Concentração do DES (%)	Razão massa/volume	Tempo (min)	CFT (mg GAE /100g)
1	(-1) 10	(-1) 1:40	(-1) 30	819,1
2	(-1) 10	(-1) 1:40	(+1) 50	761,4
3	(-1) 10	(+1) 1:20	(-1) 30	748,4
4	(-1) 10	(+1) 1:20	(+1) 50	748,4
5	(+1) 30	(-1) 1:40	(-1) 30	876,8
6	(+1) 30	(-1) 1:40	(+1) 50	992,2
7	(+1) 30	(+1) 1:20	(-1) 30	1188,2
8	(+1) 30	(+1) 1:20	(+1) 50	1202,6
9	(0) 20	(0) 1:30	(0) 40	906,3
10	(0) 20	(0) 1:30	(0) 40	841,4
11	(0) 20	(0) 1:30	(0) 40	776,6

Fonte: Autoria própria (2026).

A quantificação dos compostos fenólicos totais a partir da extração assistida por ultrassom com DES variou de (748,4 mg GAE /100g) até (1202,6 mg GAE /100g), correspondendo aos menores e maiores resultados obtidos, respectivamente. Os resultados são expressos em base úmida da amostra da casca.

Os menores valores foram observados nos ensaios 3 e 4, executados com concentração do DES de 10%, razão massa/volume de 1:20 e tempos de extração de 30 e 50 minutos, respectivamente. Em contraste, o maior valor foi observado no ensaio 8, realizado com

concentração do DES de 30%, a razão massa volume de 1:20 e o tempo de extração de 50 minutos. No entanto, considerando o objetivo da pesquisa de obter maiores concentrações de CFT em um menor tempo de extração, o ensaio 7 apresentou-se como promissor. Apesar de ter apresentado um teor de CFT inferior ao ensaio 8, com um resultado de (1188,2 mg GAE/100 g), esse resultado foi obtido em apenas 30 minutos de extração. Dessa maneira, o ensaio 7 se destaca como a condição mais vantajosa, por proporcionar um rendimento semelhante ao do ensaio 8, porém com uma redução significativa do tempo de processo, ou seja, reduz o consumo de energia e aumenta a produtividade do processo, evidenciando maior eficiência operacional para aplicações em escala industrial.

O maior teor de compostos fenólicos totais analisado nesse estudo foi inferior ao resultado demonstrado por Wu *et al.* (2026) que avaliaram a extração de compostos fenólicos da casca da bétula branca utilizando a combinação de extração assistida por ultrassom com solvente eutético profundo, o DES que proporcionou os melhores resultados foi uma mistura de cloreto de colina e ácido glicólico (razão molar 1:2) com 10% de água, as condições otimizadas foram de temperatura de extração de 56,05 °C, tempo de extração de 16,01 min, potência ultrassônica de 423,5 W e razão sólido-líquido de 1:51,49 g/mL, obtendo um teor de 29,17 mg/g, equivalente a 2917 mg GAE/100 g. Comparando com o resultado obtido nesse trabalho, a temperatura utilizada por eles foi superior, evidenciando os maiores teores obtidos, entretanto, os compostos fenólicos com esta temperatura podem ser danificado, alterando suas propriedades.

No entanto, o estudo conduzido por Majeed e Dar (2026) apresentaram teores de CFT inferiores quando comparados ao maior valor analisado nesse trabalho, os resultados foram de 783,04 mg GAE/100g utilizando *Celtis australis* como biomassa. A técnica utilizada foi a combinação entre o etanol e a extração assistida por ultrassom, a condição ótima foi uma concentração de etanol de 75% e 35 minutos de ultrassom.

No estudo de Sebastian *et al.* (2026) o maior resultado obtido também foi inferior quando comparado com o maior teor encontrado neste trabalho, utilizaram a extração assistida por micro-ondas e como solvente, o etanol, o valor obtido foi de 796 mg GAE/100g de peso seco, para compostos fenólicos totais utilizando como matéria prima a palha de arroz (*Oryza sativa L.*). As condições ótimas foram temperatura de 80 °C, concentração do etanol a 60%, 50 mL e um tempo de extração de 40 minutos. As diferenças encontradas podem estar associadas às características específicas das biomassas utilizadas, às condições de cultivo e origem geográfica das amostras, aos tipos de solventes empregados, bem como aos métodos de extração utilizados para a obtenção desse composto.

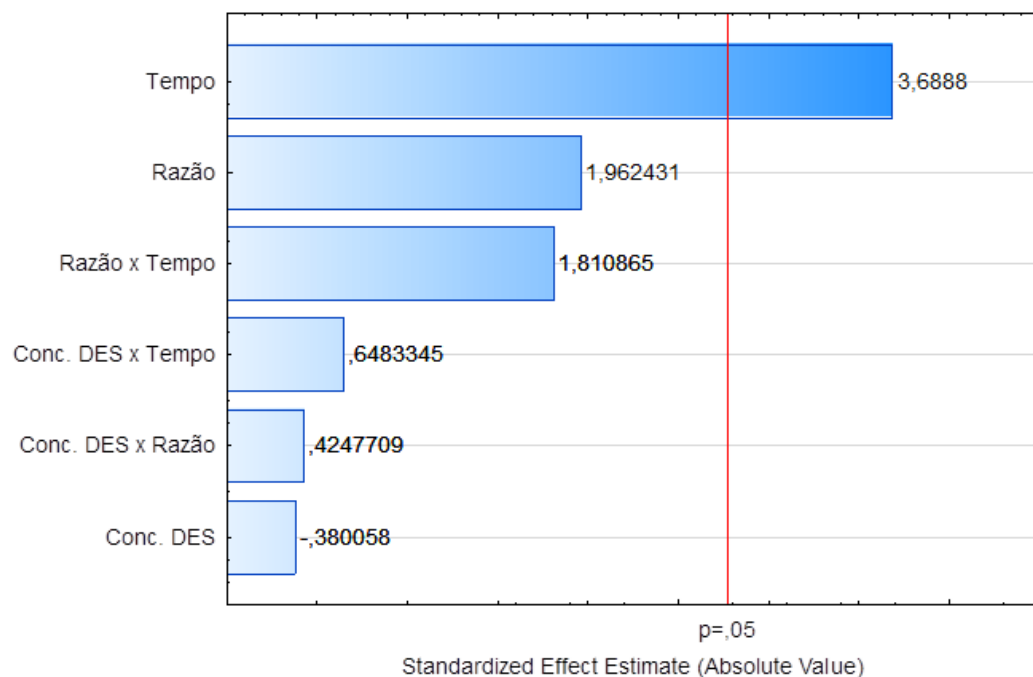
Os dados foram analisados pelo software *Statistica* 12.0 e a partir dessa análise obteve-se a equação 1 que apresenta o modelo da regressão dos dados experimentais do planejamento fatorial 2^3 para a resposta concentração de CFT.

$$CFT = \mathbf{896,4} - 17,5C + 109R + \mathbf{295,5t} - 10,5C.R + 47,0C.t + 151,5R.t \quad (1)$$

Os coeficientes em negrito exibidos na regressão são os estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança onde C, R, e t, correspondem a concentração do DES, razão massa/volume e tempo, respectivamente. Com isso, podemos observar que o tempo foi a única variável que apresentou nível de confiança de 95%.

Os resultados das análises estatísticas utilizadas para avaliar a significância das variáveis envolvidas na extração de compostos fenólicos totais, foram representados por meio do diagrama de Pareto (Figura 3).

Figura 3 - Diagrama de Pareto para Compostos Fenólicos Totais.



Fonte: Autoria própria (2026).

A variável tempo foi a única que se apresentou estatisticamente significativa ao nível de 95% de confiança, de acordo com os dados representados no diagrama de Pareto (Figura 3) e corroborando a equação 1. Isso demonstra, que a variável tempo foi a que mais influenciou na

maximização do rendimento com relação a extração dos compostos fenólicos totais, ou seja, o aumento do tempo favoreceu o processo de extração, aperfeiçoando a técnica utilizada.

A tabela 5 mostra a análise de variância (ANOVA) para a resposta de compostos fenólicos totais.

Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA).

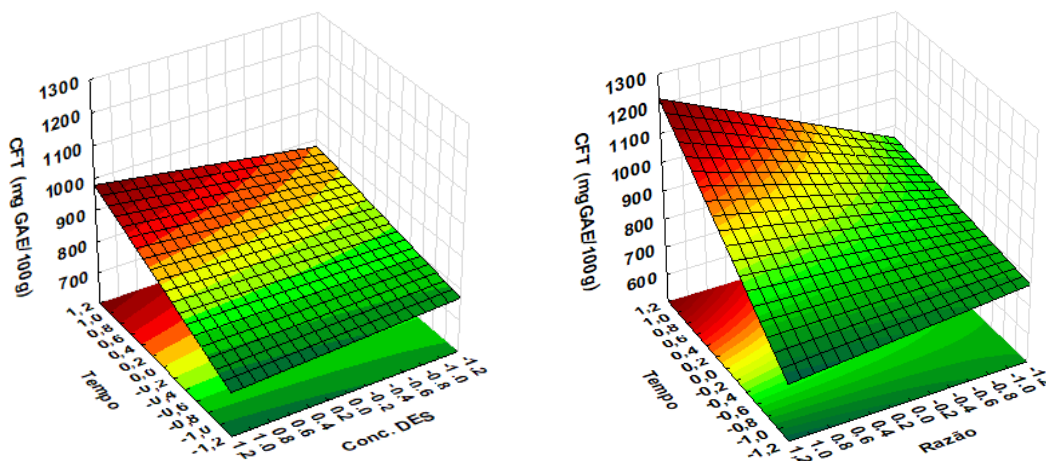
Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	F_{calculado}
Regressão	249558	6	41593	6,93
Resíduo	24012,5	4	6003,1	
Total	273570,5	10		
$R^2 = 91,2\%$; $F_{\text{tabelado}} = 6,16$				

Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados da ANOVA apresentam um valor de $F_{\text{calculado}}$ de 6,93, valor este superior ao F_{tabelado} de 6,16. Assim, como o valor calculado do teste F supera o valor tabelado, o modelo é estatisticamente significativo ao nível de 95% de confiança, indicando que pelo menos uma das variáveis independentes exerce influência significativa sobre a variável dependente. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) do modelo de regressão foi de 91,2%, indicando que 91,2% da variabilidade da variável dependente é explicada pelo conjunto de variáveis independentes incluídas no modelo, o que evidencia um bom ajuste estatístico.

No gráfico de superfície de resposta sob o teor de compostos fenólicos totais (Figura 4) representa-se a relação das variáveis independentes, sendo elas, a concentração do DES e do tempo de extração e a razão massa/volume e o tempo.

Figura 4 - Superfície de resposta sobre o teor de compostos fenólicos totais: influência da concentração do DES e do tempo e influência da razão e do tempo.



Fonte: Autoria própria (2026).

É possível observar, de forma geral, a tendência de aumento dos valores de CFT à medida que o tempo de extração aumenta, corroborando com os resultados obtidos no Diagrama de Pareto, no qual o tempo foi identificado como a variável estatisticamente mais significativa. As variáveis Concentração do DES e razão massa/volume demonstraram baixa eficiência no processo, como é possível perceber pela pequena variação demonstrada no gráfico. Além disso, é possível observar que a redução na concentração de DES pode indicar bons resultados.

5.2 Análise da Atividade Antioxidante pela captura do radical DPPH

Nesta seção são apresentados os resultados da atividade antioxidante das amostras, avaliados pelo método de sequestro do radical DPPH, o qual avalia a capacidade dos compostos antioxidantes neutralizar radicais livres. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para a determinação da atividade antioxidante pela captura do radical DPPH•.

Tabela 6 - Determinação da atividade antioxidante (DPPH).

Ensaio	DPPH ($\mu\text{molTEAC/L}$)
1	35,4
2	35,0
3	69,6
4	70,8
5	36,8
6	37,2
7	73,0
8	73,8
9	50,8
10	52,1
11	51,9

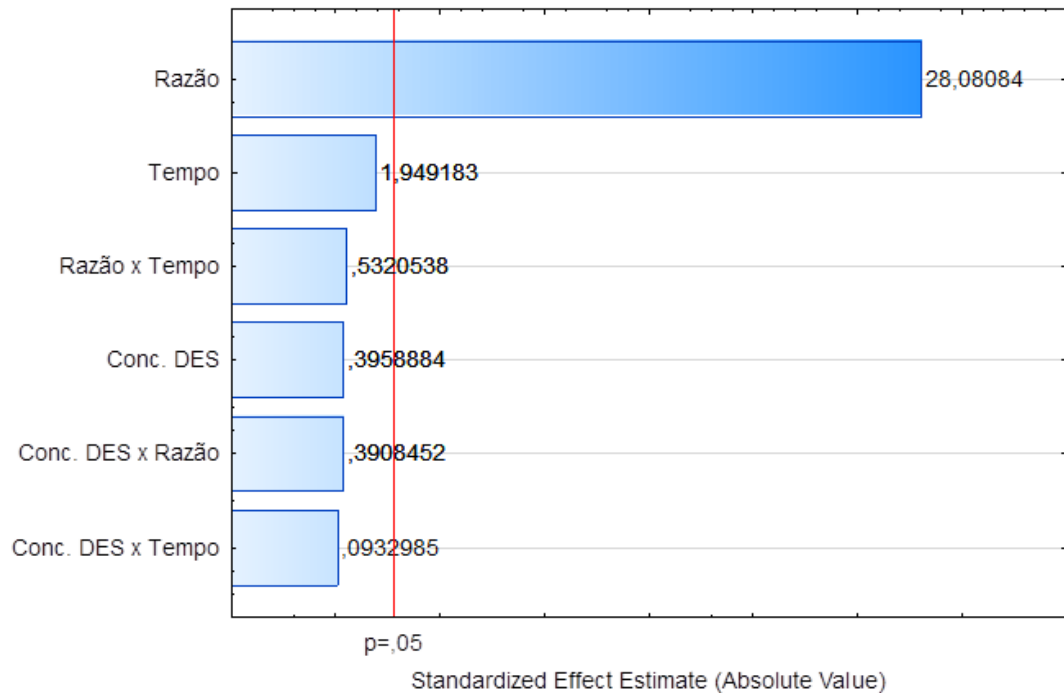
Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados apresentados (Tabela 8) evidenciam a variação da atividade antioxidante determinada pelo método DPPH entre os ensaios realizados. O ensaio 2 apresentou o menor valor, sendo ele ($35,0 \mu\text{molTEAC/L}$) sob as condições experimentais de 10% de concentração do DES, razão massa/volume de 1:40 e tempo de extração de 50 minutos. Por outro lado, o ensaio 8 apresentou o maior resultado, atingindo $73,8 \mu\text{molTEAC/L}$, utilizando concentração do DES de 30%, razão massa volume de 1:20 e um tempo extrativo de 50 minutos.

Em comparação, Djadou *et al.* (2026) realizaram um estudo utilizando como método a extração assistida por ultrassom e como solvente foi usado uma combinação de etanol com água, a biomassa foi a *Raphia farinifera*, o resultado de atividade antioxidante pelo sequestro do radical DPPH da casca do fruto foi de $1396,99 \mu\text{mol TE/L}$. Embora ambos os estudos tenham utilizado a casca como resíduo agroindustrial, as diferenças encontradas nos resultados podem estar associadas as diferenças químicas presentes em cada matriz vegetal, já que as biomassas são diferentes. Além disso, o presente trabalho empregou o DES como solvente extrator, enquanto o estudo em comparação utilizou uma solução hidroetanólica, fatores esses que podem influenciar diretamente no processo extrativo.

O diagrama de Pareto (Figura 5) avalia o efeito das variáveis independentes sobre a atividade antioxidante. A análise estatística dos dados foi realizada com um nível de confiança de 95% representado no gráfico pela linha vertical vermelha ($p=0,05$).

Figura 5 - Diagrama de Pareto para atividade antioxidante DPPH.



Fonte: Autoria própria (2026).

Com base na observação do Diagrama de Pareto, apenas a variável razão massa/volume foi estatisticamente significativa para o modelo, uma vez que a sua barra foi a única que ultrapassou o limite determinado pelo coeficiente p . Enquanto todas as outras variáveis e relações não demonstraram esse nível de confiança, já que suas barras não ultrapassaram o limite de significância. Portanto, conclui-se que a razão massa/volume é a variável dominante na otimização da atividade antioxidante DPPH, onde, o controle da sua otimização no processo extrativo vai ser essencial para ampliar a eficiência da análise. Enquanto as outras variáveis e relações apresentadas no diagrama não apresentaram alterações estatisticamente perceptíveis na resposta de DPPH.

O modelo da regressão dos dados experimentais para a resposta da atividade antioxidante pela captura do DPPH• é representado pela equação 2. A representação em negrito dos coeficientes demonstra os termos que atingiram nível de confiança dos dados em 95%.

$$DPPH = \mathbf{53,3} + 0,5C + \mathbf{35,7R} + 2,5t + 0,5C.R + 0,1C.t + 0,7R.t \quad (2)$$

Os coeficientes C, R e t referem-se à concentração do DES, a razão massa/volume e ao tempo, respectivamente. Corroborando o diagrama de Pareto, a equação destaca que a razão massa/volume foi a única variável que se apresentou estatisticamente ao nível de confiança de 95%.

A tabela 7 apresenta para a resposta da atividade antioxidante pela captura do radical DPPH•, a análise de variância (ANOVA), que demonstra a validade estatística do modelo matemático ajustado.

Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) para DPPH.

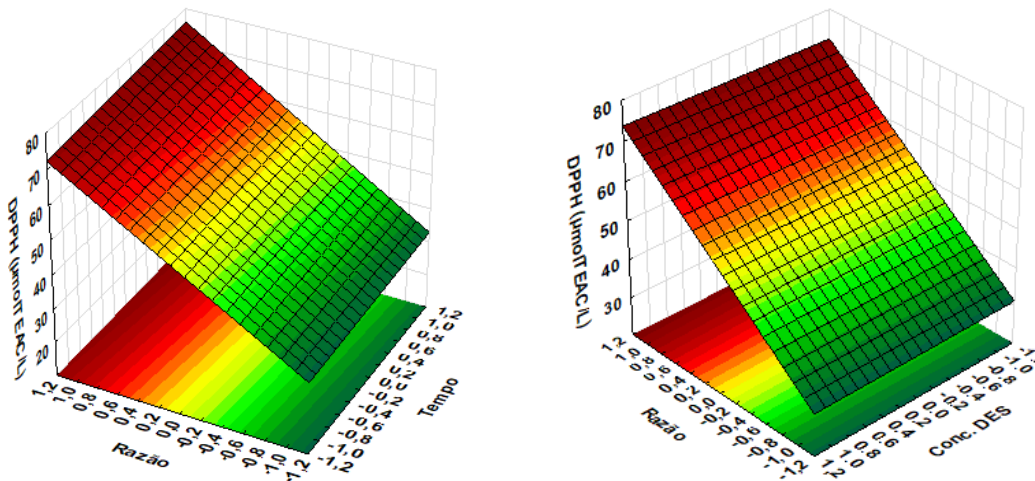
Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	F_{calculado}
Regressão	2562,2	6	427,0	133,4
Resíduo	12,9	4	3,2	
Total	2575,1	10		
R ² = 99,5%; F _{tabelado} = 6,16				

Fonte: Autoria própria (2026).

Com os dados observados na Tabela 8, os resultados demonstram que o Valor de F_{calculado} de 133,4 é significativamente superior ao valor de F_{tabelado} de 6,16, evidenciando que o modelo é estatisticamente significativo sob um nível de confiança de 95%. O modelo apresentou um coeficiente de determinação (R² = 99,5%), indicando um elevado percentual, onde, o modelo ajustado é capaz de explicar 99,5% da variabilidade total observada nas análises, restando apenas 0,5% de variação residual.

O gráfico de superfície resposta (Figura 6) mostra a relação entre as duas variáveis independentes sobre a resposta atividade antioxidante DPPH. As variáveis analisadas foram Razão massa/volume e tempo e Razão massa/volume e concentração do DES.

Figura 6 - Superfície de resposta sobre a atividade antioxidante DPPH: influência da razão e do tempo e influência da razão e da concentração do DES.



Fonte: Autoria própria (2026).

Observa-se de forma clara que a atividade antioxidante tende a aumentar à medida que a razão massa/volume aumenta, chegando em um valor máximo no nível 1,2, atingindo valores acima de 70 $\mu\text{molTEAC/L}$. Enquanto o tempo e a concentração do DES apresentam efeito nulo, onde permanecem constante ao longo do gráfico, podendo ser ajustado para condições que sejam mais econômicas e viáveis para o processo.

5.3 Análise da Atividade Antioxidante pela captura do radical ABTS

A determinação da atividade antioxidante da amostra foi também avaliada pelo método de captura do radical ABTS, que possibilitou a avaliação da capacidade da amostra neutralizar radicais livres e reduzir processos oxidativos. A Tabela 8 apresenta a obtenção dos resultados para a determinação da atividade antioxidante pela captura do radical ABTS•.

Tabela 8 - Determinação da atividade antioxidante (ABTS).

Ensaio	ABTS ($\mu\text{molTEAC/L}$)
1	42,1
2	33,5
3	97,1
4	113,2
5	35,8

6	44,6
7	103,2
8	127,1
9	65,4
10	53,2
11	51,0

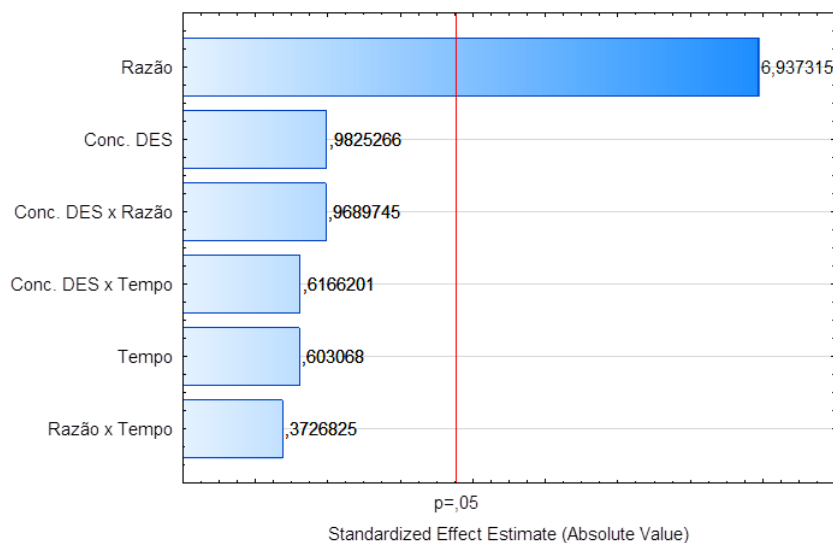
Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados mostram (Tabela 10) que o ensaio 8 foi o que proporcionou a maior determinação de atividades antioxidantes pela captura do radical ABTS, com um valor de 127,1 $\mu\text{molTEAC/L}$, sob as condições de concentração do DES 10%, razão massa/volume de 1:40 e tempo extrativo de 50 minutos. Já o menor resultado foi obtido no ensaio 2, com as condições experimentais de 10% concentração do DES, razão massa/volume de 1:40 e tempo de extração de 50 minutos, o valor obtido para as atividades antioxidantes foi de 33,5 $\mu\text{molTEAC/L}$.

Kavrut *et al.* (2026) realizaram um estudo novo para a extração de compostos fenólicos de sementes de uvas (*Vitis vinifera L.*), por meio de uma extração híbrida supercrítica de dióxido de carbono e hidrogênio e obtiveram um valor expressivo para a atividade antioxidante pela captura do radical ABTS de (2.408,56 $\mu\text{mol TE/100 mL}$), que corresponde a 24.085,6 $\mu\text{mol TEAC/L}$. A semente da uva é naturalmente rica em compostos bioativos como catequinas e epicatequinas, por tanto a disparidade nos valores entre esses estudos são justificadas pelas diferenças intrínsecas na composição química de cada matriz analisada e na polaridade dos solventes utilizados.

A Figura 7 expõe o Diagrama de Pareto onde é possível observar a variável estatisticamente significativa ao nível de confiança 95%, sendo ela a razão massa/volume.

Figura 7 - Diagrama de Pareto para atividade antioxidante ABTS.



Fonte: Autoria própria (2026).

A razão massa/volume foi a única variável que se adequou estatisticamente ao modelo com 95% de confiança, sua barra atingiu o limite crítico de ($p=0,05$). Sendo assim, a razão massa/volume é a variável predominante na otimização da atividade antioxidante ABTS. As demais variáveis independentes não se adequaram estatisticamente ao modelo, portanto, a influência no processo não é perceptível.

A equação 3 demonstra o modelo da regressão dos dados experimentais do planejamento para a resposta da atividade antioxidante pela captura do radical ABTS. Os coeficientes C, R e t referem-se à concentração do DES, a razão massa/volume e ao tempo, respectivamente.

$$ABTS = 69,7 + 10,1C + \mathbf{71,1R} + 6,2t + 9,9C.R + 6,3C.t + 3,8R.t \quad (3)$$

O coeficiente da regressão que se encontra em negrito representa a variável que se enquadra no modelo de confiança estatística de 95%, sendo assim, a razão massa/volume foi a única que atingiu esse nível, como observado no diagrama de Pareto.

A Tabela 9 apresenta a análise de variância (ANOVA) da resposta determinação da atividade antioxidante ABTS.

Tabela 9 - Análise de variância (ANOVA) para ABTS.

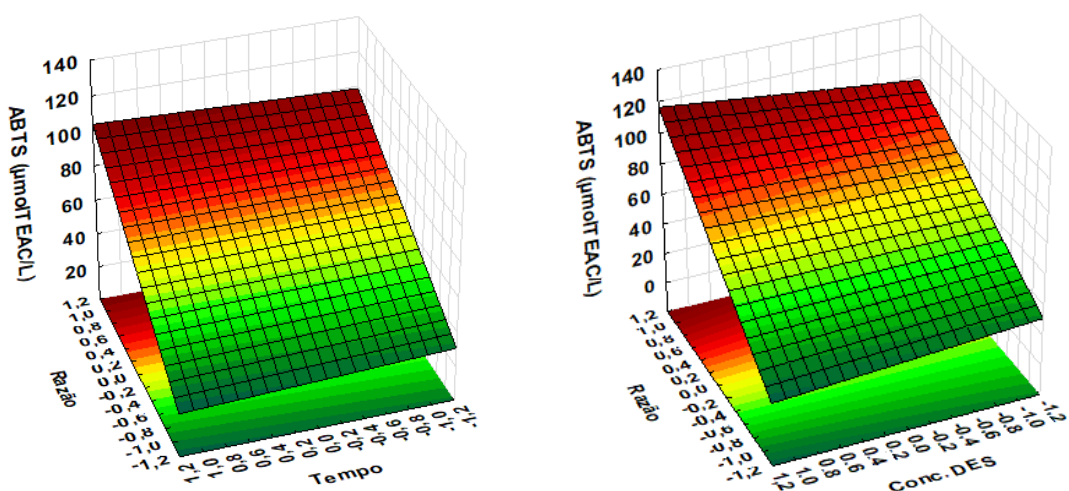
Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	F _{calculado}
Regressão	10695	6	1782,5	8,49
Resíduo	840,3	4	210,0	
Total	11535,3	10		
R ² = 92,7%; F _{tabelado} = 6,16				

Fonte: Autoria própria (2026).

Com os resultados da ANOVA, observa-se que o modelo é estatisticamente significativo, ao nível de 95% de confiança, já que o valor de F_{calculado} é superior ao valor de F_{tabelado}, apresentando valores de 8,49 e 6,16, respectivamente. O coeficiente de determinação (R²) obtido foi de 92,7%, confirmando que o modelo executado é significativo.

Para a análise das atividades antioxidantes pela captura do radical ABTS, as variáveis independentes analisadas no gráfico de superfície resposta (Figura 8) foram a razão massa/volume e o tempo (Figura 8a) e razão massa volume e concentração do DES (Figura 8b).

Figura 8 - Superfície de resposta sobre a atividade antioxidante ABTS: influência da razão e do tempo e influência da razão e da concentração do DES.



Fonte: Autoria própria (2026).

O aumento da atividade antioxidante ABTS foi observado à medida que a razão massa/volume aumentou, chegando a valores acima de 120 $\mu\text{molTEAC/L}$. Corroborando o diagrama de Pareto e equação de regressão, que identificaram a razão massa/volume como a variável responsável pela otimização da atividade ABTS durante o processo. Por tanto, conclui-se que o tempo de extração e a concentração do DES devem ser utilizados de forma que provoquem um menor desgaste e uma menor energia ao meio ambiente.

Observa-se que o método de captura do radical ABTS apresentou maiores valores de atividade antioxidante em comparação ao método de captura do radical livre DPPH. Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse no desenvolvimento e na investigação de substâncias antioxidantes obtidas a partir de produtos naturais. Nesse contexto, o radical DPPH destaca-se por ser um composto orgânico estável, devido à presença de três anéis aromáticos em sua estrutura, além de apresentar vantagens como simplicidade, aplicabilidade e estabilidade na ausência de luz (Oliveira, 2015). Por sua vez, o radical ABTS pode ser gerado por reações químicas, eletroquímicas ou enzimáticas e possui maior capacidade de interagir com compostos de natureza hidrofílica e lipofílica (Rufino *et al.*, 2007). Dessa forma, os resultados sugerem que os compostos bioativos presentes na amostra apresentam maior afinidade com o radical ABTS, o que pode justificar os valores mais elevados de atividade antioxidante observados por esse método.

Além disso, os ensaios que correspondem maior atividade antioxidante também apresentaram o maior teor de fenólicos totais, indicando que quanto maior a concentração de compostos fenólicos na amostra, maior tende a ser a sua capacidade de neutralizar os radicais livres.

6 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou eficiência na extração de compostos fenólicos totais (CFT) da casca do melão pele de sapo (*Cucumis melo L.*) por meio da extração assistida por ultrassom (EAU), atuando como uma solução sustentável para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais. Devido a elevada produção de melão no Brasil e no mundo, este estudo apresenta-se como uma alternativa promissora, promovendo uma destinação eficiente para biomassa que, quando descartada inadequadamente pode gerar impactos negativos ao meio ambiente. Além disso, casca do melão pele de sapo (*Cucumis melo L.*) é conhecida por apresentar propriedades antioxidantes e por ser empregada em diferentes aplicações nas indústrias cosmética, alimentícia e farmacêutica.

Os resultados evidenciam que a técnica de extração por ultrassom (EAU) se destacou como uma das mais eficientes avaliadas neste estudo, apresentando um resultando considerável, atuando como uma fonte promissora de energia ao maximizar o rendimento da extração sem provocar degradação do extrato. Os solventes eutéticos profundos (DES) também demonstraram desempenho expressivo na extração dos CFT. As condições ótimas de extração para compostos fenólicos totais foram concentração do solvente 30%, a razão massa/volume de 1:20 e o tempo de extração de 30 minutos. A principal variável associada foi o tempo de extração, que maximizou os rendimentos aproximadamente em 30 minutos, fator determinante para a otimização dos resultados analisados.

A presença de atividades antioxidantes observadas nas amostras pelos métodos de eliminação dos radicais livres ABTS e DPPH exalta o potencial da casca do melão pele de sapo como fonte de compostos bioativos, designando a presença de compostos com potencial antioxidante mensurável. Para as atividades antioxidantes, as condições ótimas de extração foram concentração do solvente 30%, a razão massa/volume de 1:20 e o tempo de extração de 30 minutos e a variável que se apresentou estatisticamente significativa a um nível de 95% de confiança foi a razão massa/volume. Os resultados fortalecem a viabilidade do aproveitamento de resíduos agroindústrias.

Dessa forma, os resultados indicam que a combinação da extração assistida por ultrassom com solventes eutéticos profundos apresentam elevado potencial como alternativa sustentável para a recuperação de compostos fenólicos, tendo em vista que estão alinhados aos princípios da química verde e ao aproveitamento sustentável de recursos naturais, comparado aos solventes orgânicos convencionais, os DES apresentam baixa toxicidade e, consequentemente geram um menor impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABERA, Wondifraw Abate *et al.* Process optimization and characterization on ultrasonication and microwave-assisted phenolic compounds extraction of Ficus Vasta leaves. **Applied Food Research**, v. 5, n. 2, p. 101112, dez. 2025.
- AKACHAT, Belkis *et al.* **Optimization of Pectin Extraction from Lemon Peels Using Hydrochloric Acid and Response Surface Methodology**. SSRN, , 2024. Disponível em: <<https://www.ssrn.com/abstract=5070693>>. Acesso em: 23 jun. 2026
- ALARCÓN FLORES, María Isabel *et al.* Analysis of phenolic compounds in olive oil by solid-phase extraction and ultra high performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry. **Food Chemistry**, v. 134, n. 4, p. 2465–2472, out. 2012.
- ALASALVAR, Hamza. Ultrasound technology and eco-friendly solvents for extracting antioxidant phenolic compounds from immortelle (*Helichrysum italicum*) flowers: A comparative study on conventional and natural deep eutectic solvents. **Microchemical Journal**, v. 208, p. 112390, jan. 2025.
- BOSILJKOV, Tomislav *et al.* 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, mar. 2017.
- CAÑADAS, Raquel *et al.* Hydrophobic eutectic solvents for extraction of natural phenolic antioxidants from winery wastewater. **Separation and Purification Technology**, v. 254, p. 117590, jan. 2021.
- CANO-GONZALEZ, Carlos N. *et al.* Microwave-assisted extraction of phenolic compounds from broccoli waste with antioxidant and antihyperglycemic activities: a sustainable approach. **Bioresource Technology Reports**, v. 32, p. 102432, dez. 2025.
- CASAZZA, Alessandro A. *et al.* Extraction of phenolics from Vitis vinifera wastes using non-conventional techniques. **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 1, p. 50–55, set. 2010.
- CAVALCANTE, Marília De Almeida; BORGES, Wardsson Lustrino; SOUZA, Tiago Marcolino De. Compostos fenólicos a partir de vegetais: uma revisão sobre os métodos de quantificação e avaliação das propriedades antioxidante e antimicrobiana. **Peer Review**, v. 6, n. 10, p. 66–89, 9 maio 2024.
- CHEN, Qiuyu *et al.* Multiscale investigation of hydrogen bond acceptor/donor ratio effects on phenol extraction by deep eutectic solvents. **Journal of Molecular Structure**, v. 1347, p. 143343, dez. 2025.
- DA LUZ RODRIGUES, Willias; LIMA, Álvaro Silva; MATTEDI, Silvana. Enzyme-assisted extraction as a Platform to enhance the recovery of high added-value bioactive from agroindustrial waste from pracaxi (*Pentacletra macroloba*) press cake. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 74, p. 104039, jun. 2026.
- DA SILVA MOURÃO, Matheus; SANT'ANA, Anderson S. A review on the natural products of Brazilian flora as sources of biopreservatives with emphasis on phenolic compounds:

Extraction, purification, and application. **Food Research International**, v. 233, p. 118998, jun. 2026.

DAI, Yuntao *et al.* 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, 2 jul. 2013.

DENG, Junlin *et al.* Comparative evaluation of maceration and ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds from fresh olives. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 37, p. 328–334, jul. 2017.

DJADOU, Charifata *et al.* Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds and antioxidant activities from *Raphia farinifera* Fruit: Box-Behnken design optimization and microstructural characterization. **Food Chemistry Advances**, v. 12, p. 101353, set. 2026.

DONG, Yanghong *et al.* Green extraction of phenolic compounds from *Hippophae gyantsensis* leaves using natural deep eutectic solvents: Antioxidant and antimicrobial activities. **Microchemical Journal**, v. 219, p. 115889, dez. 2025.

DONOSO-BUSTAMANTE, Viviana *et al.* Antioxidant activity of sinapic acid anilides: DPPH, ABTS, FRAP, electrochemical and theoretical analysis. **LWT**, v. 222, p. 117656, abr. 2025.

DRISHYA, Cm; WANI, Khalid Mehmood. Exploring muskmelon peel as a novel source of pectin: Extraction methods and applications. **Food and Humanity**, v. 3, p. 100331, dez. 2024.

DUAN, Bo *et al.* Recent advances in chitin based materials constructed via physical methods. **Progress in Polymer Science**, v. 82, p. 1–33, jul. 2018.

DURGA GOMATHI ARUMUGANAINAR *et al.* Sustainable pectin extraction: Navigating industrial challenges and opportunities with fruit by-products – A review. **Process Biochemistry**, v. 154, p. 234–245, jul. 2025.

EMBRAPA. (2023). *Brasil em 50 alimentos*. Brasília, DF, 2023.

FERNÁNDEZ, María De Los Ángeles *et al.* Novel approaches mediated by tailor-made green solvents for the extraction of phenolic compounds from agro-food industrial by-products. **Food Chemistry**, v. 239, p. 671–678, jan. 2018.

FREITAS, BRAGA SOBRINHO, R; ANDRADE,. Produção integrada de melão nos polos Mossoró-Açu e Baixo Jaguaribe: diagnóstico das conformidades e não conformidades com os requisitos do sistema. Embrapa.br, 10 abr. 2009.

FU, Guojun *et al.* Effect of ultrasound-assisted pH-shifting treatment on the physicochemical properties of melon seed protein. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 110, p. 107039, nov. 2024.

GAZZOLA, Rosaura; DALLA PORTA GRÜNDLING, Roberta; ARAÚJO ARAGÃO, Adalberto. MELÃO: TAXAS DE CRESCIMENTO DA PRODUÇÃO, EXPORTAÇÃO E IMPORTAÇÃO. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 10, n. 3, p. 75–80, 30 dez. 2020

GOLMAKANI, Mohammad-Taghi *et al.* Seaweed phenolic compounds: Relationship with

antioxidant activity and application in different food products. **Food Chemistry: X**, v. 32, p. 103242, dez. 2025.

ILLOUSSAMEN, Boutaina *et al.* Optimized sustainable recovery of phenolic compounds from alperujo using ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction. **Journal of Molecular Liquids**, v. 437, p. 128479, nov. 2025.

JAOUHARI, Yassine *et al.* Microwave-assisted extraction of raspberry pomace phenolic compounds, and their bioaccessibility and bioactivity. **Food Chemistry**, v. 478, p. 143641, jun. 2025.

JIAO, Pengfei *et al.* Enhanced deep eutectic solvent extraction of phenolic compounds from hawthorn seeds with ultrasonic and resin in-situ adsorption assistance: Process optimization, component analysis, and extraction mechanism. **Food Chemistry**, v. 480, p. 143885, jul. 2025.

KAVRUT, Enes *et al.* Supercritical hybrid carbon dioxide-hydrogen as a new sustainable extraction of phenolics and antioxidants from grape seeds. **Applied Food Research**, v. 6, n. 1, p. 102114, jun. 2026.

KUMAR GUPTA, Rakesh *et al.* Valorization of fruits and vegetables waste byproducts for development of sustainable food packaging applications. **Waste Management Bulletin**, v. 2, n. 4, p. 21–40, dez. 2024.

LIU, Xing-Yu *et al.* Deep eutectic solvent-based ultrasound-assisted extraction of polyphenols from *Cosmos sulphureus*. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 32, p. 100444, fev. 2023.

MAJEED, Toiba; DAR, Aamir Hussain. Comparison of ultrasound-assisted and conventional extraction for the polyphenolic recovery from hackberry (*Celtis australis* L.): Antioxidant activity, phenolic profiling and color characteristics. **Food Bioscience**, v. 79, p. 108673, maio 2026.

MALLEK-AYADI, Sana; BAHLOUL, Neila; KECHAOU, Nabil. Characterization, phenolic compounds and functional properties of *Cucumis melo* L. peels. **Food Chemistry**, v. 221, p. 1691–1697, abr. 2017.

MARTÍNEZ-ZAMORA, Lorena *et al.* β -Glucanase vs cellulase for enzymatic-assisted extraction of phenolic compounds in avocado peels by-products. **Food Bioscience**, v. 68, p. 106777, jun. 2025.

MARTINS, Pedro Ribeiro. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS HUMANAS CURSO DE AGRONOMIA. 2024.

MARTINS, Rafaela Suzana *et al.* USO DE DES PARA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DE FOLHAS DA JABUTICABEIRA. *[S.d.]*.

MIRANDA, Jean Paul *et al.* Green extraction of phenolics from *Pouteria caimito* using microwave-assisted techniques. **Food Bioscience**, v. 66, p. 106182, abr. 2025.

Nações Unidas no Brasil (ONU Brasil). Agenda 2030 [Internet]. 2015 Disponível em:

<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 30 Jan. 2026.

NASCIMENTO, Ítala Jb *et al.* Reaction of melon accessions to crater rot and resistance inheritance. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 3, p. 459–465, set. 2012.

PRADO, Alexandre G. S. Química verde, os desafios da química do novo milênio. **Química Nova**, v. 26, n. 5, p. 738–744, out. 2003.

Produção Agropecuária IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/melao/br>.

RUFINO, M. do S. M.; ALVES, R. E.; BRITO, E. S. de; MORAIS, S. M. de; SAMPAIO, C. de G.; PÉREZ-JIMÉNEZ; SAURA-CALIXTO. **Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas pela Captura do Radical Livre ABTS +**. Comunicado técnico. Embrapa, Fortaleza, CE. 2007.

RUFINO, M. do S. M.; ALVES, R. E.; BRITO, E. S. de; MORAIS, S. M. de; SAMPAIO, C. de G.; PÉREZ-JIMÉNEZ; SAURA-CALIXTO. **Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas pela Captura do Radical Livre DPPH**. Comunicado técnico. Embrapa, Fortaleza, CE. 2007.

SEBASTIÁN, Laura San *et al.* Green optimisation of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from rice straw lignocellulosic residues and LC-HRMS-based cultivar profiling. **Food Chemistry**, v. 511, p. 148723, maio 2026.

SINGLETON, V.L., ROSSI, J.A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagentes. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 16, n. 3, 1965.

SULIMAN, Sazmin Sufi *et al.* Separation of phenolic compounds from fruit processing wastewater using liquid membrane technology: A short review. **Biochemical Engineering Journal**, v. 200, p. 109096, nov. 2023.

TAHERI, Afsaneh; JAFARI, Seid Mahdi. Gum-based nanocarriers for the protection and delivery of food bioactive compounds. *[S.d.]*.

VIEIRA, Vanessa *et al.* Optimization and comparison of maceration and microwave extraction systems for the production of phenolic compounds from *Juglans regia* L. for the valorization of walnut leaves. **Industrial Crops and Products**, v. 107, p. 341–352, nov. 2017.

VO, Tan Phat *et al.* Enhancing phenolic and flavonoid recovery from Vietnamese balm using green solvent-based ultrasonic-enzymatic-assisted extraction. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 121, p. 107546, out. 2025.

WU, Shuang *et al.* Ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction and bioactivity evaluation of phenolic compounds from white birch bark. **Industrial Crops and Products**, v. 242, p. 122900, mar. 2026.

YILMAZ, Hasan *et al.* The effect of raw material moisture and particle size on agri-pellet production parameters and physical properties: A case study for greenhouse melon residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 150, p. 106125, jul. 2021.

ZHANG, Guoqiang *et al.* Effect of processing methods on the phytochemical content of melon seeds (*Cucumis melo* L.). **Future Foods**, v. 10, p. 100399, dez. 2024.

ZHANG, Guoqiang *et al.* Sustainable valorisation of melon (*Cucumis melo* L.) peel: From waste to high-value ingredients in circular food systems. **Future Foods**, v. 13, p. 101025, jun. 2026.

ZHU, Meifei *et al.* Extraction of flavonoids and phenolic acids from poplar-type propolis: optimization of maceration process, evaluation of antioxidant and antimicrobial activities. **LWT**, v. 233, p. 118481, out. 2025.