

EXTRAÇÃO VERDE DE COMPOSTOS BIOATIVOS UTILIZANDO SOLVENTES EUTÉTICOS NATURAIS PROFUNDOS (NADES) ASSISTIDA POR ULTRASSOM: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

GREEN EXTRACTION OF BIOACTIVE COMPOUNDS USING NATURAL DEEP EUTECTIC SOLVENTS (NADES) ASSISTED BY ULTRASOUND: A SYSTEMATIC REVIEW

DOI: 10.65747/conali2025v3c12

Anderson José de Lucena¹; Ariell Gilmara Carneiro Teófilo Caldas², Paulo Fernando da Silva Ramos³, Marcony Edson da Silva Júnior⁴, Maria Inês Sucupira Maciel⁵

¹Mestrando em Ciência e Tecnologia de Alimentos - PGCTA/UFRPE, andersonjosedelucena@gmail.com;

²Graduanda em Ciências do Consumo, UFRPE, ariellteofilo@gmail.com;

³Graduando em Ciências do Consumo, UFRPE, paulofer456@hotmail.com;

⁴Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos, UFRPE e UNINASSAU CAXANGÁ, marcony172009@hotmail.com;

⁵Professora Doutora do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos- PGCTA/UFRPE, m.ines@dcd.ufrpe.br.

Resumo: Esta revisão sistemática investigou a aplicação combinada de solventes eutéticos naturais profundos (NADES) e extração assistida por ultrassom (EAU) como estratégia verde para a recuperação de compostos bioativos a partir de matrizes vegetais, com ênfase em subprodutos agroindustriais. A busca foi realizada nas bases de dados ScienceDirect, PubMed e Periódicos Capes, abrangendo publicações entre 2023 e 2025. Após a aplicação dos critérios de inclusão, foram selecionados 15 estudos que utilizaram a combinação EAU-NADES para extrair compostos como fenólicos, flavonoides e curcuminoides. Observou-se ampla diversidade de matérias-primas vegetais, incluindo folhas, sementes, rizomas, bagaço de frutas, cascas, entre outras. O cloreto de colina foi o aceitador de ligação de hidrogênio (ALH) mais frequentemente empregado, geralmente combinado com ácidos orgânicos, álcoois ou açúcares. A eficiência das extrações variou de acordo com a composição do NADES, a proporção de água adicionada e os parâmetros ultrassônicos aplicados. Foram reportados elevados rendimentos de compostos fenólicos totais (CFT), acompanhados de atividades antioxidante, antimicrobiana, antidiabética e citotóxica seletiva, evidenciando o potencial funcional dos extratos obtidos. Em síntese, a técnica EAU-NADES se mostra como uma alternativa eficiente, ecológica e economicamente viável em comparação aos métodos convencionais, alinhando-se aos princípios da química verde e contribuindo para a valorização de subprodutos e fortalecimento da bioeconomia circular. Contudo, destaca-se a necessidade de estudos adicionais sobre a segurança, estabilidade e aplicação industrial dos extratos, bem como o desenvolvimento de novos sistemas NADES com maior seletividade.

Palavras-chave: química verde; bioeconomia circular; subprodutos agroindustriais; propriedades bioativas.

Abstract: This systematic review investigated the combined application of natural deep eutectic solvents (NADES) and ultrasound-assisted extraction (UAE) as a green strategy for recovering bioactive compounds from plant matrices, with an emphasis on agro-industrial by-products. The literature search was conducted in the ScienceDirect, PubMed, and Capes Periodicals databases, covering publications from 2023 to 2025. After applying the inclusion criteria, 15 studies were selected that employed the UAE-NADES combination to extract compounds such as phenolics, flavonoids, and curcuminoids. A wide variety of raw materials was observed, including leaves, seeds, rhizomes, fruit pomace, peels, among others. Choline chloride was the most frequently used hydrogen bond acceptor (HBA), generally combined with organic acids, alcohols, or sugars. Extraction efficiency varied according to the composition of the NADES, the proportion of added water, and the ultrasonic parameters applied. High yields of total phenolic compounds (TPC) were reported, along with antioxidant, antimicrobial, antidiabetic, and selective cytotoxic activities, demonstrating the functional potential of the resulting extracts. In summary, the UAE-NADES technique presents itself as an efficient, eco-friendly, and economically viable alternative to conventional methods, aligning with the principles of green chemistry and contributing to the valorization of by-products and the advancement of the circular bioeconomy. However, further studies are needed to evaluate the safety, stability, and industrial applicability of the extracts, as well as the development of new NADES systems with greater selectivity.

Keywords: green chemistry; circular bioeconomy; agro-industrial byproducts; bioactive properties.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por alimentos e a intensificação dos processos industriais geram quantidades expressivas de subprodutos agroindustriais anualmente. Segundo Oliveira *et al.* (1), a indústria alimentícia produz aproximadamente 37 milhões de toneladas de resíduos por ano em escala global, sendo que a indústria de processamento de frutas e vegetais é responsável por cerca de 29,3% desse total. Além disso, Plaza e Marina (2) relatam que, na indústria de citros, cerca de 50–60% do peso total da fruta é descartado sob a forma de subprodutos, como cascas, sementes e bagaço. Esses coprodutos, geralmente descartados, contribuem para problemas ambientais significativos, incluindo poluição da água, degradação do solo e emissões de gases de efeito estufa, devido à sua alta instabilidade biológica e concentração de compostos orgânicos (3).

No entanto, com a crescente conscientização sobre a sustentabilidade, esses resíduos deixaram de ser vistos apenas como descarte e passaram a ser reconhecidos como matérias-primas valiosas, com potencial para serem aproveitadas de forma responsável e na promoção de uma bioeconomia circular (3,4). Essa abordagem está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, especialmente o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 13 (Ação Climática), buscando aumentar a utilização de recursos e diminuir o impacto ambiental.

Os subprodutos agroindustriais, embora muitas vezes negligenciados, são fontes ricas e inexploradas de compostos bioativos (1,4). Incluem uma vasta gama de moléculas, como compostos fenólicos (polifenóis, flavonóides, proantocianidinas), terpenóides e carotenóides, amplamente reconhecidos por suas propriedades biológicas, incluindo atividades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobianas, antidiabéticas, anticancerígenas e neuroprotetoras (5,6). A recuperação desses bioativos abre oportunidades para o desenvolvimento de novos produtos e ingredientes funcionais para as indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética, agregando valor a esses materiais (4).

A extração desses compostos tem sido realizada, por métodos convencionais, como soxhlet, maceração e decocção (7). Embora eficazes em certos contextos, essas técnicas apresentam limitações significativas, pois exigem longos tempos de extração, grandes quantidades de solventes

orgânicos tóxicos e voláteis (como metanol e acetona) e elevadas temperaturas, o que pode resultar na degradação de compostos bioativos sensíveis ao calor e baixa seletividade, além de alta volatilidade. Além do mais, a toxicidade e o impacto ambiental desses solventes, somados ao alto consumo energético e à geração de resíduos perigosos, ressaltam a necessidade urgente de desenvolver alternativas mais sustentáveis e eficientes para a recuperação de compostos bioativos (1,3,5).

Nesse contexto, os Solventes Eutéticos Naturais Profundos (NADES) surgem como uma promissora classe de solventes verdes (7). Esses solventes são formados principalmente por metabólitos primários de plantas, combinando aceitadores de ligação de hidrogênio (ALH), como cloreto de colina e doadores de ligação de hidrogênio (DLH), como açúcares, álcoois, ácidos orgânicos ou aminoácidos (5). Os NADES são biodegradáveis, não tóxicos, economicamente viáveis e fáceis de preparar, surgindo como uma alternativa mais segura e sustentável aos solventes orgânicos convencionais, se alinhando à química verde. Além disso, suas propriedades físico-químicas, como viscosidade, polaridade e densidade podem ser moduladas para otimizar a solubilidade e a seletividade dos compostos-alvo (5,8).

Para intensificar ainda mais o processo de extração e superar as limitações dos métodos convencionais, a Extração Assistida por Ultrassom (EAU) tem ganhado destaque cada vez mais nos dias de hoje (6). Ela é uma técnica eficiente, segura e econômica, que utiliza ondas ultrassônicas para gerar cavitação no solvente, causando formação e implosão de microbolhas de gás, criando forças de cisalhamento e ondas de choque que promovem a ruptura das paredes celulares da matriz vegetal, aumentando a transferência de massa e a liberação de compostos bioativos (5,9). A combinação de NADES e EAU tem sido altamente eficaz e ecológica, reduzindo o consumo de solvente, tempo e energia, além de preservar ou até potencializar a bioatividade dos extratos (6,9).

Apesar do crescente interesse e dos resultados promissores envolvendo a combinação de EAU-NADES na valorização de diferentes biomassas e subprodutos agroindustriais, ainda faltam na literatura, trabalhos que reúnam e analisem, de forma ampla, os avanços nessa área (3,7). Muitos estudos vêm investigando a aplicação isolada de EAU ou de NADES na extração de compostos bioativos de subprodutos agroindustriais. No entanto, ainda são necessários mais estudos que explorem a combinação entre essas duas técnicas, visando aprofundar o entendimento sobre sua junção, harmonização dessas técnicas, vantagens e limitações na perspectiva da extração verde e da bioeconomia circular.

O presente estudo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática sobre os avanços, aplicações e eficácia da extração verde de compostos bioativos a partir de subprodutos agroindustriais, utilizando solventes eutéticos naturais profundos assistida por ultrassom. Buscou-se identificar as matrizes vegetais estudadas, as condições otimizadas de extração, os compostos bioativos obtidos e seus potenciais em aplicações nas indústrias alimentícia, cosmética, farmacêutica e em outros setores, além de analisar como a combinação dessas técnicas pode contribuir para práticas sustentáveis e para a promoção da bioeconomia circular.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo consiste em uma revisão sistemática da literatura, conduzida de acordo com as diretrizes do PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), conforme estabelecido por Page *et al.* (10). A elaboração da pergunta de pesquisa foi guiada pelo modelo SPIDER, o qual é reconhecido por sua adequação em revisões qualitativas, quantitativas e experimentais (11). O Quadro 1 apresenta a estrutura SPIDER utilizada, com a definição dos

componentes essenciais que fundamentaram a construção da pergunta norteadora: “Como a extração assistida por ultrassom, combinada com solventes eutéticos naturais profundos, tem sido aplicada na obtenção sustentável de compostos bioativos de matérias-primas vegetais, e quais são seus efeitos sobre rendimento?”

Quadro 1: Implementação da ferramenta de estratégia de pesquisa SPIDER.

Parâmetro	Conteúdo
S (<i>Sample</i>)	Subprodutos vegetais
PI (<i>Phenomenon of Interest</i>)	Uso do NADES + EAU
D (<i>Design</i>)	Estudos experimentais com aplicação de NADES + EAU
E (<i>Evaluation</i>)	Eficiência de extração, sustentabilidade, bioatividade, bioeconomia circular
R (<i>Research Type</i>)	Quantitativa e qualitativa

Fonte: Autores, 2025.

Nota: *NADES*: solventes eutéticos naturais profundos; *EAU*: extração assistida por ultrassom.

A estratégia de busca foi elaborada de maneira sistemática e estruturada, tendo como base a pergunta de pesquisa construída a partir do modelo SPIDER. O objetivo principal foi identificar estudos científicos que abordaram a aplicação da combinação entre extração assistida por ultrassom e solventes eutéticos naturais profundos, para a obtenção sustentável de compostos bioativos de subprodutos de origem vegetal. No Quadro 2 estão dispostos os mecanismos de busca nas diferentes bases de dados.

Quadro 2: Mecanismo de busca nas bases de dados.

Base de dados	Mecanismo de busca
Periódico Capes	("ultrasound-assisted extraction" OR "ultrasonic extraction" OR "UAE") AND ("natural deep eutectic solvent" OR "NADES") AND ("bioactive compound" OR "natural product")
PubMed	("ultrasound-assisted extraction" OR "ultrasonic extraction" OR "UAE") AND ("natural deep eutectic solvent" OR "NADES")

ScienceDirect	("ultrasound-assisted extraction" OR "UAE") AND ("natural deep eutectic solvent" AND "bioactive compound") AND ("green extraction" OR "sustainable extraction")
---------------	---

Fonte: Autores, 2025.

As buscas foram realizadas entre 05 de junho e 07 de julho de 2025, nas bases eletrônicas Periódicos Capes, PubMed e ScienceDirect. Essas bases foram selecionadas pela quantidade de publicações e relevância nas áreas de ciência dos alimentos, química verde, tecnologias de extração e produtos naturais. Para a busca, foram utilizados descritores em inglês, combinados com operadores *booleanos AND* e *OR*, incluindo sinônimos e variações terminológicas pertinentes para cada componente do modelo SPIDER. A estratégia de busca foi adaptada às especificidades de cada base de dados, com foco em três eixos principais: (1) extração assistida por ultrassom, (2) solventes eutéticos naturais profundos e (3) compostos bioativos e sustentabilidade da extração. A busca foi restrita a artigos científicos originais publicados em periódicos revisados por pares, prioritariamente no idioma inglês, no intervalo entre 2023 e 2025. A identificação e exclusão de duplicatas foram realizadas por meio da ferramenta automática da plataforma *Rayyan*, que também foi utilizada para a triagem dos artigos.

Os critérios de inclusão e exclusão utilizados na seleção dos estudos desta revisão sistemática estão descritos no Quadro 3 e foram definidos com base na pergunta de pesquisa. Esses critérios têm como objetivo orientar a escolha dos estudos mais relevantes, estabelecendo os parâmetros necessários para que sejam considerados pertinentes à revisão.

Quadro 3: Critérios de inclusão e exclusão nas bases de dados.

Critérios de inclusão	Critérios de Exclusão
Estudos publicados entre 2023 e 2025 para sua revisão.	Publicações anteriores a 2023
Trabalhos que envolvam extração verde combinada, especialmente UAE +NADES.	Estudos que utilizam apenas métodos convencionais sem qualquer abordagem verde combinada.
Estudos com foco na recuperação de compostos bioativos de matrizes vegetais.	Trabalhos sobre extração de compostos exclusivamente minerais ou metálicos, não bioativos.
Publicações em periódicos indexados ou com DOI (<i>Digital Object Identifier</i>) registrado.	Documentos sem revisão por pares.
Apenas artigos publicados em inglês.	Artigos duplicados ou

	redundantes encontrados em diferentes bases de dados.
--	---

Fonte: Autores, 2025.

Após a seleção dos estudos elegíveis, foi realizada a análise de conteúdo com foco na extração das seguintes informações principais: ano de publicação, autores, tipo de matriz vegetal ou subproduto analisado, composição do NADES, condições do processo de extração assistida por ultrassom, rendimento de compostos bioativos, bem como avaliações de atividade antioxidante ou outras propriedades funcionais.

A síntese dos dados foi conduzida de forma narrativa e descritiva, dado que os estudos incluídos apresentaram significativa heterogeneidade metodológica, especialmente quanto às condições operacionais e às formulações dos solventes. Dessa forma, foi realizada uma abordagem comparativa qualitativa, conforme adotado por Roobab *et al.*, (3), onde analisaram estudos sobre extração verde.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de busca e seleção dos artigos está ilustrado no fluxograma PRISMA apresentado na Figura 1. Inicialmente, foram identificados 362 registros nas bases de dados ScienceDirect (266), PubMed (53) e Periódico Capes (43). Após a remoção de 138 registros duplicados, restaram 224 registros para triagem. Dentre esses, 168 estudos foram excluídos por apresentarem títulos irrelevantes ao tema da revisão. Assim, 56 registros seguiram para avaliação específica dos resumos e textos completos. Após análise detalhada, foram excluídos 30 artigos por se tratar de revisões de literatura, 5 por apresentarem objeto de estudo semelhante a outros trabalhos já incluídos, e 6 por não abordarem a combinação de extração assistida por ultrassom com solventes eutéticos naturais.

Foram, portanto, incluídos 15 estudos na presente revisão, sendo provenientes das seguintes bases: ScienceDirect (7), PubMed (4) e Periódico Capes (4). Os estudos incluídos foram publicados entre 2023 e 2025, e abordaram a extração de compostos bioativos, como fenólicos e flavonóides, utilizando a combinação de EAU+NADES em diferentes matrizes vegetais de subprodutos agroindustriais.

Os resultados desta revisão sistemática mostraram que a combinação entre extração assistida por ultrassom e solventes eutéticos naturais profundos é uma abordagem verde, eficiente e versátil para a recuperação de compostos bioativos, especialmente a partir de subprodutos agroindustriais. Os 15 estudos analisados revelaram uma ampla diversidade de matrizes vegetais, solventes e compostos extraídos, com rendimentos significativos e potencial funcional dos extratos, como mostrado na Tabela 1. ArieStanti *et al.* utilizaram rizomas de cúrcuma-javanesa e três diferentes sistemas NADES, destacando-se o ChCl:ácido málico (1:1), que resultou em 4,58 mg/g de curcuminoides e 12,93 mg/g de xantorizol (12). Os extratos apresentaram atividade citotóxica seletiva contra células HeLa e baixa toxicidade para células HaCaT, demonstrando aplicação potencial em produtos funcionais com ação antitumoral.

Já Cao *et al.*, ao trabalharem com folhas de brócolis, mostraram que o sistema ChCl:propilenoglicol produziu 4,91 mg GAE/g de fenólicos totais e atividade antimicrobiana contra

patógenos alimentares, atribuindo-se o desempenho à baixa viscosidade do solvente que favoreceu a difusão (13). Chaudhary *et al.* investigaram a extração de compostos bioativos de *Spirulina platensis* e casca de laranja, obtendo extratos ricos em antioxidantes por meio de EAU-NADES (ChCl:ácido láctico), que foram utilizados no desenvolvimento de uma bebida funcional à base de morango e melão. Esses autores obtiveram rendimento que variou de 36,51 mg GAE/g a 33,46 mg GAE/g para spirulina e casca de laranja, respectivamente, demonstrando a viabilidade da aplicação direta dos extratos em formulações alimentícias (14).

Domínguez-Rodríguez *et al.*, por sua vez, compararam EAU e NADES em cascas de citros (toranja, limão e lima) e obtiveram rendimento de CFT de 39,2 mg GAE/g, 38,3 mg GAE/g e 21 mg GAE/g, respectivamente. A combinação EAU-NADES se destacou, promovendo extração superior de compostos fenólicos e flavonoides, reforçando o efeito harmônico das técnicas verdes em comparação a métodos isolados (15).

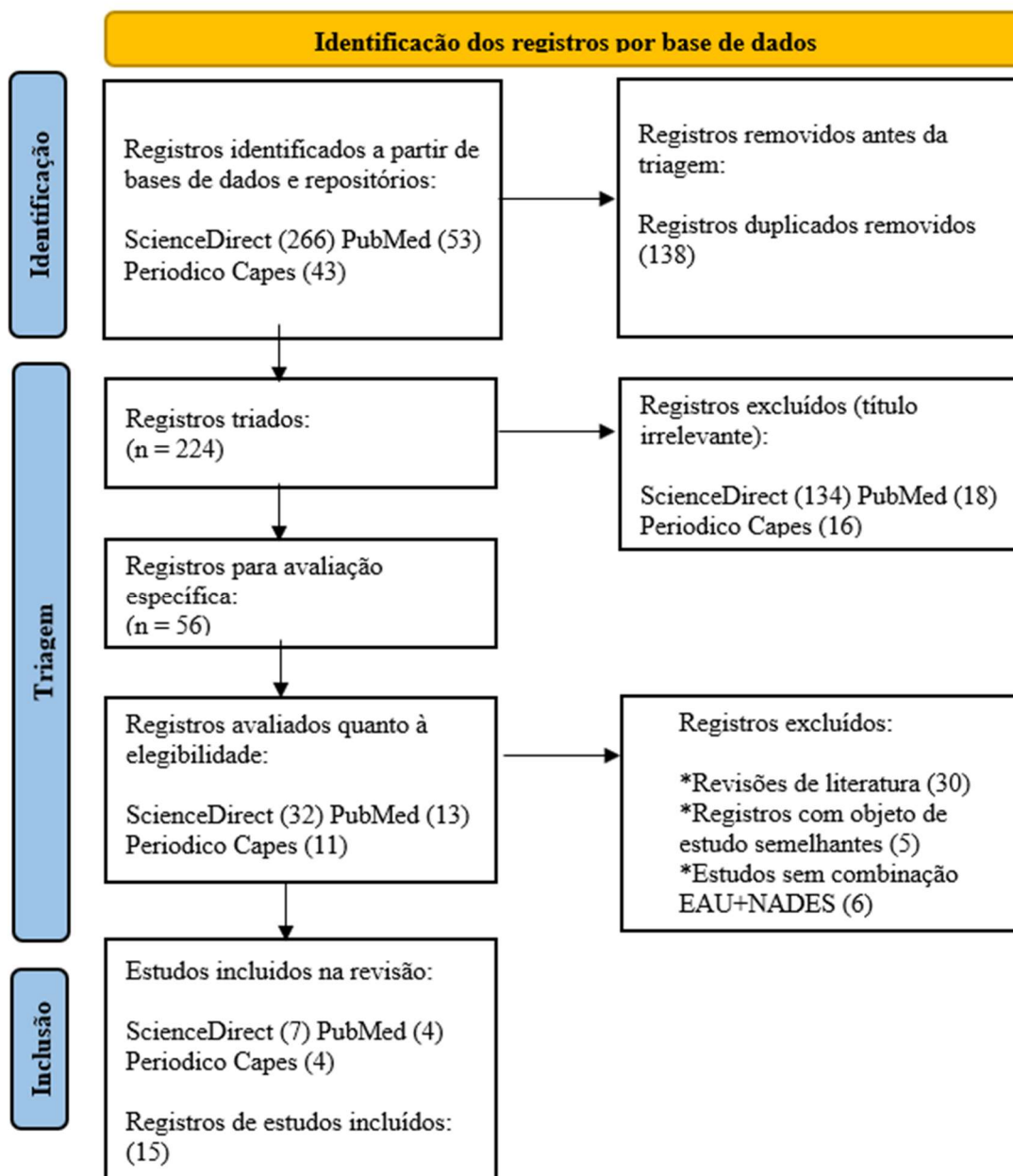


Figura 1 – Fluxograma Prisma

Fonte: Adaptado de Page *et al* (2021).

Já Grisales-Mejía *et al.*, utilizaram resíduos de abacate Hass e sistemas NADES otimizados para a extração de compostos fenólicos, obtendo altos rendimentos com excelente seletividade, variando de 148 mg GAE/g a 65 mg GAE/g utilizando cloreto de colina com frutose e ácido láctico, respectivamente. O estudo destaca a adaptação do NADES à polaridade dos compostos-alvo e à natureza da matriz (4). Khalid *et al.*, apresentaram uma proposta inovadora ao aplicar pré-tratamento com plasma frio seguido de EAU-NADES em raízes de grão-de-bico, utilizando o sistema ChCl:ácido cítrico. Com isso, alcançaram 46,04 mg GAE/g de fenólicos totais, evidenciando como tecnologias emergentes podem atuar de forma sinérgica para otimizar processos extrativos sustentáveis (16).

Foi evidenciado por Lima *et al.*, os maiores rendimentos, em termos de CFT da revisão ao utilizarem resíduos de araçá-roxo com NADES de ChCl:glicerol (1:2), obtendo 1045,15 mg GAE/g de CFT. A análise LC-MS identificou 26 compostos, incluindo catequina, ácido p-anísico e isoquercetina, demonstrando a eficácia da técnica tanto em quantidade quanto em diversidade fitoquímica (17). Oliveira *et al.*, ao explorarem casca de romã, aplicaram extração por pressão seguida de EAU-NADES com ChCl:glicerol (1:2), resultando em 413 mg GAE/g de CFT e extração seletiva de ácido elágico e punicalaginas, compostos bioativos com reconhecida atividade antioxidante (1).

Ozkan estudando a valorização de pétalas externas de alcachofra, obteve rendimentos elevados de ácido clorogênico e luteolina com EAU-NADES (ChCl:glicerol), 12,96 mg GAE/g que se mostraram 130% superiores ao método de maceração convencional. O trabalho evidencia o potencial de resíduos florais na recuperação de compostos funcionais (18). Peng *et al.* utilizaram folhas de *Moringa oleifera* e o sistema Bet-ureia (1:2), obtendo 54,69 mg RE/g de conteúdo total de flavonoides (CTF), 1,7 vezes mais que o método tradicional. A adição de 50% de água ao sistema reduziu a viscosidade e preservou compostos sensíveis, demonstrando a importância do ajuste de parâmetros físico-químicos (19).

Plaza e Marina empregaram o sistema ChCl:ácido cítrico (1:1) na extração de compostos antioxidantes do bagaço de laranja, obtendo CFT elevado e alta atividade antioxidante medida pelos métodos DPPH e ABTS, e valores de 440 mg de epicatequina e 229 mg/100 g de hesperidina. Assim, confirmando a aplicabilidade de resíduos cítricos como ingredientes funcionais sustentáveis (2). Rashid *et al.*, por sua vez, utilizaram bagaço de maçã e EAU-NADES para obter 5,6 mg GAE/g de CFT, comparado a 4,5 mg GAE/g com etanol. Santos-Martín *et al.*, extraíram compostos fenólicos de folhas de mirtilo com NADES e ultrassom, obtendo CFT de 142,5 mg GAE/g e 195,5 mg GAE/g para os NADES ácido láctico: acetato de sódio: água e cloreto de colina: ácido oxálico, respectivamente (5,20).

O estudo de Sun *et al.*, com sementes de *Cabernet Sauvignon*, alcançaram 135,78 mg GAE/g de CFT, com catequina como composto majoritário (41,14 mg/g). O extrato demonstrou atividade antifúngica contra *Alternaria alternata*, sendo eficaz em concentrações inferiores às de métodos convencionais (21). Por fim, Wang *et al.*, utilizaram bagaço de uva e mostraram que a EAU-NADES aumentou em 95,84% a extração de procianidinas em relação à extração assistida por calor, evidenciando o potencial dessa técnica para a valorização de resíduos vinícolas, sendo 48,36 mg GAE/g, o rendimento de CFT e 41,28 mg CE/g, o rendimento experimental de Procianidinas (6). De forma geral, os estudos apontam que o cloreto de colina (ChCl) foi o ALH mais recorrente, geralmente combinado com ácidos orgânicos como málico, cítrico e láctico, ou álcoois como glicerol e propilenoglicol.

Tabela 1: Características gerais dos estudos incluídos na revisão.

Autor/Ano	Matriz vegetal	Tipo de NADES	Proporção molar	Parâmetros EAU	Bioatividade avaliada	Rendimento (CFT, CTF, outro)
Ariestanti <i>et al.</i> (2025)	Rizoma de açafrão-da-índia	ChCl:Ma	1:1	60 kHz/ 15 minutos	citotoxicidade <i>in vitro</i> e compostos específicos	4,58 mg/g de curcuminoides e 12,93 mg/g de xantorrizol
Cao <i>et al.</i> (2023)	Folhas de brócolis	ChCl:Pg	1:2	20 kHz/ 31,4 minutos	Antioxidante e CFT	4,91 mg GAE/g
Chaudhary <i>et al.</i> (2025)	Spirulina e casca de laranja	ChCl:La	2:1	25 kHz/ 30 minutos.	Antioxidante e CFT	(36,51 mg GAE/g) e 33,46 mg GAE/g
Domínguez-Rodríguez <i>et al.</i> (2025)	Cascas de toranja e limão - lima	(ChCl:Ta) - (ChCl:Gly)	1:2	40 kHz/ 50 minutos.	Antioxidante, CFT e Anticolinérgica	(39,2 mg GAE/g e 38,3 mg GAE/g) - (21 mg GAE/g)
Grisales-Mejía <i>et al.</i> (2024)	Resíduo de abacate Hass	ChCl:Fru e ChCl:La	1:1	40 kHz/ 30 minutos.	Antioxidante e CFT	ChCl:Lac (148 mg GAE/g) e ChCl:Fru (65 mg GAE/g)

(Continuação)

Khalid <i>et al.</i> (2025)	Raízes de grão-de-bico	ChCl:Ca	2:1	50 mg/30 minutos.	Antioxidante e CFT	46,04 mg GAE/g
Lima <i>et al.</i> (2024)	Resíduo de araçá-roxo	ChCl:Gly	1:2	37 kHz/ 60 minutos.	Antioxidante, CFT e Antidiabética	1045,15 mg GAE/g
Oliveira <i>et al.</i> (2024)	Casca de romã	ChCl:Gly	1:2	500 mg/ 50 minutos.	CFT e Compostos específicos	413 mg GAE/g
Ozkan, G. (2023)	Pétalas externas de alcachofra	ChCl-La	1:2	37 kHz/ 30 minutos	Antioxidante e CFT	12,96 mg GAE/g
Peng <i>et al.</i> (2024)	Folhas de Moringa	Bet-Urea	1:2	37 kHz/ 33 minutos	Antioxidante, Fenólicos e CTF	54,69mg RE/g
Plaza & Marina (2025)	Bagaço de laranja	ChCl:La	1:2	60%/ 14 minutos	Conteúdo de proantocianidinas e hesperidina	440 mg de epicatequina e 229 mg/100 g
Rashid <i>et al.</i> (2023)	Bagaço de maçã	ChCl:Gly	1:2	75%/ 40 minutos	Antioxidante, CFT e CTF	5.8 mg GAE/g
Santos-Martín <i>et al.</i> (2023)	Folhas de mirtilo	(La:AcNa:W e ChCl:Ox)	(3:1:2 e 1:1)	40 kHz/ 45 minutos	Antioxidante, CFT e Antocianinas	142,5 mg GAE/g DBL e 195, 5 mg GAE/g DBL

(Continuação)

Sun <i>et al.</i> (2024)	Sementes de <i>Cabernet Sauvignon</i>	ChCl-Ca	1:2	320 W/ 20 minutos 20 kHz/	Antioxidante, TPC e Composição dos SPSU	135.78 mg GAE/g
Wang <i>et al.</i> (2025)	Bagaço de uva	ChCl:Gly	1:1	9 minutos	Antioxidante, CFT e CFT	48.36 mg GAE/g, 41.28 mg CE/g

*CTF = conteúdo total de flavonoides; CFT = conteúdo de fenólicos totais; SPSU = solução de polifenóis da semente de uva.

A adição de água, geralmente entre 20% e 50%, foi uma estratégia comum para reduzir a viscosidade dos NADES e facilitar a penetração nos tecidos vegetais, embora seu excesso possa comprometer a estrutura supramolecular do solvente e reduzir sua eficiência extrativa (15,19). Além dos rendimentos elevados de CFT, CTF, flavonoides, curcuminoides, catequinas e procianidinas, os extratos também apresentaram diversas atividades funcionais, como: antioxidante, antimicrobiana, antifúngica, citotóxica seletiva, antidiabética e neuroprotetora, reforçando assim a viabilidade da aplicação desses compostos nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica. A combinação de EAU-NADES mostrou-se particularmente eficaz na extração de compostos bioativos sensíveis ao calor, com economia de solvente e energia.

CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática confirmou que a combinação entre extração assistida por ultrassom e solventes eutéticos naturais profundos é uma estratégia eficiente, sustentável e versátil para a recuperação de compostos bioativos, especialmente a partir de subprodutos agroindustriais. Os estudos analisados demonstraram rendimentos elevados, manutenção da bioatividade dos extratos e vantagens claras em relação aos métodos convencionais. A escolha adequada do NADES e a otimização dos parâmetros da EAU foram determinantes para o sucesso das extrações. Além disso, os extratos obtidos apresentaram diversas atividades funcionais, com potencial de aplicação nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica. Recomenda-se que estudos futuros explorem a escalabilidade dos processos, a segurança dos extratos e novas combinações de NADES com foco na seletividade. A técnica EAU-NADES mostra-se alinhada com os princípios da química verde e com a promoção da bioeconomia circular, sendo uma alternativa promissora para a valorização de resíduos e desenvolvimento de produtos funcionais.

AGRADECIMENTOS

UFRPE, FACEPE e CAPES.

REFERÊNCIAS

1. OLIVEIRA, Isadora Lopes de *et al.* Advanced Extraction Techniques Combined with Natural Deep Eutectic Solvents for Extracting Phenolic Compounds from Pomegranate (*Punica granatum* L.) Peels. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 25, p. 9992, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms25189992>. Acesso em 06/06/2025.
2. PLAZA, Merichel; MARINA, Maria Luisa. Natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction for the recovery of antioxidant phenolic compounds from orange pomace. *Microchemical Journal*, v. 212, p. 113366, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113366>. Acesso em 06/06/2025.
3. ROOBAB, Ume *et al.* Comparative evaluation of ultrasound-assisted extraction with other green extraction methods for sustainable recycling and processing of date palm bioresources and by-products: A review of recent research. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 114, p. 107252, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107252>. Acesso em 07/06/2025.
4. GRISALES-MEJÍA, Juan F. *et al.* Advanced NADES-based extraction processes for the recovery of phenolic compounds from Hass avocado residues: A sustainable valorization strategy. *Separation and Purification Technology*, v. 351, p. 128104, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128104>. Acesso em 09/06/2025.
5. RASHID, Rubiya *et al.* Green extraction of bioactive compounds from apple pomace by ultrasound assisted natural deep eutectic solvent extraction: Optimisation, comparison and bioactivity. *Food Chemistry*, v. 398, p. 133871, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133871>. Acesso em 09/06/2025.

6. WANG, Changsen *et al.* Efficient recovery of procyanidins from grape residue by UAE-NADES and macroporous resin. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 119, p. 107400, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107400>. Acesso em 08/06/2025.
7. CANNAVACCIUOLO, Ciro *et al.* Critical analysis of green extraction techniques used for botanicals: Trends, priorities, and optimization strategies-A review. *Trends in Analytical Chemistry*, v. 173, p. 117627, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117627>. Acesso em 10/06/2025.
8. ZEB, Liaqat *et al.* Ultrasonic-Assisted Water-Rich Natural Deep Eutectic Solvents for Sustainable Polyphenol Extraction from Seaweed: A Case Study on Cultivated *Saccharina latissima*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 12, n. 30, p. 14921-14929, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c06736>. Acesso em: 07 jul. 2025. Acesso em 10/06/2025.
9. PEREIRA, Thiago C. *et al.* Trends and perspectives on the ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds using natural deep eutectic solvents. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 47, p. 101088, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2024.101088>. Acesso em 11/06/2025.
10. PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71, p. 1-9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em 05/06/2025.
11. FAPPA, Evaggelia; MICHELI, Mary. Content accuracy and readability of dietary advice available on webpages: a systematic review of the evidence. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, (S.I.), v. 38, e13395, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/jhn.13395>. Acesso em 05/06/2025.
12. ARIESTANTI, Donna Maretta *et al.* Ultrasonic-assisted extraction (UAE) of Javanese turmeric rhizomes using natural deep eutectic solvents (NADES): Screening, optimization, and in vitro cytotoxicity evaluation. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 114, p. 107271, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107271>. Acesso em 15/06/2025.
13. CAO, Yinjuan *et al.* Green ultrasound-assisted natural deep eutectic solvent extraction of phenolic compounds from waste broccoli leaves: Optimization, identification, biological activity, and structural characterization. *LWT - Food Science and Technology*, v. 190, p. 115407, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115407>. Acesso em 15/06/2025.
14. CHAUDHARY, Kashmala *et al.* Ultrasound assisted natural deep eutectic solvents based sustainable extraction of *Spirulina platensis* and orange peel extracts for the development of strawberry-cantaloupe based novel clean-label functional drink. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 118, p. 107357, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107357>. Acesso em 15/06/2025.
15. DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ, Gloria *et al.* Sustainable strategies to obtain bioactive compounds from citrus peels by supercritical fluid extraction, ultrasound-assisted extraction, and natural deep eutectic solvents. *Food Research International*, v. 202, p. 115713, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115713>. Acesso em 14/06/2025.

16. KHALID, Waseem *et al.* Optimization of the effect of cold plasma treatment on UAE-NADES green extraction of chickpea roots (*Cicer arietinum*) bioactive compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 114, p. 107276, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107276>. Acesso em 14/06/2025.
17. LIMA, Natália Duarte de *et al.* Green extraction of phenolic compounds from the by-product of purple araçá (*Psidium myrtoides*) with natural deep eutectic solvents assisted by ultrasound: Optimization, comparison, and bioactivity. *Food Research International*, v. 191, p. 114731, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114731>. Acesso em: 10 jun. 2025.
18. OZKAN, Gulay. Valorization of artichoke outer petals by using ultrasound-assisted extraction and natural deep eutectic solvents (NADES) for the recovery of phenolic compounds. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 103, n. 13, p. 2744-2756, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.13158>. Acesso em: 11 jun. 2025.
19. PENG, Weilong *et al.* Comparison, optimization and antioxidant activity of ultrasound-assisted natural deep eutectic solvents extraction and traditional method: A greener route for extraction of flavonoid from *Moringa oleifera* Lam. leaves. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 109, p. 107003, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107003>. Acesso em: 05 jul. 2025.
20. SANTOS-MARTÍN, María *et al.* Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from blueberry leaves using natural deep eutectic solvents (NADES) for the valorization of agrifood wastes. **Biomass and Bioenergy**, v. 175, 106882, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106882>. Acesso em: 11 jun. 2025.
21. SUN, Pengcheng *et al.* Effects of ultrasonic-assisted natural deep eutectic solvent on the extraction rate, stability and antifungal ability of polyphenols from Cabernet Sauvignon seeds. **Food Research International**, v. 191, p. 114674, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114674>. Acesso em: 04 jul. 2025.