

Tendências no Pré-Tratamento de Biomassa Vegetal Visando a Obtenção de Óleo Essencial

Trends in the Pretreatment of Plant Biomass Aiming at Essential Oil Extraction

Sâmia Karine Gomes de Sá,^a  Júlio César Gonçalves de Souza,^a  Ariane Mendonça Kluczkovski,^a  Anderson Mathias Pereira,^{a,b}  Leiliane do Socorro Sodré de Souza^{a,b,*} 

^a Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia (PPGCASA), CEP 69067-005, Manaus-AM, Brasil
^b Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Laboratório de Processos de Separação (LABPROS), CEP 69067-005, Manaus-AM, Brasil

*E-mail: leilianesodre@ufam.edu.br

Submissão: 9 de Maio de 2025

Aceite: 30 de Junho de 2025

Publicado online: 14 de Julho de 2025

The efficient extraction of volatile compounds from aromatic plants depends directly on the characteristics of the biomass and the pre-extraction methods applied. This article presents a review of the scientific literature on the main pre-treatment strategies of plant biomass aimed at optimizing essential oil recovery. Conventional methods such as steam distillation, hydrodistillation, cold pressing, and organic solvent extraction are initially discussed, highlighting their limitations in terms of yield, compound stability, and environmental impact. Subsequently, innovative approaches are addressed, including the use of enzymes, microwaves, ultrasound, and physicochemical techniques that enhance cell wall disruption and preserve thermolabile compounds. The methodology consisted of a bibliographic review conducted in the Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar databases, using Boolean operators such as AND, OR, and NOT to refine the search results. The search included publications from 2017 to 2025. Articles with full-text access and recognized scientific relevance were included. Data were organized to allow comparative analysis across different approaches. In summary, emerging pre-treatment techniques demonstrate significant potential to improve extraction efficiency, reduce processing time, and enable more sustainable methods for obtaining essential oils.

Keywords: Extraction yield; hydrodistillation; microwaves; ultrasound; enzymolysis.

1. Introdução

Os bioprodutos são de suma importância para a construção de uma economia mais sustentável, além de exploração consciente dos recursos naturais. Ao contribuírem para a sustentabilidade, a diversificação da economia e a promoção da saúde, fazem-se presente em diversos setores como: nutrição, farmácia, perfumaria e alimentos. A colaboração dos bioprodutos nesses setores incentiva a busca por cadeias produtivas mais limpas, nas quais é possível reduzir os resíduos e a poluição, ter alternativas aos produtos químicos sintéticos, consumo de produtos menos prejudiciais à saúde, inovação e desenvolvimento tecnológico. Dentre os bioprodutos destacam-se os óleos essenciais (OE), que possuem alto valor agregado e são grandes promotores de produtos naturais devido suas inúmeras aplicações e benefícios, por exemplo no mercado de alimentos que investem em moléculas antioxidantes e estáveis presente nos OE, com a crescente demanda por conservantes naturais.¹

Os OE são líquidos de misturas complexas de óleos aromáticos hidrofóbicos e podem ser extraídos de diversas partes dos vegetais, como folhas, flores, cascas e outros.² Os óleos essenciais são frequentemente encontrados em tricomas glandulares localizados na epiderme das plantas, estruturas especializadas responsáveis pelo armazenamento e secreção desses compostos voláteis. Diferentemente dos óleos fixos ou graxos, que consistem predominantemente em misturas de lipídios não voláteis, os óleos essenciais são compostos majoritariamente por terpenoides, fenóis e outros metabólitos secundários de baixa massa molecular.^{3,4}

A composição química e o rendimento dos óleos essenciais (OEs) são fortemente influenciados pelo método de extração adotado, assim como por variáveis operacionais críticas, como tempo, temperatura e pH do processo. A hidrodestilação (HD) continua sendo amplamente utilizada devido ao seu baixo custo e simplicidade de operação. No entanto, essa técnica apresenta limitações, como o longo tempo de processamento e o risco de degradação térmica de compostos voláteis e termolábeis.^{5,6} Como alternativas, técnicas modernas têm sido desenvolvidas para aumentar a eficiência e reduzir os impactos energéticos. A extração com fluido supercrítico (SFE), especialmente com dióxido de carbono, permite seletividade

ajustável sem o uso de solventes orgânicos agressivos, promovendo a recuperação eficiente de compostos sensíveis ao calor em tempos reduzidos, geralmente entre 10 e 60 minutos.^{7,8} Já a hidrodestilação assistida por micro-ondas (MAHD) tem se destacado por sua capacidade de diminuir o tempo total de extração para menos de uma hora, além de preservar o perfil fitoquímico dos óleos e reduzir o consumo de energia.^{9,10} A destilação a vapor (SD) também tem sido empregada como alternativa mais suave à HD, especialmente em aplicações industriais, permitindo extrações com menor degradação térmica e controle mais preciso da temperatura.¹¹

Além da indústria de alimentos, citada anteriormente, a aromaterapia é um dos principais setores de desenvolvimento dos OE, cuja demanda tem aumentado em função da transformação dos consumidores, que se tornam cada vez mais conscientes dos benefícios à saúde em comparação com o uso de medicamentos convencionais e seus efeitos colaterais.¹² Esse produto natural, também tem sido alvo na produção de pesticidas, devido à demanda crescente da agricultura levando em consideração a qualidade, a conservação da biodiversidade e a segurança ambiental, principalmente no que se refere aos patógenos resistentes aos defensivos agrícolas comerciais. A variedade de quimiotipos implica diretamente na pressão evolutiva desses organismos.¹³

Frente à multifuncionalidade desses óleos e à necessidade de investigação dos mecanismos de ação em diferentes contextos e substratos, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão de literatura referente aos principais métodos de extração, explorando os meios de otimização do processo.

2. Metodologia

Esta pesquisa consiste em uma revisão bibliográfica com o objetivo de identificar, analisar e sintetizar o conhecimento científico disponível sobre métodos de extração de óleos essenciais. Para isso, foram consultadas as principais bases de dados acadêmicas, incluindo *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *PubMed*, e *Google Scholar*.

A estratégia de busca envolveu o uso de operadores booleanos para refinar os resultados e garantir a abrangência da coleta de dados nos idiomas português e inglês. Por exemplo: “*essential oils*” AND “*extraction methods*”, “*steam distillation*” OR “*hydrodistillation*” e (“*green extraction*” OR “*eco-friendly techniques*”) AND “*essential oils*”. Foram considerados elegíveis os artigos publicados com acesso ao texto completo, obtidos por meio de acesso aberto ou por assinatura institucional via CAPES, e que apresentassem relevância científica comprovada por meio de publicação em periódicos indexados e com revisão por pares. A busca contemplou publicações do ano de 2017 a 2025.

3. Resultados e Discussão

A extração de óleos essenciais envolve técnicas que expõem o material a altas temperaturas, o que pode acarretar a formação de produtos com odores desagradáveis e perdas de qualidade. Os métodos tradicionais, além de demandarem grande consumo de energia, tornam a produção economicamente onerosa.¹⁴ É crescente o interesse em potencializá-los, visando ao aumento da eficiência no rendimento dos produtos e processos. Para isso, têm sido inseridas técnicas como ultrassom, energia solar, micro-ondas por exemplo, para explorar novas possibilidades.¹⁵

Esses métodos constituem a base histórica do aproveitamento das propriedades aromáticas e terapêuticas das plantas. Técnicas como a hidrodestilação, a destilação por arraste de vapor e a prensagem a frio são amplamente utilizadas até hoje, especialmente por sua simplicidade e eficácia na preservação dos compostos voláteis. Outras práticas, como a maceração e a enfleurage, embora menos comuns na atualidade, marcaram época na produção artesanal de essências. Também há integração com solventes orgânicos, aplicado especialmente quando os compostos de interesse não são suficientemente voláteis ou estáveis para a destilação. Entre os solventes mais utilizados estão o hexano, o éter etílico, o etanol e o diclorometano, que possuem boa capacidade de solubilização dos constituintes lipofílicos das plantas.¹⁶⁻¹⁹ No entanto, essa técnica apresenta diversas limitações, como o baixo rendimento, o alto custo operacional e os riscos associados à toxicidade dos solventes, além do potencial de poluição ambiental se não houver controle adequado no descarte. Essas desvantagens têm impulsionado a busca por métodos mais sustentáveis e eficientes, fomentando o desenvolvimento de novas abordagens na extração de óleos essenciais. Tais implicações provocam o interesse pelo desenvolvimento de tecnologia e do conceito de extração verde, com o objetivo de proporcionar melhorias ao processo.⁸

A hidrodestilação é um dos métodos mais tradicionais para a extração de óleos essenciais, geralmente realizada em sistema de refluxo contínuo, como o aparelho de Clevenger, que permite a recuperação dos voláteis por condensação e separação em fase aquosa e oleosa. O equipamento é projetado para manter o equilíbrio hidrodinâmico durante o processo, assegurando uma extração eficiente dos compostos voláteis.⁶

A destilação por arraste de vapor é uma das técnicas mais consagradas para a extração de óleos essenciais, especialmente em aplicações industriais e laboratoriais de maior precisão. Nesse método, o vapor de água é gerado separadamente em uma caldeira e conduzido por um tubo até uma câmara contendo o material vegetal seco ou fresco, sem que haja contato direto com a água. O vapor penetra na matriz vegetal, arrastando os compostos voláteis, que são, então, resfriados em um condensador e coletados em um recipiente separador. Essa técnica permite um controle

mais eficiente da temperatura e evita a degradação térmica de compostos sensíveis, sendo indicada para materiais delicados. Distingue-se da hidrodestilação, que submerge o material vegetal diretamente na água, o que pode levar a uma maior degradação por calor e hidrólise, especialmente em compostos mais frágeis. A escolha entre os dois métodos depende do tipo de planta, da escala de produção e da estabilidade dos constituintes a serem extraídos.^{5,6,20}

A prensagem a frio é um método tradicional utilizado principalmente para a extração de óleos essenciais cítricos, como os de limão, laranja, bergamota e tangerina, que estão localizados nas glândulas oleíferas da casca. O processo consiste em aplicar pressão mecânica sobre a casca da fruta para liberar o óleo, sem o uso de calor ou solventes. Em geral, utiliza-se um sistema de ranhuras e cilindros rotativos que rompem as glândulas e extraem a mistura de óleo e suco, que é então decantada e separada por centrifugação.^{21,22} Por não envolver aquecimento, esse método preserva com mais fidelidade o aroma fresco e as propriedades sensoriais do óleo, o que é especialmente valorizado na perfumaria e na aromaterapia. No entanto, difere das técnicas de destilação, como o arraste de vapor, por não ser aplicável à maioria das plantas, sendo restrito a frutas com alto teor de óleo na casca e menor complexidade de extração.⁷

Dao *et al.*,⁹ apresentam a comparação de alguns métodos de extração de OEs e constataram que o pré-tratamento por micro-ondas permite melhor eficiência da hidrodestilação, fração de oxigenação, consumo de energia e emissão de CO₂. Os autores também indicaram que a prensagem a frio pode ser inferior ao método de destilação. Quando é aplicado o pré-tratamento por micro-ondas, por exemplo, melhora-se o rendimento e a qualidade do OE obtido de plantas.²³ O desenvolvimento de novas tecnologias de obtenção de OE é fundamental, pois há algumas matérias que não possuem boa performance em técnicas tradicionais, como é o caso do manjeriço. Morsy e Hammad,¹⁰ apresentam que as técnicas tradicionais possuem algumas deficiências, como tempo extenso de extração, além de custos operacionais mais elevados. Visando atender as necessidades econômicas e à qualidade do produto, métodos inovadores são aplicados na extração de OE, como o pré-tratamento com enzimas.

3.1. Pré-Tratamentos na extração de óleos essenciais

A eficiência na extração de óleos essenciais (OEs) é influenciada por diversos fatores agrônomicos e ambientais, como características do solo, época de colheita, estágio de desenvolvimento da planta, geolocalização e métodos de secagem e extração.²⁴ Além desses, técnicas de pré-tratamento têm sido amplamente investigadas como estratégias para otimizar a extração, aumentar o rendimento e modificar favoravelmente a composição dos óleos obtidos.²⁵

3.1.1. Métodos de secagem

A etapa de secagem desempenha papel fundamental na preparação da biomassa vegetal para a extração de óleos

essenciais, uma vez que afeta diretamente o rendimento e a composição química do óleo obtido.^{24,25} A escolha adequada da técnica de secagem pode preservar compostos voláteis desejáveis ou, ao contrário, induzir perdas significativas de componentes bioativos.

A técnica de pré-secagem do material não é restrita a apenas um método; a pesquisa sobre essa temática tem impulsionado o interesse tanto da academia quanto da indústria para o desenvolvimento de métodos não convencionais. A secagem pode ser combinada com outras técnicas, como secagem por micro-ondas, aquecimento pulsado por micro-ondas, secagem convectiva, uso de vácuo. O tipo de secagem (secagem convectiva, por micro-ondas a vácuo, liofilização) escolhido pode influenciar no rendimento e na composição química do OE.^{26,27} Por exemplo no estudo de Mashkani *et al.*,²⁶ foi investigado o pré-tratamento térmico do OE de *Thymus daenensis* Celak, e foi reportada a diminuição da quantidade de monoterpenos hidrocarbonetos, como α -tujeno, α -pineno, mirceno, α e γ -terpineno, para-cimeno e 1, 8- cineol em relação a testemunha, com exceção da secagem em estufa a 35 °C. Os autores também observaram que houve mais processos de conversão de terpenos hidrocarbonetos para oxigenados, o que pode ser explicado pelas vias de biossíntese do timol e carvacrol.

O método de secagem mais antigo é o solar, utilizado em países tropicais ou subtropicais. A aplicação em ervas frescas as expõe de forma direta à luz solar, o que, por vezes, altera sua coloração e aroma. Mesmo sendo de baixo custo, o tempo para a finalização do processo é extenso.¹⁰ Esse método reduz a eficiência e a qualidade do produto no processo de extração de óleos essenciais, devido à falta de controle da temperatura, o que pode interferir na degradação da matéria e de seus componentes.

Outra forma de realizar a secagem é utilizando cabines (ou fornos) e secadores de leito (bandeja, esteira rotativa, túnel), que são mais indicados para a indústria por terem a capacidade de trabalhar com diversos materiais (sólidos, ervas, vegetais, grãos) e possibilitarem o controle do processo. Dentre as tecnologias mais avançadas, temos o micro-ondas e a radiofrequência.^{10,27}

A técnica escolhida afetará na quantidade e qualidade do OE, há trabalhos que exemplificam esse fato. Assim, a preservação da estrutura dos tricomas ou a redução dos danos a essas estruturas durante o processo de secagem pode favorecer tanto o aumento do rendimento de OE quanto a melhoria da qualidade aromática das ervas secas. Além disso, os compostos voláteis presentes nas ervas podem estar associados a glicosídeos, uma vez que são solúveis em água e tendem a se acumular nos tecidos da planta.²⁸ Como apresentado por Nascimento *et al.*,²⁵ em sua pesquisa que avalia a influência sobre extração de OE de alecrim do mato (*Lippia thymoides* Mart. & Schauer (Verbanaceae)) rica em timol, em diferentes condições secagem, observou-se que as diferentes disposições de secagem tiveram efeito significativo no rendimento dos óleos essenciais, pois as

temperaturas mais altas contribuíram para rendimentos menores de extração. Sobre a composição químicas, mesmo havendo alguns componentes com valores superiores, de modo geral, os 32 constituintes indicaram quantidades semelhantes.

Por meio da secagem, Caputo *et al.*²⁴ avaliaram a interferência de diversas técnicas no rendimento e no perfil químico na obtenção de óleos essenciais de orégano (*O. vulgare* L.), aplicando protocolos simplificados, baseados apenas na irradiação de micro-ondas (não em técnicas combinadas). O resultado do rendimento apontou que o teor de óleo volátil é afetado pelo método de secagem, pela temperatura, pelo tempo de secagem e pela espécie da planta, pois o nível de umidade entre as amostras secas com diferentes métodos pode ser altamente variável. A quantidade de componentes identificado variou de 36 a 15 conforme as variáveis do tratamento de secagem. Essas alterações podem ser causadas pela formação de novos compostos por oxidação, hidrólise de glicosídeos, esterificação e/ou outros processos.²⁹

3.1.2. Enzimólise: efeitos no rendimento e composição química

Nas últimas décadas, tem sido crescente o interesse pelo estudo da extração assistida por enzimas. A enzima atua na parede celular do vegetal, sendo responsável pela eficiência da extração. Ao promover a degradação dos componentes da parede celular, há uma melhor liberação e extração mais eficiente de compostos bioativos das plantas, além de um aumento no conteúdo bioativo de óleos essenciais e extratos. Mesmo que, de modo geral, o desempenho da aplicação de enzimas no processo de extração de óleos essenciais (OE) seja positivo, é possível encontrar na literatura dados contraditórios. Portanto, mais pesquisas sobre esse tipo de processamento são necessárias para compreender como os compostos orgânicos envolvidos no processo podem beneficiar ou neutralizar os sítios ativos.³⁰

No estudo conduzido por Morsy e Hammad,¹⁰ a aplicação de viscozima como pré-tratamento enzimático na extração de óleo essencial de manjeriço resultou em um aumento de 44,5% no rendimento de óleo e redução de 83% no tempo de hidrodestilação. Além disso, o pré-tratamento manteve o perfil qualitativo dos compostos majoritários, evidenciando a conservação das propriedades químicas desejadas.

Bakar *et al.*,³¹ ampliam a visão sobre o pré-tratamento com enzimas ao analisar o efeito da carga enzimática. Em seu estudo, envolvendo a extração de óleos essenciais (OE) de pegaga (*Centella asiatica* L.) por hidrodestilação com auxílio enzimático, os autores apresentam resultados que indicam que a carga enzimática influencia o rendimento do OE. O teste realizado com celulase a 40 FPU/g de substrato obteve um aumento de 4% no rendimento do óleo. Além disso, os autores observaram mudanças na composição, inferidas indiretamente por meio da atividade biológica antioxidante (teste DPPH) e da quantificação do conteúdo

total de fenólicos (TPC). O maior TPC foi observado na hidrodestilação com 10 FPU/g de substrato de celulase, ao passo que a maior atividade de inibição do DPPH foi verificada no óleo obtido pelo método convencional.

Esse resultado é relevante, pois indica que o aumento na concentração de compostos oxigenados não necessariamente se traduz em maior capacidade antioxidante. A eficácia antioxidante depende da distribuição eletrônica dos terpenoides, álcoois e outros compostos, os quais devem ser capazes de transferir elétrons ou estabilizar radicais livres por mecanismos de ressonância. Felizmente, essa seletividade pode ser alcançada com moléculas que possuem alto momento de dipolo e com o uso de tecnologias mais refinadas, como a destilação sem solventes por micro-ondas.¹⁰

Segundo dos Santos Reis *et al.*,³² outra estratégia possível para a extração eficiente de óleos essenciais é a utilização de extratos multienzimáticos. A composição enzimática apresentou atividade de endoglucanase, xilanase e amiloglucosidase na extração de OE de gengibre (*Zingiber officinale*). A análise morfológica mostrou que o extrato enzimático sobrenadante degradou a parede celular, facilitando o processo de hidrodestilação. As análises cromatográficas demonstraram que o pré-tratamento enzimático promoveu um aumento significativo no teor de alguns constituintes.

Ao incluir enzimas no processo de extração de óleos essenciais (OE), é possível hidrolisar a parede celular, aumentar sua permeabilidade e, conseqüentemente, promover uma maior liberação de óleo, além de melhorar a eficiência de extração dos compostos-alvo da planta matriz. Apesar do alto custo das enzimas, esse método verde potencializa o processo de obtenção do óleo sem causar degradação da matéria-prima ou interferência no produto final. Morsy e Hammad,²⁷ afirmam que o pré-tratamento enzimático resulta na diminuição do tempo de extração, no aumento do rendimento do OE e na preservação de compostos termolábeis, configurando-se como uma alternativa verde promissora para a obtenção de óleos essenciais.

3.1.3. Pré-tratamento e extração com ultrassom

A extração assistida por ultrassom (EAPU) é uma técnica inovadora aplicada como pré-tratamento no processamento de biomassa vegetal. Baseia-se na utilização de ondas ultrassônicas de alta frequência (geralmente entre 20 e 100 kHz), que promovem a formação, crescimento e colapso assimétrico de microbolhas em meio líquido — um fenômeno conhecido como cavitação acústica. Esse colapso gera microjatos e ondas de choque localizadas, resultando em regiões de alta pressão e temperatura por períodos muito curtos. Como consequência, ocorrem rupturas, fissuras e desorganização das paredes celulares da matriz vegetal, o que facilita a penetração do solvente e aumenta a liberação de compostos intracelulares, como os óleos essenciais.^{33,34} Trata-se, portanto, de uma técnica verde, eficiente e com

grande potencial para aplicação em escala industrial, especialmente por reduzir o consumo energético e o tempo de extração.

A Figura 1 apresenta uma representação esquemática do processo de extração assistida por ultrassom aplicado à biomassa vegetal.

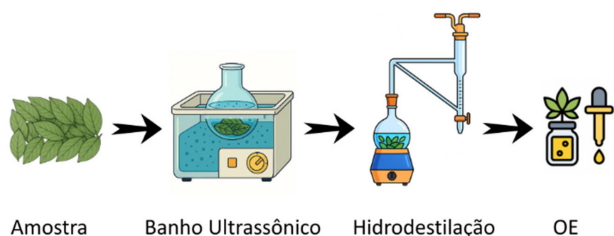


Figura 1. Representação esquemática do pré-tratamento ultrassônico aplicado como etapa anterior à hidrodestilação para extração de óleos essenciais

Essa técnica pode ser aplicada na extração de polifenóis e compostos bioativos de ervas (como óleo de amêndoa, gingeróis, óleo de damasco e óleo de soja), de plantas (compostos aromáticos, antocianinas, polissacarídeos e compostos funcionais), de animais (luteína, quitina), além de materiais e proteínas. A extração assistida por ultrassom (EAPU) busca solucionar um dos maiores problemas que envolvem o processo de extração: a oxidação em altas temperaturas. A indústria que mais utiliza essa técnica é a alimentícia, com aplicações em extração, processamento, preservação, emulsificação, homogeneização, entre outras.³⁵ Dentre seus benefícios, destaca-se a intensificação da transferência de massa na extração sólido-líquido, o que permite melhor penetração do solvente e, consequentemente, rendimentos mais elevados.²⁹

Jadhav *et al.*,¹⁵ submeteram folhas de bétela, provenientes de duas regiões distintas de Mumbai, à técnica de ultrassom e, posteriormente, à hidrodestilação convencional. Os cientistas constataram um aumento no rendimento do óleo essencial (OE) em ambas as amostras quando a EAPU foi aplicada antes da hidrodestilação. Dessa forma, os autores afirmaram que o método de ultrassom é uma técnica inovadora e simples para a extração de óleo essencial de folha de bétela, apresentando potencial para escalonamento.

Outro exemplo de aplicação encontrado na literatura é o da extração assistida por ultrassom (EAPU) em cascas de frutas cítricas, neste caso, de uma espécie híbrida entre laranja e tangerina, conhecida como *Tribute citrus*. Além de apresentar rendimento 33,09% superior ao da hidrodestilação convencional, a amostra que passou pelo pré-tratamento também exigiu menor tempo de extração. Assim, comprovou-se que esse método é uma alternativa relevante para substituir a extração convencional de óleos essenciais (OE) quando aplicado à *Tribute citrus*.⁸ Oliveira *et al.* (2022)³⁶ testaram três potências diferentes (0, 50 e 70% de 950 W) para a extração do óleo de aroeira-vermelha, utilizando esse pré-tratamento. Como resultado, obtiveram um rendimento de 58,23%, indicando a eficiência da técnica

em aumentar o rendimento do OE e no aproveitamento de coprodutos, desempenhando um papel crucial no avanço de abordagens sustentáveis e abrindo portas para novas pesquisas e estratégias de desenvolvimento.

Ao optar pela utilização desse método, devido ao custo do equipamento, torna-se necessária a análise de custo-benefício, considerando a capacidade do equipamento e a escala de produção desejada, ainda que existam banhos de ultrassom industriais de baixa frequência que possam gerar benefícios econômicos.

3.2. Uso de solventes eutéticos

Os solventes eutéticos profundos (SEP's) configuram uma nova classe de solventes verdes que têm despertado interesse crescente no campo das separações, sobretudo devido às suas propriedades físico-químicas singulares. O termo foi cunhado para descrever misturas eutéticas líquidas à temperatura ambiente, formadas por um aceptor de ligação de hidrogênio (*hydrogen bond acceptor*, HBA) — geralmente um sal quaternário, como o cloreto de colina — e um doador de ligação de hidrogênio (*hydrogen bond donor*, HBD), como ureia, glicerol, ácidos orgânicos, entre outros.³⁷ Entre essas propriedades, destacam-se o baixo ponto de fusão, a baixa toxicidade, a reduzida pressão de vapor, o baixo custo, a facilidade de preparo, a biodegradabilidade e a possibilidade de projetar estruturas moleculares específicas (*tailor-made*). Tais características conferem aos SEP's alta versatilidade, tornando-os aplicáveis em diferentes áreas, como eletroquímica, biocatálise, nanotecnologia e, notadamente, na extração de compostos bioativos a partir de matrizes vegetais. Estudos têm demonstrado sua eficácia na solubilização e recuperação de flavonoides, lignina, fenóis, antocianinas, polissacarídeos e fitoesteróis. No entanto, apesar dessas vantagens, a elevada viscosidade intrínseca dos SEP's representa uma limitação prática, especialmente nos processos de extração vegetal. Para contornar essa restrição, é comum a diluição dos solventes eutéticos com água ou outros co-solventes, medida que, embora reduza a viscosidade, pode comprometer a permeabilidade na matriz vegetal e, consequentemente, afetar a eficiência do processo extrativo.³⁸

Testaram a extração de óleo essencial (OE) das folhas de menta (*Mentha haplocalyx* Briq.), aplicando um solvente eutético enzimático como pré-tratamento. Para a síntese dos solventes eutéticos profundos (SEP), foram utilizados o HBA (cloreto de colina) e diferentes HBDs (ácido oxálico, glicose, ácido málico, glicerol, ácido láctico, ácido malônico, ácido tartárico, ácido cítrico, ureia ou xilitol), que foram misturados uniformemente em um balão de fundo redondo, em proporções molares definidas.

Um dos fatores analisados pelos autores foi a diluição em água. Observou-se que, ao ultrapassar 70% de água em relação ao solvente, a eficiência da extração deixava de ser significativa. Por razões de proteção ambiental e custo, optou-se por trabalhar com 80% de diluição, já que não foram

observadas diferenças expressivas em comparação com a concentração de 70%. O rendimento foi significativamente melhorado com o pré-tratamento com SEP combinado com enzimas (celulase e pectinase na proporção 1:1). Além do aumento no rendimento, observou-se também uma melhor conservação dos principais componentes: mentol, mentona, piperitona, isomentona, entre outros.

Zhao *et al.*,³⁹ apresentaram a aplicação desse pré-tratamento em sementes de cominho. O experimento foi dividido em três etapas: pré-tratamento, aquecimento rápido e hidrodestilação. A abordagem intensificada foi comparada com a hidrodestilação por micro-ondas (MHD) e com o pré-tratamento com solventes eutéticos naturais profundos assistido por ultrassom, combinado com hidrodestilação por micro-ondas (UA-NADES-MHD). Todos os experimentos foram realizados em equipamentos de extração por ultrassom e micro-ondas. O rendimento médio obtido do óleo essencial foi de 2,22%, e o total de compostos identificados foi de 37.

Nesse contexto, os solventes eutéticos naturais profundos (NADES, *Natural Deep Eutectic Solvents*) têm emergido como uma alternativa promissora e sustentável para a extração de compostos naturais, incluindo óleos essenciais. Esses solventes são compostos por misturas de metabólitos celulares comuns, como açúcares, álcoois, aminoácidos, ácidos orgânicos e derivados de colina, sendo reconhecidos como o “terceiro solvente” nas células vivas, devido à sua notável capacidade de solubilizar substâncias bioativas. Os NADES são formados pela combinação de um aceitador de ligação de hidrogênio (HBA) com um doador de ligação de hidrogênio (HBD), cuja interação por meio de ligações de hidrogênio e forças de van der Waals promove uma significativa depressão do ponto de fusão da mistura.

No estudo de Fan e Li⁴⁰ envolvendo a extração de óleos essenciais de *Angelica sinensis* Radix, observou-se que a combinação de cloreto de colina com ácido cítrico foi a mais eficaz. A metodologia de extração por hidrodestilação assistida por micro-ondas com NADES apresentou maior rendimento e teor mais elevado de ligustilida — principal composto do óleo essencial em questão — quando comparada a outras técnicas. Por meio de otimização via metodologia de superfície de resposta, as condições ideais foram definidas como: razão molar de 1:3 (HBA:HBD), potência de micro-ondas de 600 W e teor de água de 40%, resultando em um rendimento médio de 1,39%. Tais achados evidenciam o potencial técnico dos NADES como solventes verdes eficientes para a extração seletiva de óleos essenciais.

Na pesquisa de Recio-Cázares *et al.*,⁴¹ diferentes sistemas de solventes eutéticos naturais profundos (NADES) foram empregados em associação ao pré-tratamento por micro-ondas, com o objetivo de intensificar a extração do óleo essencial de *Aloysia citriodora* (ACEO), uma espécie vegetal ainda pouco explorada. A composição química dos óleos foi analisada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), enquanto

as atividades biológicas foram avaliadas com ênfase na ação antimicrobiana, na atividade antioxidante e no teor de compostos fenólicos totais. O rendimento do óleo essencial extraído com NADES variou de 0,10% a 0,21%, sendo os principais compostos identificados: verbenona (28–54%), limoneno (2–10%) e spathulenol (3–15%). Em relação à atividade antimicrobiana, os óleos extraídos com NADES apresentaram inibição mais significativa contra bactérias Gram-positivas, com destaque para o sistema contendo cloreto de colina e ácido oxálico (Ch:OA), que reduziu 3,6 log CFU/mL frente à *Listeria monocytogenes*. No que se refere à atividade antioxidante, os sistemas NADES compostos por cloreto de colina com ácido cítrico (Ch:CA) e por Ch:OA apresentaram os maiores valores de capacidade antioxidante (27,77–35,95 mg TE/mL de óleo) e os maiores teores de compostos fenólicos totais (15,33–17,35 mg GAE/mL). Esses dados evidenciam que a escolha adequada da composição eutética influencia diretamente não apenas o rendimento da extração, mas também a qualidade funcional do óleo essencial obtido.

A aplicação de solventes eutéticos profundos naturais configura-se como uma estratégia ecologicamente correta, economicamente viável e altamente eficiente para a extração de óleos essenciais de sementes e plantas aromáticas. Conforme demonstrado na literatura, essa abordagem contribui significativamente para o aumento da eficiência de extração, melhora a solubilidade dos compostos bioativos de interesse e, sobretudo, favorece a ruptura das estruturas celulares vegetais, facilitando a liberação dos óleos essenciais presentes na matriz vegetal.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos estudos recentes que utilizaram solventes eutéticos naturais (NADES) na extração de óleos essenciais a partir de diferentes espécies vegetais. São destacados os métodos de extração aplicados, os rendimentos obtidos, os principais compostos identificados nos óleos, bem como os efeitos sobre a atividade antioxidante ou outras propriedades funcionais, quando disponíveis.

3.3. Extração eletroquímica

Recentemente, métodos eletroquímicos e eletromagnéticos têm sido explorados como alternativas inovadoras para a extração de óleos essenciais, em consonância com os princípios da química verde. Essas abordagens baseiam-se na aplicação de campos elétricos ou magnéticos para promover a ruptura das estruturas celulares vegetais, facilitando a liberação de compostos voláteis. Dentre os mecanismos envolvidos, destacam-se o aquecimento interno por indução eletromagnética e a permeabilização das membranas celulares por pulsos elétricos de alta intensidade. Tais métodos oferecem vantagens como a redução do tempo de extração, menor degradação térmica dos compostos e o potencial de eliminação do uso de solventes orgânicos, configurando-se como estratégias promissoras para a obtenção de óleos essenciais com maior eficiência e seletividade.^{53,54}

Tabela 1. Estudos sobre a aplicação NADES na extração de óleos essenciais

Espécie Vegetal	Metodologia	Resultados	Referência
<i>Artemisia absinthium</i> (wormwood)	Destilação a vapor acoplada a NADES (L-carnitina + ácido málico)	Maior rendimento entre os NADES testados; maior diversidade de compostos ativos ($\geq 2\%$ de área); superior à destilação com água, NaCl ou celulase	Hu <i>et al.</i> ⁴²
<i>Curcuma longa</i>	Extração por hidrodestilação assistida por micro-ondas (MAHD), com pré-tratamento usando NADES (Ch:Cl + ácido oxálico, 1:1)	Rendimento de 0,85% em condições otimizadas; identificação de 49 compostos no óleo essencial	Xu <i>et al.</i> ⁴³
<i>Cinnamomum cassia</i>	Extração com NADES (cloreto de colina + 1,2-propanodiol; razão 1:3; 40% de água)	Rendimento de 4,464%, superior à hidrodestilação convencional (1,581%); óleo utilizado em microencapsulamento	Liu <i>et al.</i> ⁴⁴
<i>Rosa damascena</i>	Hidrodestilação convencional com cosolvente NADES (cloreto de colina:glicerol, 1:1)	Aumento de 1,7 vezes no rendimento do óleo essencial; antioxidante associado (hidrolato com $IC_{50} = 0,85 \mu\text{g/mL}$)	Aggarwal <i>et al.</i> ⁴⁵
<i>Syzygium aromaticum</i>	Hidrodestilação assistida por micro-ondas (MAHD) com NADES (cloreto de colina + ácido láctico, 1:2)	Rendimento máximo de 4,60%; maior teor e complexidade do óleo em comparação com MAHD convencional e HD	Chen <i>et al.</i> ⁴⁶
<i>Mentha haplocalyx</i>	Hidrodestilação assistida por micro-ondas (MAHD) com pré-tratamento enzimático e NADES (Ch:Cl + glicose, 1:1)	Rendimento de 2,19%; óleo com 62,43% de mentol; maior atividade inibitória sobre acetilcolinesterase e α -amilase	Li <i>et al.</i> ⁴⁷
<i>Rosmarinus officinalis</i>	Hidrodestilação com pré-tratamento das folhas usando solução aquosa (10%) de NADES (glicerina)	Aumento no rendimento; maior teor de cânfora (33,3%), verbenona (12,2%) e borneol (8,3%); melhor atividade antioxidante	Stanojević <i>et al.</i> ⁴⁸
<i>Citrus maxima</i> ('shatian Yu')	Extração com NADES e micro-ondas (560 W, 30 min)	Rendimento de $2,09 \pm 0,11\%$; 62 compostos identificados; maior conservação da atividade biológica do óleo	Zhang <i>et al.</i> ⁴⁹
<i>Eleutherococcus senticosus</i>	Extração/destilação assistida por micro-ondas com solvente eutético (DES)	Rendimento de $2,00 \pm 0,13\%$; DES ótimo: cloreto de colina:ácido láctico (1:2); compatível com extração de compostos de diferentes polaridades	Pan <i>et al.</i> ⁵⁰
<i>Cymbopogon citratus</i>	Extração assistida por micro-ondas com NADES (ureia:glicerol) — método UG-MAE	Ureia:glicerol atuou como solvente eficaz; maior solubilização com folhas curtas e razão elevada de ureia:glicerol; rendimento ótimo de 1,272% com razão 1:2 (ureia:glicerol), 105 °C e tempo de extração não especificado; compostos principais: Z-citral, E-citral e trans-cariofileno	Hartati <i>et al.</i> ⁵¹
<i>Nardostachys jatamansi</i>	Hidrodestilação com cosolvente NADES (cloreto de colina:ácido maleico, 2:1)	Maior rendimento entre os NADES testados (1,7%); superior ao método convencional (0,9%); 34 compostos identificados (76,13–87,87% da área total); alto teor de valeranon (31,22–12,60%) e nerolidol (21,39–1,82%); melhor atividade inseticida e inibitória de acetilcolinesterase	Sharma <i>et al.</i> ⁵²

A tecnologia eletroquímica não é comumente utilizada como pré-tratamento no processo de extração de óleos essenciais (OE), sendo mais explorada na indústria para a gestão de águas residuais. No entanto, há relatos na literatura sobre sua aplicação como pré-tratamento na extração por Soxhlet, com o objetivo de reduzir o tempo do processo e potencializar o rendimento do produto.⁵⁵ Tratamentos semelhantes também foram empregados na extração de OE, como o pré-tratamento eletrofluídico aplicado a cascas de frutas cítricas. Nesse caso, são utilizados o campo elétrico induzido e o fluxo de tubulação sobre a amostra, de modo que o campo elétrico interage com a membrana celular durante o processo. Ao provocar o rompimento da membrana por danos estruturais, a recuperação do óleo é maximizada.⁵⁶

Hamzah *et al.*,⁵⁵ estudaram a aplicação do pré-tratamento eletroquímico para a extração de óleo essencial (OE) das folhas de murta-limão (*Backhousia citriodora*). A metodologia teve como objetivo obter um maior rendimento por meio da submissão do material a um extrator Soxhlet, com posterior separação a 60 °C utilizando um evaporador rotativo a vácuo. Curiosamente, o rendimento da extração por Soxhlet das amostras sem pré-tratamento foi superior ao das amostras pré-tratadas, sendo de $6,13\% \pm 0,02$ e $5,85\% \pm 0,01$, respectivamente. Tal fato pode ter ocorrido por diversos fatores, como o tipo de recipiente de mistura utilizado (plástico em vez de vidro), dissolução do óleo em água durante o pré-tratamento, pH do meio e impedância do fluido. Desse modo, são necessários mais estudos para avaliar a eficácia da aplicação eletroquímica

como pré-tratamento na obtenção de rendimentos de óleo significativamente superiores aos das amostras não tratadas.

Ainda há muito a evoluir nos estudos sobre eletrofluidos aplicados como pré-tratamento, uma vez que o primeiro artigo registrado nessa área data apenas de 2017. O tratamento eletrofluídico prévio para extração de óleos essenciais representa uma abordagem técnica viável, mais eficiente, inovadora e ambientalmente amigável para a obtenção de um produto de qualidade.^{56,57}

Outra abordagem que tem sido utilizada é a hidrodestilação assistida por aquecimento ôhmico (*Ohmic-Assisted Hydrodistillation* – OAHD), a qual tem emergido como uma técnica alternativa promissora para a extração de óleos essenciais a partir de matrizes vegetais. Nesse método, o material vegetal é submetido a um campo elétrico alternado que induz o fluxo de corrente elétrica através de um meio condutor, geralmente aquoso, promovendo aquecimento direto e uniforme por meio do efeito Joule. Essa forma de aquecimento volumétrico acelera a ruptura das estruturas celulares e das glândulas oleíferas, reduzindo o tempo necessário para a extração e aumentando a eficiência do processo. Além disso, por operar em temperaturas controladas e com distribuição térmica homogênea, a OAHD minimiza a degradação térmica de compostos sensíveis e pode gerar óleos com composição química mais estável e rendimentos superiores, quando comparada à hidrodestilação convencional.^{58,59}

Gavahian *et al.*,⁶⁰ conduziram uma pesquisa com *Mentha piperita* L. e demonstraram a eficácia da hidrodestilação assistida por aquecimento ôhmico (OAHD) como técnica promissora para a extração de óleos essenciais. Foram aplicadas diferentes intensidades e frequências de corrente alternada (25, 50 e 100 Hz; 220 e 380 V) sobre a biomassa vegetal, com resultados expressivos tanto em rendimento quanto em eficiência energética. A extração sob OAHD, em alta intensidade, permitiu a recuperação de praticamente todo o óleo essencial disponível após apenas 14 minutos, enquanto a hidrodestilação convencional iniciou a liberação das primeiras gotas somente após 34 minutos. A análise morfológica revelou a ruptura abrupta das glândulas oleíferas em todas as amostras submetidas à OAHD, o que corrobora o mecanismo de ação térmica volumétrica induzido por corrente elétrica. Além disso, não foram observadas alterações significativas na composição dos óleos extraídos, segundo análises por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS). Esses achados reforçam o potencial da OAHD como uma tecnologia ambientalmente amigável, capaz de reduzir o tempo de extração e o consumo energético, sem comprometer a qualidade do óleo essencial obtido.

Em uma investigação complementar conduzida pelos mesmos pesquisadores, a hidrodestilação assistida por aquecimento ôhmico (OAHD) foi comparada à hidrodestilação assistida por micro-ondas (MAHD) na extração de óleo essencial de *Mentha piperita*. Ambos os métodos apresentaram desempenho superior ao da

hidrodestilação convencional, reduzindo o tempo total de extração para menos da metade. A microscopia eletrônica indicou que tanto a OAHD quanto a MAHD promovem ruptura abrupta das glândulas oleíferas, o que explica a maior eficiência na liberação dos compostos voláteis. Embora não tenham sido observadas alterações significativas na composição química dos óleos entre os métodos, os autores destacam a OAHD como a técnica de menor consumo energético, reforçando seu caráter sustentável. Por outro lado, a MAHD demonstrou maior taxa de liberação dos óleos e menor tempo até o pico de extração, evidenciando sua vantagem cinética. A comparação entre essas duas abordagens destaca o potencial de integração de tecnologias térmicas não convencionais para a otimização de processos extrativos com baixo impacto ambiental.⁶¹

Mais recentemente, Jafari *et al.*,⁶² avaliaram a eficácia da hidrodestilação assistida por aquecimento ôhmico com pré-tratamento ultrassônico (US-OH) e por micro-ondas (MW-OH) na extração de óleo essencial de anis (*Pimpinella anisum*). Os autores testaram diferentes gradientes de voltagem (5–15 V/cm), tempos de extração e tempos de pré-tratamento, identificando como condição ótima o uso de US-OH com 12,45 V/cm, 44,28 minutos de pré-tratamento e 77,71 minutos de extração. Os resultados demonstraram que as eficiências de extração foram de 28% para US-OH e 22% para MW-OH, valores superiores aos obtidos pela hidrodestilação convencional. Além disso, o método US-OH apresentou menor consumo energético (0,180 kWh/g EO), maior conteúdo de compostos fenólicos totais (11,65 mg GAE/g EO) e óleo essencial de melhor qualidade. A microscopia eletrônica de varredura confirmou a completa ruptura das glândulas oleíferas após o tratamento ultrassônico, corroborando a eficiência do processo. Esses dados reforçam o potencial do US-OH como uma tecnologia verde, rápida e eficiente, capaz de melhorar significativamente tanto o rendimento quanto a qualidade dos óleos essenciais extraídos.

3.3.1. Tratamento com campo elétrico pulsado

O campo elétrico de pulso (CEP) é um método inovador, pois não requer calor e pode ser aplicado tanto no processamento quanto na preservação de alimentos. Sua ação baseia-se na aplicação de pulsos de alto campo elétrico, de curta duração, gerados sobre amostras posicionadas entre eletrodos duplos que preenchem o espaço operacional da câmara do CEP.⁶³ A tensão da corrente contínua gera um campo elétrico que, por sua vez, aumenta a permeabilidade da membrana celular, podendo inclusive levar ao colapso completo dessa estrutura.⁶⁴

Barros *et al.*,⁵³ estudaram o efeito do campo elétrico de pulso (CEP) aplicado à hidrodestilação de uma espécie de fruta cítrica, a *Tribute citrus*. Os resultados obtidos com o uso do pré-tratamento indicaram um rendimento 33,09% superior ao da extração sem pré-tratamento, sendo 115,02 mg/g e 85,69 mg/g, respectivamente. Os dados apresentados apontam a técnica como promissora para

aplicação em escala industrial, pois permite a produção de um maior número de lotes por dia e representa uma tendência favorável à redução do consumo de energia, resultando em menores custos operacionais para a extração de óleo essencial (OE).

Ao estudar a aplicação do campo elétrico de pulso (CEP) na obtenção de óleo essencial (OE) de coentro, Ghazanfari ⁶⁴ utilizou três níveis de tensão (0,25, 1 e 1,75 kV/cm) e três níveis de número de pulsos (10, 55 e 100), todos aplicados com frequência constante de 1 Hz. Posteriormente, as amostras foram submetidas à hidrodestilação em aparelho do tipo Clevenger. A eficácia na extração de OE aumentou à medida que a intensidade do campo elétrico atingiu 0,25 kV/cm. Observou-se que, ao expor as sementes de coentro a campos elétricos mais intensos e prolongados, ocorre eletroporação irreversível, o que leva a um aumento na eficiência da extração. No entanto, intensidades excessivamente elevadas podem interferir negativamente no processo.

De modo geral, os pré-tratamentos são seguidos por hidrodestilação, como no estudo de Hadri *et al.*, ⁶⁵ que obtiveram uma redução de 50% no consumo de energia durante o processo de destilação. Os resultados também indicam que o aumento na intensidade do campo elétrico e no número de pulsos (tempo de tratamento) não afeta o rendimento do óleo, uma vez que tanto a alta intensidade do campo quanto o tratamento prolongado causam danos às células vegetais.

A diminuição no consumo de energia proporcionada pela aplicação do campo elétrico pulsado (CEP) tem um impacto significativo nos custos associados à produção e comercialização de óleos essenciais (OE). Esses achados estão em concordância com outros estudos que empregaram o tratamento com CEP para potencializar a extração de óleos essenciais de diversas espécies vegetais.

A aplicação do campo elétrico pulsado (CEP) também tem sido explorada como técnica intensificadora na extração

de óleos essenciais. Em um estudo com *Mentha spicata* L., o tratamento com PEF (2 kV/cm, 200 pulsos) possibilitou a obtenção de 0,90% de óleo essencial em apenas 60 minutos de destilação — um desempenho praticamente equivalente ao da hidrodestilação convencional (0,94%), porém com metade do tempo e cerca de 50% de redução no consumo energético. A análise por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) indicou que o perfil químico do óleo não sofreu alterações relevantes, mantendo seus principais constituintes: carvona (33,09%), limoneno (15,26%) e eucaliptol (5,80%). Além disso, o óleo extraído apresentou propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias apreciáveis. Esses resultados reforçam o potencial do CEP como um método verde e eficaz, especialmente para espécies vegetais de baixo rendimento, promovendo economia de energia sem comprometer a qualidade química do produto final.⁶⁶

A Tabela 2 a seguir apresenta uma seleção de métodos de extração de óleos essenciais utilizados nos últimos cinco anos, conforme descrito na literatura científica. A organização dos dados tem como objetivo oferecer ao leitor uma visão atualizada das abordagens empregadas, destacando as técnicas, os materiais e as condições experimentais mais frequentemente relatadas.

4. Considerações Finais

As diferentes metodologias de extração de óleos essenciais apresentam vantagens e limitações que impactam diretamente o rendimento, a composição química e a viabilidade econômica dos processos. A revisão da literatura revela que, embora a hidrodestilação tradicional continue sendo amplamente utilizada, técnicas emergentes — como a extração assistida por micro-ondas, ultrassom e enzimas — têm demonstrado maior eficiência, seletividade e

Tabela 2. Dados da literatura sobre métodos e rendimentos obtidos na extração de óleos essenciais a partir de diferentes materiais vegetais

Material utilizado	Metodologia	Resultado	Referência
Óleo de camélia (<i>Camellia oleifera</i>)	Comparação entre três métodos de secagem: secagem por ar quente, secagem por micro-ondas e secagem combinada por ultrassom e micro-ondas. Avaliação dos efeitos sobre a cinética de secagem, conteúdo fenólico total, capacidade antioxidante e composição metabólica	Secagem combinada por ultrassom e micro-ondas reduziu o tempo de secagem e elevou o conteúdo fenólico total em até 395,94% vs. ar quente. Também aumentou a atividade antioxidante e revelou 447 metabólitos diferenciais, incluindo 47 com ação antioxidante — alguns com aumento de até 10 vezes	(Li <i>et al.</i> , 2025) ⁶⁷
Folhas de oliveira (<i>Olea europaea</i>)	Extração assistida por enzimas (Celluclast, Pectinex XXL e Viscozyme L) sob diferentes combinações de dose enzimática e tempo de incubação. Avaliação do efeito sinérgico entre as enzimas na extração de polifenóis. Caracterização dos extratos obtidos quanto ao conteúdo total de polifenóis (TP, em mg de equivalente de ácido gálico por litro) e à atividade antioxidante total (AA, em %)	As condições ótimas para extração de polifenóis (468,19 mg GAE/L) foram obtidas com a combinação de enzimas Pectinex e Viscozyme (50–50 v/v), resultando também em atividade antioxidante de 69,85%. Após a otimização com base no tempo de incubação e dose enzimática, o conteúdo de polifenóis aumentou para 605,55 mg GAE/L (75% superior ao controle) e a atividade antioxidante chegou a 70,14% (8% superior ao controle)	(Vardakas <i>et al.</i> , 2024) ⁶⁸

Tabela 2. Dados da literatura sobre métodos e rendimentos obtidos na extração de óleos essenciais a partir de diferentes materiais vegetais (cont.)

Material utilizado	Metodologia	Resultado	Referência
OE de cravo (<i>Syzygium aromaticum</i>)	Aplicação de hidrodestilação assistida por micro-ondas com solvente eutéticos profundos à base de colina-cloreto e ácido oxálico na proporção molar de 1:2.e combinação de ultrassonicação seguida de hidrodestilação assistida por micro-ondas. com foco na extração de eugenol	A hidrodestilação assistida por micro-ondas com solvente resultou em 82,90% de eugenol, enquanto a combinação de ultrassonicação e hidrodestilação resultou em 83,34% de eugenol, um aumento de 7,42% e 8,36% respectivamente, em comparação com o método sem solvente eutético. Além disso, os óleos extraídos com esses métodos apresentaram maior atividade antioxidante	(Suttiarporn <i>et al.</i> , 2025) ⁶⁹
OE de bolota (<i>Quercus brantii</i>)	Comparação entre extração assistida por micro-ondas e extração assistida por ultrassom. Avaliação em relação à extração Soxhlet e maceração prolongada, considerando rendimento de óleo, tempo de extração, consumo de solvente, conteúdo fenólico total, ácidos graxos livres e parâmetros de cor	A extração assistida por ultrassom apresentou rendimento de óleo significativamente maior (7,44%) em comparação com a extração assistida por micro-ondas (5,45%), além de reduzir o tempo de extração para 33 minutos e diminuir o consumo de solvente. O conteúdo fenólico total foi 2,5 vezes maior no óleo extraído por ultrassom. O método de ultrassom também preservou a qualidade do óleo	(Niari <i>et al.</i> , 2025) ⁷⁰
OE de alecrim (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	Extração do OE por destilação molecular e posterior análise das frações por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas. Avaliação de citotoxicidade e atividade anti-inflamatória em células RAW264.7 Comparação entre os métodos de destilação assistida por ultrassom, micro-ondas e enzimas. Otimização baseada na concentração de enzima (0,50%), tempo de incubação (88 min) e temperatura (53 °C)	Os principais componentes anti-inflamatórios identificados foram α -pineno, 1,8-cineol e D-cânfora. A extração assistida por enzimas foi considerada a mais eficaz, com melhor rendimento e maior concentração dos compostos bioativos. Os parâmetros otimizados (0,50% de enzima, 88 minutos a 53 °C) demonstraram ser estáveis, reprodutíveis e adequados para produção em escala industrial	(Xia <i>et al.</i> , 2025) ⁷¹
OE de <i>Artemisia scoparia</i>	destilação a vapor assistida por enzimas, com otimização por metodologia de superfície de resposta (modelo Box-Behnken). Fatores testados: temperatura de hidrólise enzimática, razão líquido-sólido e pH. Análise da composição por GC-MS e avaliação da atividade biológica	O rendimento do OE foi de 0,0880% com a extração enzimática, 1,7 vezes superior ao método convencional (0,0517%). A composição química revelou alta presença de terpenoides: sesquiterpenos (64,36%). O óleo apresentou atividades antioxidante, antibacteriana, hipoglicemiante e redutora de lipídios, evidenciando potencial para uso biomédico	(Zhang <i>et al.</i> , 2025) ⁷²
OE de <i>Litsea cubeba</i>	Extração utilizando solventes eutéticos naturais baseados em colina-cloreto e ácido cítrico (proporção 1:0,97), com 73% de conteúdo de água e hidrólise enzimática com celulase a 0,5% a 45 °C. A otimização foi realizada por metodologia de superfície de resposta (modelo Box-Behnken). Análise da composição química por GC-MS e avaliação da atividade antifúngica contra <i>Aspergillus flavus</i> , confirmada por microscopia eletrônica de varredura	A extração por solvente eutético natural assistida por enzima aumentou o rendimento do OE de 3,20% para 4,70%. A atividade antifúngica foi expressiva, com inibição de 100% do <i>Aspergillus flavus</i> utilizando 1000 μ L/L após 96 horas de incubação, especialmente com a formulação de colina-cloreto e etilenoglicol (ChCl/EG). Os compostos citral, citronelal, citronelol, linalol e metil geranato apresentaram correlação positiva com a atividade antifúngica	(Zhang <i>et al.</i> , 2025) ⁷³
OE das folhas de Pimenta dioica (<i>Allspice</i>)	Aplicação de métodos assistidos por enzimas (celulase e viscozyme) para extração do OE. Análise da composição química realizada por diferentes métodos de espectrometria A atividade antioxidante foi medida pelo ensaio ABTS	Os pré-tratamentos com celulase e viscozyme aumentaram o rendimento do OE para $2,8 \pm 0,5\%$ e $3,28 \pm 0,25\%$, respectivamente. O conteúdo total de fenóis aumentou em 26% e a atividade antioxidante subiu de $87,2 \pm 0,75$ para $90,83 \pm 0,75$ mg TE/mL. A composição principal incluiu eugenol (74,43%), β -mirceno (10,75%), p-chavicol (5,00%) e limoneno (2,67%)	(Premachandran <i>et al.</i> , 2025) ⁷⁴

Tabela 2. Dados da literatura sobre métodos e rendimentos obtidos na extração de óleos essenciais a partir de diferentes materiais vegetais (cont.)

Material utilizado	Metodologia	Resultado	Referência
OE de <i>Melissa officinalis</i> L.	Extração realizada por hidrodestilação Clevenger assistida por ultrassom e micro-ondas utilizando dispositivo proprietário de destilação (PDD). A otimização foi feita por metodologia de superfície de resposta após experimentos de fator único. Fatores otimizados: razão líquido-sólido (9,74 mL/g), potência da micro-ondas (559,60 W) e tempo de extração por micro-ondas (75 min)	O rendimento máximo foi de $0,21 \pm 0,0019\%$. O novo processo aumentou a produção de OE em 74,79% e 73,55% em comparação à extração com aquecimento por forno elétrico com PDD e à hidrodestilação tradicional Clevenger assistida por micro-ondas, respectivamente	(Ye <i>et al.</i> , 2023) ⁷⁵
OE de gengibre (<i>Zingiber officinale</i>), cravo (<i>Syzygium aromaticum</i>) e tomilho (<i>Thymus vulgaris</i>)	Hidrodestilação: 100g de amostra, em refluxo por 2h usando um aparelho do tipo Clevenger	Rendimento: OE gengibre 0,18 - 29% de acordo com a origem da espécie / OE Cravo-da-índia: 2% v/p / OE Tomilho - rendimento de 0,9% v/p	(Ahmed <i>et al.</i> , 2021) ⁷⁶
OE das folhas de Marmeleiro (<i>Croton argyrophyllus</i>)	Hidrodestilação (com pré-tratamento enzimático): uso do aparelho tipo Clevenger modificado por 2 h a 100°C. A fração oleosa foi separada com éter etílico, seca pela adição de sulfato de sódio anidro	Houve aumento no rendimento de 9,35% para folhas frescas e 6,77% para folhas secas de <i>C. argyrophyllus</i> no rendimento do OE com o pré-tratamento enzimático	(Costa <i>et al.</i> , 2021) ⁷⁷
OE de alecrim (<i>Rosmarinus officinalis</i> L.)	Extração por micro-ondas sem solvente: 100 g das folhas secas foram embebidas em água destilada a 25 °C por 60 minutos. Após a hidratação e drenagem do excesso de água, o material vegetal foi colocado no reator de micro-ondas e exposto à radiação de micro-ondas	Rendimento do OE de 0,98%ml/g. Óleo com 1,8-cineol e α -pineno como principais compostos; ação antibacteriana (MIC até 0,06 mg/mL), maior contra <i>S. aureus</i> , <i>K. pneumoniae</i> e <i>P. vulgaris</i> ; boa atividade antioxidante e alta citotoxicidade	(Al Zuhairi <i>et al.</i> , 2020) ⁷⁸
OE de Manjerição (<i>Ocimum</i>)	Hidrodestilação: o material foi previamente submetido a ultrassom em um limpador ultrassônico Phoenix a uma frequência de 40 KHz por 30 min. Após 30 min, as amostras foram levadas um aparelho de vidro do tipo Clevenger com capacidade de 300 mL por 5 h	Redimento de OE: 2,38% (<i>O. gratissimum</i>), 2,15% (<i>O. basilicum</i>), 2,41% (<i>O. canum</i>) e 2,11% (<i>O. tenuiflorum</i>)	(Sneha <i>et al.</i> , 2022) ⁷⁹
OE de cabeça de dragão (<i>Dracocephalum moldavica</i> L.)	Pré-tratamentos: liofilização e secagem em estufa. Hidrodestilação: Cada amostra (50 g) foi submetida ao aparelho tipo Clevenger por 3 h	Liofilização foi o método mais adequado, com alto rendimento (1,85%) e tempo curto de secagem. Estufa a 60 °C gerou menor teor (0,45%), mas maior concentração de geraniol acetato (56,5%) e geraniol (13,5%). Principais compostos: geraniol acetato, geraniol, neral e geraniol. Cluster dividiu métodos em 3 grupos segundo perfil químico	(Morshrdloo <i>et al.</i> , 2021) ⁸⁰
OE de folhas frescas de malva-cheirosa (<i>Pelargonium graveolens</i> L'Herit)	Folhas frescas (100 g) de <i>P. graveolens</i> foram extraídas por: (i) hidrodestilação (4 h/1 kW); e (ii) EP-SFME: pré-tratamento com 2% de celulase (2 h/50 °C) seguido de micro-ondas (30 min/420 W); ambos com sistema de condensação e recirculação da água	EP-SFME elevou o rendimento do OE de <i>P. graveolens</i> em 26,09% (0,29%) comparado à hidrodestilação. Aumentou compostos-chave como citrionelol (+8,6%) e geraniol (+3,14%), além de compostos oxigenados. Mostrou maior atividade antimicrobiana, antioxidante e inibição de acetilcolinesterase ($IC_{50} = 73,3 \mu\text{g/mL}$)	(Wei <i>et al.</i> , 2022) ²³
OE de cardamomo (<i>Elettaria cardamomum</i>)	Frutos de cardamomo-verde foram moídos (50 g) e misturados com 600 mL de água destilada. Após pré-tratamento com queda de pressão instantânea (DIC) a 140 °C ou 165 °C por 30 s, o material foi submetido à hidrodestilação em aparelho tipo Clevenger por 6 h	DIC-HD aumentou o rendimento do OE (4,43% vs. 2,52%) e a atividade antioxidante (inibição DPPH: 86% vs. 57,02%; capacidade antioxidante equivalente ao Trolox – TEAC: 1,44 vs. 13,66 $\mu\text{MTE/g}$ de óleo)	(Teresa-Martinez <i>et al.</i> , 2020) ⁸¹
OE de plantas silvestres mediterrâneas selecionadasálvia (<i>Salvia officinalis</i> L.), alecrim (<i>Rosmarinus officinalis</i> L.) e louro (<i>Laurus nobilis</i> L.)	Hidrodestilação por diferentes pré-tratamentos: de extração por refluxo (HD-RE), com pré-tratamento de extração por refluxo assistida por enzimas (pectinase: HD-REP; celulase: HD-REC; xilanase: HD-REX; pectinase/celulase/xilanase: HD-REPCX) e com pré-tratamento ultrassônico (HD-U)	Os pré-tratamentos proporcionaram um aumento (40–64%) no rendimento de OE, sem alterações significativas na composição química. A HD-RE assistida por enzimas não apresentou vantagem expressiva em relação ao RE. Assim, os pré-tratamentos com ultrassom e refluxo se mostram estratégias eficazes para a produção de OE	(Miljanovic <i>et al.</i> , 2020) ³⁰

Tabela 2. Dados da literatura sobre métodos e rendimentos obtidos na extração de óleos essenciais a partir de diferentes materiais vegetais (cont.)

Material utilizado	Metodologia	Resultado	Referência
OE de Eucalipto vermelho (<i>Eucalyptus camaldulensis</i>)	Folhas foram submetidas a dois métodos de extração de OE: (i) hidrodestilação em aparelho tipo Clevenger por 3 h, seguida de secagem com Na ₂ SO ₄ e armazenamento a -4 °C; (ii) extração com fluido supercrítico usando 5 kg de amostra pré-aquecida, sob 100 bar, 45 °C e vazão de CO ₂ líquido (10 mL/min) por 90 min (estático) e 30 min (dinâmico). Os óleos foram caracterizados por GC-MS e analisados quanto a propriedades físicas e atividades biológicas	HD apresentou maior rendimento (1,32% vs. 0,52%), mas o óleo por SFE mostrou maior atividade antioxidante (DPPH e capacidade redutora), maior inibição de biofilme e atividade hemolítica. Ambos apresentaram eucaliptol (~31%) e α -pineno (~11%) como compostos majoritários. As propriedades físicas dos óleos variaram pouco entre os métodos	(Abbas et al., 2022) ⁸²
OE de gengibre (<i>Zingiber officinale</i> Roscoe)	OE de gengibre foi extraído por hidrodestilação após pré-tratamento enzimático com extrato multienzimático bruto (CME) obtido por fermentação sólida de cascas de cacau com <i>Aspergillus oryzae</i> . As condições foram otimizadas por matriz Doehlert, variando temperatura, tempo e proporção CME/H ₂ O. O processo eliminou a etapa de secagem do gengibre	O pré-tratamento enzimático aumentou o rendimento do OE em 47,95% nas condições ótimas (40 °C, 130 min, CME/H ₂ O: 75/425 mL/mL). O principal composto identificado foi α -zingibereno (25,20%). A análise micromorfológica confirmou a degradação da parede celular do gengibre	(dos Santos Reis et al., 2020) ³²
OE de agulhas frescas de Pinheiro anão (<i>Pinus pumila</i>)	Agulhas frescas de <i>Pinus pumila</i> foram submetidas à extração combinada por micro-ondas sem solvente (usando micro-ondas doméstico modificado – modelo P70D20N1P-G5) e extrusão por rosca. Os óleos essenciais foram coletados em dispositivo tipo Clevenger. As condições foram otimizadas via modelo Box-Behnken. Também foram analisadas microestrutura, estrutura química e estabilidade térmica das amostras	Rendimento ótimo de 12,00 $\pm$ 0,60 mL/kg em 31 min (vs. 4 h por hidrodestilação). Principais compostos: (+)-3-carene (22,75%), δ -cadineno (12,12%), terpinoleno (12,11%) e β -bisaboleno (9,12%). OE demonstrou forte atividade inibitória de acetilcolinesterase (IC ₅₀ : 0,45–0,76 mg/mL), com terpinoleno, (–)-trans-cariofileno e (+)-3-carene como principais ativos	(Peng et al., 2021) ⁸³
OE de folhas de Canela java (<i>Cinnamomum burmannii</i>)	Folhas de <i>C. burmannii</i> foram submetidas à extração de OE por EP-MAE (extração assistida por micro-ondas com pré-tratamento enzimático), utilizando uma mistura de hemicelulase e celulase, seguida de irradiação por micro-ondas. As condições foram otimizadas por meio dos delineamentos Plackett–Burman e Box–Behnken	EP-MAE apresentou maior rendimento e coeficiente de transferência de massa em comparação aos métodos de referência. O OE obtido apresentou maior teor de compostos oxigenados (88,31%) vs. micro-ondas (80,41%) e hidrodestilação (73,24%), indicando qualidade superior	(Liu et al., 2021) ⁸⁴
OE de <i>Dracocephalum kotschy</i> Boiss	Hidrodestilação: As amostras foram previamente secas e trituradas para obter partículas pequenas e facilitar o processo de extração. 70 g de cada amostra foram submetidos à extração por meio de destilação de água usando um aparelho de Clevenger por 3 h	O rendimento de extração foi de 0,2% (p/p) da planta cultivada e 0,97% (p/p) da planta cultivada naturalmente	(Ghavam et al., 2021) ⁸⁵
OE de manjerição cinamato de metila (<i>Ocimum canum</i> Sims)	Folhas foram pré-tratadas com viscozyme (0,5% ou 1% v/p) por 30, 60 ou 90 min a 50 °C e pH 5 antes da hidrodestilação. O tempo e o rendimento da extração, além da razão entre monoterpenos oxigenados e hidrocarbonetos, foram usados como indicadores de qualidade do óleo. Composição determinada por GC-MS	Pré-tratamento com 1% de viscozyme por 90 min aumentou o rendimento do OE em 44,5% e reduziu o tempo de HD de 180 para 30 min. O óleo apresentou alta razão de monoterpenos oxigenados e hidrocarbonetos, e foi composto majoritariamente por (E)-metil cinamato, cânfora, trans- β -cariofileno e 1,8-cineol	(Morsy e Hammad, 2021) ²⁴
OE de Dong Van Manjerona (<i>E. winitiana</i> var. <i>dongvanensis</i> Phuong)	Extração por destilação assistida por micro-ondas. As condições ótimas, definidas por superfície de resposta (RSM), foram: tamanho do material 0,74 cm, razão água e material 4,14:1 mL/g, potência de 302,4 W e tempo de 2,1 h. A composição foi analisada por GC-MS e GC-FID	Rendimento ótimo de 0,887 $\pm$ 0,007 g (0,6%). Principais compostos: epóxido de rosefurano (44,9%), cariofileno (10,8%), germacreno D (2,6%) e α -humuleno (1,3%). Atividade citotóxica moderada e forte atividade antimicrobiana (MIC: 50–100 μ g/mL) contra <i>E. coli</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i> e <i>S. cerevisiae</i>	(Le et al., 2021) ⁸⁶

sustentabilidade. Além disso, a integração de métodos, como as abordagens combinadas de micro-ondas com destilação por arraste a vapor, tem se mostrado promissora na maximização da extração de compostos bioativos. No entanto, a escolha do método ideal deve considerar não apenas o perfil fitoquímico desejado, mas também fatores como custo, escalabilidade, segurança e impacto ambiental. Nesse sentido, a adoção de tecnologias limpas e inovadoras é fundamental para o avanço da produção de óleos essenciais, especialmente no contexto de uma economia circular e da valorização de recursos naturais renováveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEAM (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas) pelo financiamento através do Edital POSGRAD 2024/2025 Resolução N.002/2024. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação—SEDECTI, Governo do Estado do Amazonas, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—CAPES, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

Referências Bibliográficas

- da Silva, W. M. F.; Kringel, D. H.; de Souza, E. J. D.; da Rosa Zavareze, E.; Dias, A. R. G. Basil essential oil: Methods of extraction, chemical composition, biological activities, and food applications. *Food and Bioprocess Technology* **2022**, *15*, 1-27. [Crossref]
- Falleh, H.; Jemaa, M. B.; Saada, M.; Ksouri, R. Essential oils: A promising eco-friendly food preservative. *Food Chemistry* **2020**, *330*, 127268. [Crossref]
- Nagar, S.; Pigott, M.; Whymys, S. Effect of Extraction Methods on Essential Oil Composition: A Case Study of Irish Bog Myrtle-Myrica gale L. *Separations* **2023**, *10*, 128. [Crossref]
- Abifarín, T. O.; Otunola, G. A.; Afolayan, A. J. Chemical Composition of Essential Oils Obtained from Heteromorpha arborescens (Spreng.) Cham. and Schltl Leaves Using Two Extraction Methods. *The Scientific World Journal* **2020**, *2020*, 9232810. [Crossref]
- Kant, R.; Kumar, A. Review on essential oil extraction from aromatic and medicinal plants: Techniques, performance and economic analysis. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* **2022**, *30*, 100829. [Crossref]
- Perović, A. B.; Karabegović, I. T.; Krstić, M. S.; Veličković, A. V.; Avramović, J. M.; Danilović, B. R.; Veljković, V. B. Novel hydrodistillation and steam distillation methods of essential oil recovery from lavender: A comprehensive review. *Industrial Crops and Products* **2024**, *211*, 118244. [Crossref]
- Saldaña-Mendoza, S. A.; Chávez-González, M. L.; Ramfrez-Guzmán, N.; Pacios-Michelena, S.; Aguilar, C. N. Technological trends in the extraction of essential oils. *Environmental Quality Management* **2022**, *32*, 441-450. [Crossref]
- Li, G.; Liu, S.; Zhou, Q.; Han, J.; Qian, C.; Li, Y.; Gu, Q. Effect of response surface methodology-optimized ultrasound-assisted pretreatment extraction on the composition of essential oil released from Tribute citrus peels. *Frontiers in Nutrition* **2022**, *9*, 840780. [Crossref]
- Dao, P. T.; Tran, N. Y.; Tran, Q. N.; Bach, G. L.; Lam, T. V. Kinetics of pilot-scale essential oil extraction from pomelo (Citrus maxima) peels: Comparison between linear and nonlinear models. *Alexandria Engineering Journal* **2022**, *61*, 2564-2572. [Crossref]
- Morsy, N. F. S.; Hammad, K. S. Extraction of essential oil from methyl cinnamate basil (Ocimum canum Sims) with high yield in a short time using enzyme pretreatment. *Journal of Food Science and Technology* **2021**, *58*, 2599-2605. [Crossref]
- Machado, C. A.; Oliveira, F. O.; de Andrade, M. A.; Hodel, K. V. S.; Lepikson, H.; Machado, B. A. S. Steam Distillation for Essential Oil Extraction: An Evaluation of Technological Advances Based on an Analysis of Patent Documents. *Sustainability* **2022**, *14*, 7119. [Crossref]
- Yan, M. R.; Wang, C. H.; Jose Cruz Flores, N.; Su, Y. Y. Targeting open market with strategic business innovations: A case study of growth dynamics in essential oil and aromatherapy industry. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* **2019**, *5*, 7. [Crossref]
- Devrnja, N.; Milutinović, M.; Savić, J. When scent becomes a weapon-plant essential oils as potent bioinsecticides. *Sustainability* **2022**, *14*, 6847. [Crossref]
- El Kharraf, S.; Farah, A.; Miguel, M. G.; El-Guendouz, S.; El Hadrami, E. M. Two extraction methods of essential oils: Conventional and non-conventional hydrodistillation. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* **2020**, *23*, 870-889. [Crossref]
- Jadhav, N. L.; Garule, P. A.; Pinjari, D. V. Comparative study of ultrasound pretreatment method with conventional hydrodistillation method for extraction of essential oil from Piper betle L. (Paan). *Indian Chemical Engineer* **2022**, *64*, 505-518. [Crossref]
- Lim, J. R.; Chua, L. S.; Mustaffa, A. A. Ionic liquids as green solvent and their applications in bioactive compounds extraction from plants. *Process Biochemistry* **2022**, *122*, 292-306. [Crossref]
- Ibrahim, M.; Ankwa, G. E.; Gungshik, J. R.; Taave, P. Comparative extraction of essential oils of Mentha piperita (mint) by steam distillation and enfleurage. *Nigerian Journal of Chemical Research* **2021**, *26*, 56-62. [Crossref]
- Sheikh, Mehrunisa; MEHNAZ, Samina; SADIQ, Muhammad Bilal. Prevalence of fungi in fresh tomatoes and their control by chitosan and sweet orange (Citrus sinensis) peel essential oil coating. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **2021**, *101*, 6248-6257. [Crossref]
- Suresh, A.; Velusamy, S.; Ayyasamy, S.; Rathinasamy, M. Techniques for essential oil extraction from kaffir lime and its application in health care products-A review. *Flavour and Fragrance Journal* **2021**, *36*, 5-21. [Crossref]
- Řebířková, K.; Bajer, T.; Šilha, D.; Ventura, K.; Bajerová, P. Comparison of chemical composition and biological properties of essential oils obtained by hydrodistillation and steam

- distillation of *Laurus nobilis* L. *Plant Foods for Human Nutrition* **2020**, *75*, 495-504. [\[Crossref\]](#)
21. Park, M. K.; Cha, J. Y.; Kang, M. C.; Jang, H. W.; Choi, Y. S. The effects of different extraction methods on essential oils from orange and tangerine: From the peel to the essential oil. *Food Science & Nutrition* **2024**, *12*, 804-814. [\[Crossref\]](#)
 22. Bozova, Burcu; Gölükcü, Muharrem; Giuffrè, Angelo Maria. The effect of different hydrodistillation times on the composition and yield of bergamot (*Citrus bergamia* Risso) peel essential oil and a comparison of the cold-pressing method. *Flavour and Fragrance Journal* **2024**, *39*, 263-270. [\[Crossref\]](#)
 23. Wei, L.; Yang, H.; Li, H.; Zhu, M.; Mi, S.; Lu, Q.; Zu, Y. Comparison of chemical composition and activities of essential oils from fresh leaves of *Pelargonium graveolens* L'Herit. extracted by hydrodistillation and enzymatic pretreatment combined with a solvent-free microwave extraction method. *Industrial Crops and Products* **2022**, *186*, 115204. [\[Crossref\]](#)
 24. Caputo, L.; Amato, G.; de Bartolomeis, P.; De Martino, L.; Manna, F.; Nazzaro, F.; Barba, A. A. Impact of drying methods on the yield and chemistry of *Origanum vulgare* L. essential oil. *Scientific Reports* **2022**, *12*, 3845. [\[Crossref\]](#)
 25. Nascimento, L. D. D.; Silva, S. G.; Cascaes, M. M.; Costa, K. S. D.; Figueiredo, P. L. B.; Costa, C. M. L.; de Faria, L. J. G. Drying effects on chemical composition and antioxidant activity of *Lippia thymoides* essential oil, a natural source of thymol. *Molecules* **2021**, *26*, 2621. [\[Crossref\]](#)
 26. Mashkani, M. R. D.; Larijani, K.; Mehrafarin, A.; Badi, H. N. Changes in the essential oil content and composition of *Thymus daenensis* Celak. under different drying methods. *Industrial Crops and Products* **2018**, *112*, 389-395. [\[Crossref\]](#)
 27. Chua, L. Y.; Chong, C. H.; Chua, B. L.; Figiel, A. Influence of drying methods on the antibacterial, antioxidant and essential oil volatile composition of herbs: a review. *Food and Bioprocess Technology* **2019**, *12*, 450-476. [\[Crossref\]](#)
 28. Thamkaew, G.; Sjöholm, I.; Galindo, F. G. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **2021**, *61*, 1763-1786. [\[Crossref\]](#)
 29. Castellanos, N. S.; Villa, A. L. Heat Capacity of Various (Solvent+ Terpene) Mixtures as Function of Composition and Temperature. *Journal of Solution Chemistry* **2023**, *52*, 1066-1079. [\[Crossref\]](#)
 30. Miljanović, A.; Bielen, A.; Grbin, D.; Marijanović, Z.; Andlar, M.; Rezić, T.; Dent, M. Effect of enzymatic, ultrasound, and reflux extraction pretreatments on the yield and chemical composition of essential oils. *Molecules* **2020**, *25*, 4818. [\[Crossref\]](#)
 31. Bakar, I. N. A.; Ibrahim, M. F.; Hakiman, M.; Abd-Aziz, S.; Prasongsuk, S.; Tin, L. C. Y.; Jenol, M. A. Characterization of asiaticoside concentration, total phenolic compounds, and antioxidant activity of different varieties of *Centella asiatica* (L.) and essential oil extraction using hydro-distillation with enzyme assisted. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* **2022**, *44*, 102474. [\[Crossref\]](#)
 32. dos Santos Reis, N.; de Santana, N. B.; de Carvalho Tavares, I. M.; Lessa, O. A.; dos Santos, L. R.; Pereira, N. E.; Franco, M. Enzyme extraction by lab-scale hydrodistillation of ginger essential oil (*Zingiber officinale* Roscoe): Chromatographic and micromorphological analyses. *Industrial Crops and Products* **2020**, *146*, 112210. [\[Crossref\]](#)
 33. Chemat, F.; Rombaut, N.; Sicaire, A.-G.; Meullemiestre, A.; Fabiano-Tixier, A.-S.; Abert-Vian, M. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications - A review. *Ultrasonics Sonochemistry* **2017**, *34*, 540-560. [\[Crossref\]](#)
 34. González-Silva, N.; Nolasco-González, Y.; Aguilar-Hernández, G.; Sáyago-Ayerdi, S. G.; Villagrán, Z.; Acosta, J. L.; Montalvo-González, E.; Anaya-Esparza, L. M. Ultrasound Assisted Extraction of Phenolic Compounds from *Psidium cattleianum* Leaves: Optimization Using the Response Surface Methodology. *Molecules* **2022**, *27*, 3557. [\[Crossref\]](#)
 35. Sandhu, H. K.; Sinha, P.; Emanuel, N.; Kumar, N.; Sami, R.; Khojah, E.; Al-Mushhin, A. A. Effect of ultrasound-assisted pretreatment on extraction efficiency of essential oil and bioactive compounds from citrus waste by-products. *Separations* **2021**, *8*, 244. [\[Crossref\]](#)
 36. de Oliveira, F. A. G. M.; Bueno, C. C.; Dyna, F. A. G. M.; dos Santos Lembi, M. K.; Silva, T. A. R.; da Silva, C.; Sakai, O. A. Efeitos da extração verde assistida por ultrassom como pré-tratamento na obtenção do OE e hidrolato de aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolius* RADDI). *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental* **2022**, *11*, 159-174. [\[Crossref\]](#)
 37. Guo, Y.; Li, Y.; Li, Z.; Jiang, L.; Cao, X.; Gao, W.; ...; Chen, F. Deep eutectic solvent homogenate based microwave assisted hydrodistillation of essential oil from *Litsea cubeba* (Lour.) Pers. fruits and its chemical composition and biological activity. *Journal of Chromatography A* **2021**, *1646*, 462089. [\[Crossref\]](#)
 38. Li, Z.; Wang, H.; Pan, X.; Guo, Y.; Gao, W.; Wang, J.; Chen, F. Enzyme-deep eutectic solvent pre-treatment for extraction of essential oil from *Mentha haplocalyx* Briq. leaves: Kinetic, chemical composition and inhibitory enzyme activity. *Industrial Crops and Products* **2022**, *177*, 114429. [\[Crossref\]](#)
 39. Zhao, Y.; Wang, P.; Zheng, W.; Yu, G.; Li, Z.; She, Y.; Lee, M. Three-stage microwave extraction of cumin (*Cuminum cyminum* L.) seed essential oil with natural deep eutectic solvents. *Industrial Crops and Products* **2019**, *140*, 111660. [\[Crossref\]](#)
 40. Fan, Y.; Li, Q. An efficient extraction method for essential oil from *Angelica sinensis* radix by natural deep eutectic solvents assisted microwave hydrodistillation. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* **2022**, *29*, 100792. [\[Crossref\]](#)
 41. RecioCázares, S. L.; JiménezGonzález, O.; LópezMalo, A.; Palou, E.; RamírezCorona, N. Enhancing the extraction of essential oil from Mexican lippia (*Aloysia citriodora*) leaves obtained by hydrodistillation aided by natural deep eutectic solvents (NADES). *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* **2024**, *195*, 109623. [\[Crossref\]](#)
 42. Hu, M.; Feng, G.; Xie, L.; Shi, X.; Lü, B.; ... Green and efficient extraction of wormwood essential oil using natural deep eutectic solvent: Process optimization and compositional analysis. *Journal of Molecular Liquids* **2023**, *382*, 121977. [\[Crossref\]](#)
 43. Xu, F. X.; Zhang, J. Y.; Jin, J.; Li, Z. G.; She, Y. B.; Lee, M. R. Microwave assisted natural deep eutectic solvents pretreatment

- followed by hydrodistillation coupled with GCMS for analysis of essential oil from turmeric (*Curcuma longa* L.). *Journal of Oleo Science* **2021**, 70(10), 1481-1494. [Crossref]
44. Liu, Y.; Wang, H.; Fu, R.; Zhang, L.; Liu, M.; Cao, W.; ...; Wang, S. Preparation and characterization of cinnamon essential oil extracted by deep eutectic solvent and its microencapsulation. *Journal of Food Measurement and Characterization* **2023**, 17(1), 664-673. [Crossref]
 45. Aggarwal, G.; Gupta, M. K.; Sharma, M.; Sharma, U. Natural deep eutectic solvents based concurrent approach for qualitative and quantitative enhancement of *Rosa damascena* essential oil and recovery of phenolics from distilled rose petals. *Separation and Purification Technology* **2025**, 354, 128699. [Crossref]
 46. Chen, Y.; Xu, F.; Pang, M.; Jin, X.; Lv, H.; Li, Z.; Lee, M. Microwave assisted hydrodistillation extraction based on microwave assisted preparation of deep eutectic solvents coupled with GCMS for analysis of essential oils from clove buds. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* **2022**, 27, 100695. [Crossref]
 47. Li, Z.; Wang, H.; Pan, X.; Guo, Y.; Gao, W.; Wang, J.; ...; Chen, F. Enzyme deep eutectic solvent pretreatment for extraction of essential oil from *Mentha haplocalyx* Briq. leaves: Kinetic, chemical composition and inhibitory enzyme activity. *Industrial Crops and Products* **2022**, 177, 114429. [Crossref]
 48. Stanojević, L. P.; Todorović, Z. B.; Stanojević, K. S.; Stanojević, J. S.; Troter, D. Z.; Nikolić, L. B.; Dordević, B. The influence of natural deep eutectic solvent glyceline on the yield, chemical composition and antioxidative activity of essential oil from rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) leaves. *Journal of Essential Oil Research* **2021**, 33(3), 247-255. [Crossref]
 49. Zhang, X.; Zhuang, X.; Chen, M.; Wang, J.; Qiu, D.; Liu, Z.; ...; Liu, Z. An environmentally friendly production method: The pectin and essential oil from the waste peel of juvenile pomelo (*Citrus maxima*, 'Shatian Yu') were extracted simultaneously in one step with an acid based deep eutectic solvent. *LWT* **2024**, 206, 116622. [Crossref]
 50. Pan, X.; Zhang, X.; Meng, Y.; Yang, Y.; Zhang, H.; Liu, T.; ...; Yuan, C. Developing an effective approach based on microwave distillation and extraction using deep eutectic solvents for multiple target analytes prepared from *Eleutherococcus senticosus* fruits. *Microchemical Journal* **2024**, 207, 111905. [Crossref]
 51. Hartati, I.; Sulisty, H.; Sediawan, W. B.; Azis, M. M. Urea Glycerol Based Natural Deep Eutectic Solvent on Microwave Assisted Extraction of Essential Oil of *Cymbopogon citratus*. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering* **2025**, 44(5), 1482-1497. [Crossref]
 52. Sharma, M.; Arokiyaraj, C.; Rana, S.; Sharma, U.; Reddy, S. E. Natural deep eutectic solvents (NADESs) assisted extraction of essential oil from *Nardostachys jatamansi* (D. Don) DC with insecticidal activities. *Industrial Crops and Products* **2023**, 202, 117040. [Crossref]
 53. Barros, M.; Redondo, L.; Rego, D.; Serra, C.; Miloudi, K. Extraction of essential oils from plants by hydrodistillation with pulsed electric fields (PEF) pretreatment. *Applied Sciences* **2022**, 12(16), 8107. [Crossref]
 54. Gavahian, M.; Sastry, S.; Farhoosh, R.; Farahnaky, A. Ohmic heating as a promising technique for extraction of herbal essential oils: understanding mechanisms, recent findings, and associated challenges. *Advances in Food and Nutrition Research* **2020**, 91, 227-273. [Crossref]
 55. Hamzah, M. H.; Ibrahim, S. K.; Nor, M. Z. M.; Hamzah, A. F. A.; Shamsudin, R.; Ali, A. H. M. Optimization of electrochemical pre-treatment for essential oil extraction from lemon myrtle (*B. citriodora*) leaves by response surface methodology. *Journal of Food Measurement and Characterization* **2023**, 17, 3732-3744. [Crossref]
 56. Wu, F.; Jin, Y.; Xu, X.; Yang, N. Electrofluidic pretreatment for enhancing essential oil extraction from citrus fruit peel waste. *Journal of Cleaner Production* **2017**, 159, 85-94. [Crossref]
 57. Wani, K. M.; Dhanya, M. Unlocking the potential of banana peel bioactives: extraction methods, benefits, and industrial applications. *Discover Food* **2025**, 5, 1-25. [Crossref]
 58. Talha, M.; Khalid, S.; Maan, A. A.; Tanveer, N.; Khan, M. K. I.; Asif, M.; ...; Sarwar, A. Ohmic assisted extraction: a sustainable and environment friendly approach to substitute conventional extraction methods. *Food Reviews International*, **2024**, 40(10), 3508-3529. [Crossref]
 59. Gavahian, M.; Farahnaky, A. Ohmic-assisted hydrodistillation technology: a review. *Trends in Food Science & Technology* **2018**, 72, 153-161. [Crossref]
 60. Gavahian, M.; Farhoosh, R.; Javidnia, K.; Shahidi, F.; Farahnaky, A. Effect of applied voltage and frequency on extraction parameters and extracted essential oils from *Mentha piperita* by ohmic assisted hydrodistillation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* **2015**, 29, 161-169. [Crossref]
 61. Gavahian, M.; Farahnaky, A.; Farhoosh, R.; Javidnia, K.; Shahidi, F. Extraction of essential oils from *Mentha piperita* using advanced techniques: microwave versus ohmic assisted hydrodistillation. *Food and Bioprocess Technology* **2015**, 94, 50-58. [Crossref]
 62. Jafari, R.; Zandi, M.; Ganjloo, A. Effect of ultrasound and microwave pretreatments on extraction of anise (*Pimpinella anisum* L.) seed essential oil by ohmic assisted hydrodistillation. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants* **2022**, 31, 100418. [Crossref]
 63. Minh, N. P. Possibility of Pulsed Electric Field and Essential Oil Pre-treatment, Microwave-air Dehydration to the Quality of the Dehydrated Sesban (*Sesbania sesban*) Flower. *Journal of Pure and Applied Microbiology* **2021**, 15, 2302-2316. [Crossref]
 64. Ghazanfari, N.; Yazdi, F. T.; Mortazavi, S. A.; Mohammadi, M. Using pulsed electric field pre-treatment to optimize coriander seeds essential oil extraction and evaluate antimicrobial properties, antioxidant activity, and essential oil compositions. *LWT* **2023**, 182, 114852. [Crossref]
 65. Hadri, A. M.; Benmimoun, Y.; Miloudi, K.; Bouhadda, Y.; Elsayed, S. T.; Hamimed, A. Effect of pulsed electric field treatment on the extraction of essential oil from lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.). *International Journal of Biology and Biotechnology* **2023**, 20, 37-46. [link]
 66. Miloudi, K.; Hamimed, A.; Bouhadda, Y.; Benmimoun, Y.; Belhouala, K.; & Benarba, B. Impact of pulsed electric field

- treatment for extracting essential oil from *Mentha Spicata* L. *International Journal of Electrochemical Science* **2022**, *17*(8), 220829. [\[Crossref\]](#)
67. Li, Q.; Cui, M.; She, J.; Sun, S.; Zhou, L.; Tang, F.; Liu, Y. Preparation high quality camellia oil by combining ultrasound pre-treatment and microwave as drying method: Interactive effect on drying kinetics, metabolite profile and antioxidant ability. *Ultrasonics Sonochemistry* **2025**, 107338. [\[Crossref\]](#)
 68. Vardakas, A.; Kechagias, A.; Penov, N.; Giannakas, A. E. Optimization of enzymatic assisted extraction of bioactive compounds from *Olea europaea* leaves. *Biomass* **2024**, *4*, 647-657. [\[Crossref\]](#)
 69. Suttiarporn, P.; Taithaisong, T.; Namkhot, S.; Luangkamin, S. Enhanced eugenol composition in clove essential oil by deep eutectic solvent-based ultrasonic extraction and microwave-assisted hydrodistillation. *Molecules* **2025**, *30*, 504. [\[Crossref\]](#)
 70. Niari, S.; Hamdami, N.; Dalvi-Isfahan, M.; Le-Bail, A. Ultrasound and microwave assisted extraction of acorn oil (*Quercus brantii*): Optimization and characterization. *Applied Food Research* **2025**, 100706. [\[Crossref\]](#)
 71. Xia, N.; Wang, J.; Jia, Y.; Duan, J.; Wang, X.; Li, J.; Zhang, X. Optimization of the process of extracting essential oil of rosemary by hydrodistillation with different auxiliary methods. *LWT* **2025**, *215*, 117266. [\[Crossref\]](#)
 72. Zhang, P.; Wang, H.; Huang, S.; Zhang, Y. Optimizing the extraction process, analyzing the composition and biological activity of essential oil from *Artemisia scoparia* using enzyme-assisted steam distillation. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* **2025**, *44*, 101940. [\[Crossref\]](#)
 73. Zhang, J.; Tao, R.; Wang, Y.; Jiang, J.; Chen, Y. Enzyme-assisted deep eutectic solvent extraction of *Litsea cubeba* essential oil and its anti-*Aspergillus flavus* activity. *LWT* **2025**, *217*, 117292. [\[Crossref\]](#)
 74. Premachandran, M. S.; Harohally, N. V.; Kumar, Y. S.; Murthy, P. S. Volatile fingerprinting of allspice (*Pimenta dioica* L.) leaf essential oil by GC-MS, E-Nose and NMR. *Journal of Food Measurement and Characterization* **2025**, 1-18. [\[Crossref\]](#)
 75. Ye, R.; Tian, K.; Hu, H.; Li, P.; Tian, X. Extraction process optimization of essential oil from *Melissa officinalis* L. using a new ultrasound-microwave hybrid-assisted Clevenger hydrodistillation. *Industrial Crops and Products* **2023**, *203*, 117165. [\[Crossref\]](#)
 76. Ahmed, L. I.; Ibrahim, N.; Abdel-Salam, A. B.; Fahim, K. M. Potential application of ginger, clove and thyme essential oils to improve soft cheese microbial safety and sensory characteristics. *Food Bioscience* **2021**, *42*, 101177. [\[Crossref\]](#)
 77. Costa, M. A. R.; Gualberto, S. A.; Oliveira, P. C.; Tavares, I. M. D. C.; Santana, N. B.; Leão, D. J.; Franco, M. Application crude multienzyme extract from *Aspergillus niger* as a pretreatment for the extraction of essential oil from *Croton argyrophyllus* leaves. *Biotechnology and Applied Biochemistry* **2022**, *69*, 1843-1856. [\[Crossref\]](#)
 78. Al Zuhairi, J. J. M. J.; Kashi, F. J.; Rahimi-Moghaddam, A.; Yazdani, M. Antioxidant, cytotoxic and antibacterial activity of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil against bacteria isolated from urinary tract infection. *European Journal of Integrative Medicine* **2020**, *38*, 101192. [\[Crossref\]](#)
 79. Sneha, K.; Narayanankutty, A.; Job, J. T.; Olatunji, O. J.; Alfarhan, A.; Famurewa, A. C.; Ramesh, V. Antimicrobial and larvicidal activities of different *Ocimum* essential oils extracted by ultrasound-assisted hydrodistillation. *Molecules* **2022**, *27*, 1456. [\[Crossref\]](#)
 80. Morshedloo, M. R.; Amani Machiani, M.; Mohammadi, A.; Maggi, F.; Aghdam, M. S.; Mumivand, H.; Javanmard, A. Comparison of drying methods for the extraction of essential oil from dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L., Lamiaceae). *Journal of Essential Oil Research* **2021**, *33*, 162-170. [\[Crossref\]](#)
 81. Teresa-Martínez, G. D.; Cardador-Martínez, A.; Téllez-Pérez, C.; Allaf, K.; Jiménez-Martínez, C.; Alonzo-Macías, M. Effect of the instant controlled pressure drop technology in cardamom (*Elettaria cardamomum*) essential oil extraction and antioxidant activity. *Molecules* **2022**, *27*, 3433. [\[Crossref\]](#)
 82. Abbas, A.; Anwar, F.; Alqahtani, S. M.; Ahmad, N.; Al-Mijalli, S. H.; Shahid, M.; Iqbal, M. Hydro-distilled and supercritical fluid extraction of *Eucalyptus camaldulensis* essential oil: characterization of bioactives along with antioxidant, antimicrobial and antibiofilm activities. *Dose-Response* **2022**, *20*, 15593258221125477. [\[Crossref\]](#)
 83. Peng, X.; Yang, X.; Gu, H.; Yang, L.; Gao, H. Essential oil extraction from fresh needles of *Pinus pumila* (Pall.) Regel using a solvent-free microwave-assisted methodology and an evaluation of acetylcholinesterase inhibition activity in vitro compared to that of its main components. *Industrial Crops and Products* **2021**, *167*, 113549. [\[Crossref\]](#)
 84. Liu, Z.; Li, H.; Cui, G.; Wei, M.; Zou, Z.; Ni, H. Efficient extraction of essential oil from *Cinnamomum burmannii* leaves using enzymolysis pretreatment and followed by microwave-assisted method. *LWT* **2021**, *147*, 111497. [\[Crossref\]](#)
 85. Ghavam, M.; Manconi, M.; Manca, M. L.; Bacchetta, G. Extraction of essential oil from *Dracocephalum kotschy* Boiss. (Lamiaceae), identification of two active compounds and evaluation of the antimicrobial properties. *Journal of Ethnopharmacology* **2021**, *267*, 113513. [\[Crossref\]](#)
 86. Le, X. D.; Pham Thi, N. M.; Cam, T. I.; Do, H. N.; Nguyen Thi, H. V.; Thang, T. D.; Tran, Q. T. Optimization of the essential oil extraction process from Dong Van marjoram (*E. winitiana* var. *dongvanensis* Phuong.) by using microwave-assisted hydrodistillation, and the bioactivities of the oil against some cancer cell lines and bacteria. *Natural Product Communications* **2021**, *16*, 1934578X211054235. [\[Crossref\]](#)