

DOI: 10.35621/23587490.v11.n1.p1433-1451

ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS DE OTIMIZAÇÃO DE EXTRAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS PARA USO MEDICINAL: UMA REVISÃO DA LITERATURA

SUSTAINABLE ALTERNATIVES FOR OPTIMIZING VEGETABLE OIL EXTRACTION FOR MEDICINAL USE: A LITERATURE REVIEW

Yurgan Klisman Andrade Gadelha¹
Anuska Rhévia Lacerda Pontes²
Ana Emília Formiga Marques³
Neurislene Maciel Dantas⁴
Francisca Sabrina Vieira Lins⁵

RESUMO: A extração de óleos vegetais é essencial para indústrias farmacêuticas, cosméticas e alimentícias, mas os métodos convencionais enfrentam desafios como impactos ambientais e eficiência limitada. Este estudo aborda métodos tradicionais e técnicas inovadoras para a otimização da extração, com foco na sustentabilidade. Os métodos tradicionais incluem a prensagem mecânica, solventes orgânicos e hidrodestilação. Apesar de amplamente utilizados, apresentam desvantagens como resíduos tóxicos e eficiência limitada. Métodos modernos como extração assistida por micro-ondas (MAE) e ultrassom (UAE) oferecem eficiência energética e preservação de compostos bioativos, mas enfrentam desafios de escalabilidade e custos. O estudo teve como objetivo compilar dados sobre as alternativas sustentáveis mais empregadas para otimização da extração de óleos vegetais para uso medicinal. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura entre o período de maio a novembro de 2024, onde foram recuperados e analisados dados científicos de artigos nacionais e internacionais, publicados nas plataformas Literatura Latino-americana do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS), Sistema Online de Busca e Análise de Literatura Médica (MEDLINE), Scientific Eletronic Library online (SciELO), publicados até o ano de 2024.

¹ Discente do Curso de Farmácia do Centro Universitário Santa Maria - UNIFSM, e-mail: 20191004021@fsmead.com.br.

² Docente do Curso de Farmácia do Centro Universitário Santa Maria - UNIFSM, e-mail: 000830@fsmead.com.br.

³ Docente do Curso de Farmácia do Centro Universitário Santa Maria - UNIFSM, e-mail: 000811@fsmead.com.br.

⁴ Residente da Residência Multiprofissional em Saúde Coletiva (ESP-PB), e-mail: neurislene2@gmail.com.

⁵ Docente do Curso de Farmácia Centro Universitário Santa Maria - UNIFSM, e-mail: farmacia@fsmead.com.br.

Foram aplicados os seguintes critérios de inclusão: revisão de literatura e/ou integrativa, artigos em português e inglês, revistas virtuais publicadas e indexadas em bancos de dados de saúde, contendo os descritores: “*otimização da extração de óleos vegetais*”, “*uso medicinal de óleos vegetais*”, “*técnicas verdes para extração de óleos vegetais*”. Os resultados reforçam a importância da sustentabilidade na extração de óleos vegetais, que corroboram com a redução de impactos ambientais. A adoção dessas tecnologias atende à demanda por produtos mais saudáveis e ecoeficientes, sendo fundamental para o avanço de indústrias conscientes. Pesquisas futuras devem focar na viabilidade econômica em larga escala, e na implementação de padrões industriais que garantam a replicabilidade dos resultados.

Palavras-chave: Extração. Técnicas verdes. Óleos vegetais.

ABSTRACT: *Extraction of vegetable oils is essential for the pharmaceutical, cosmetic and food industries, but conventional methods face challenges such as environmental impacts and limited efficiency. This study addresses traditional methods and innovative techniques for optimizing extraction, with a focus on sustainability. Traditional methods include mechanical pressing, organic solvents and hydrodistillation. Although widely used, they have disadvantages such as toxic residues and limited efficiency. Modern methods such as microwave-assisted extraction (MAE) and ultrasound-assisted extraction (UAE) offer energy efficiency and preservation of bioactive compounds, but face challenges of scalability and costs. The study aimed to compile data on the most widely used sustainable alternatives for optimizing the extraction of vegetable oils for medicinal use. For this purpose, a literature review was carried out between May and November 2024, where scientific data from national and international articles published in the Latin American Caribbean Literature in Health Sciences (LILACS), Online Medical Literature Search and Analysis System (MEDLINE), Scientific Electronic Library online (SciELO) platforms, published between 2019 and 2024, were retrieved and analyzed. The following inclusion criteria were applied: literature and/or integrative review, articles in Portuguese and English, virtual journals published and indexed in health databases, containing the descriptors: “*optimization of vegetable oil extraction*”, “*medicinal use of vegetable oils*”, “*green techniques for vegetable oil extraction*”. The results reinforce the importance of sustainability in the extraction of vegetable oils, which corroborate the reduction of environmental impacts. The adoption of these technologies meets the demand for healthier and more eco-efficient products, being essential for the advancement of conscious industries. Future research should focus on large-scale economic viability and the implementation of industrial standards that ensure replicability of results.*

Keywords: *Extraction. Green techniques. Vegetable oils.*

INTRODUÇÃO

A otimização da extração dos óleos vegetais, para a produção de medicamentos, é um campo de estudo que tem ganhado crescente interesse, especialmente considerando a relevância desses óleos na indústria farmacêutica. Globalmente, a produção desses óleos vegetais tem apresentado um aumento significativo, totalizando cerca de 204 milhões de toneladas anuais, com o Brasil ocupando uma posição de destaque nesse cenário (United States, 2020). Dentre os óleos vegetais mais produzidos, o óleo de palma lidera o ranking, seguido por óleo de soja, canola e girassol (United States, 2020).

Especificamente no Brasil, a produção de óleo de soja tem sido expressiva, com projeção de 8,4 milhões de toneladas para atender o mercado interno, incluindo alimento e biodiesel (Zeferino, 2020). Além disso, observa-se uma tendência de aumento do uso de óleos vegetais para a produção de biodiesel, como uma alternativa parcial para o diesel convencional (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020).

A história da extração de óleos vegetais para fins medicinais remonta a técnicas tradicionais, como a prensagem a frio e a extração por solvente. Esses métodos têm sido utilizados ao longo dos anos, cada um com suas vantagens e desvantagens. A prensagem a frio, por exemplo, permite a extração do óleo da semente por meio de prensa de formato de parafuso, mas pode resultar em menor rendimento de óleo em comparação com a extração de solvente (Jorge, 2009). Por outro lado, a extração por solventes, geralmente utilizando o hexano, é a mais indesejada (Suttille, 2007). O método de extração escolhido depende de diversos fatores, incluindo a natureza da semente, o conteúdo do óleo e o resultado desejado (Bart, 2010).

No contexto da otimização da extração de óleo vegetais para produção de medicamento, é fundamental não apenas considerar a eficiência do método de extração, mas também sua sustentabilidade ambiental. A extração verde, baseada em

tecnologias que reduzem o consumo de energia e o uso de solventes orgânicos, tem sido cada vez mais valorizada (Chemat *et al.*, 2019).

Tecnologia como extração por micro-ondas, ultrassom e utilização de solvente de fontes renováveis está sendo explorada como alternativa mais sustentável aos métodos convencionais (Chemat *et al.*, 2019). Essas inovações são impulsionadas pela crescente conscientização ambiental dos consumidores, e pela demanda de ingredientes naturais na indústria de fragrância e alimentos (Burger *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é fazer uma revisão de dados científicos sobre métodos sustentáveis aplicados ao processo de extração e refino de óleos vegetais para uso medicinal.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado com base em uma revisão da literatura entre o período de maio a novembro de 2024, onde foram recuperados e analisados dados científicos de artigos nacionais e internacionais, publicados nas plataformas Literatura Latino-americana do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS), Sistema Online de Busca e Análise de Literatura Médica (MEDLINE), Scientific Electronic Library online (SciELO), publicados até o ano de 2024. Foram aplicados os seguintes critérios de inclusão: revisão de literatura e/ou integrativa, artigos em português e inglês, revistas virtuais publicadas e indexadas em bancos de dados de saúde, contendo os descritores: “*otimização da extração de óleos vegetais*”, “*uso medicinal de óleos vegetais*”, “*técnicas verdes para extração de óleos vegetais*”. Os artigos encontrados foram analisados inicialmente por meio da leitura dos títulos e resumos, para identificar aqueles que se alinhavam com a temática da pesquisa. Em seguida, realizou-se uma leitura completa dos artigos selecionados para determinar sua compatibilidade com os objetivos da revisão.

RESULTADOS

A extração de óleos vegetais desempenha um papel crucial tanto na indústria farmacêutica quanto em outras áreas, como a cosmética e alimentícia. No entanto, os métodos utilizados ao longo do tempo apresentam desafios significativos, desde limitações de eficiência até impactos negativos ao meio ambiente. Nesse contexto, a busca por alternativas mais sustentáveis tem ganhado destaque, com a introdução de técnicas verdes que prometem aliar eficiência, redução de custos e preservação ambiental. Os resultados mostram, primeiramente, os métodos tradicionais de extração de óleos vegetais e suas características principais. Em seguida, exploram as técnicas sustentáveis e verdes que vêm revolucionando o setor, culminando em uma discussão sobre as aplicações medicinais desses óleos e a importância da sustentabilidade em toda a cadeia produtiva.

Métodos de Extração de Óleos Vegetais

Os processos de extração de óleos vegetais são considerados operações fundamentais à separação de compostos específicos, empregando métodos químicos, físicos ou mecânicos. As propriedades dos óleos podem variar, dependendo do método de extração adotado e das condições aplicadas durante o processo, como exposição a altas temperaturas, desidratação das sementes, radiação e elevado nível de oxigênio, entre outros fatores (Ribeiro *et al.*, 2012).

A extração de óleos vegetais teve origem em processos artesanais, baseada em técnicas rudimentares como a prensagem manual e a fervura. Essas práticas, utilizadas por civilizações antigas, eram limitadas em eficiência e capacidade de escala, mas representavam os primeiros passos na obtenção de lipídios de sementes e frutos. Um marco importante na evolução dessas técnicas foi a introdução da prensagem mecânica, que, no século XIX, incorporou prensas hidráulicas e, mais

tarde, prensas contínuas, conhecidas como *expellers*. Essas máquinas permitiram uma produção mais eficiente e adaptável a diferentes oleaginosas, como soja, girassol e amendoim, atendendo à crescente demanda por óleos vegetais (Jorge, 2009; Ramalho e Suarez, 2013).

A prensagem mecânica é um dos métodos mais antigos, e continua amplamente utilizada em pequenas e médias escalas, devido à sua simplicidade operacional. O processo utiliza prensas hidráulicas ou contínuas para comprimir o material vegetal, liberando o óleo. Uma das principais vantagens dessa técnica é a ausência de solventes químicos, o que contribui para a preservação de compostos bioativos, como antioxidantes e vitaminas lipossolúveis. Contudo, sua eficiência é limitada, com até 14% de óleo, permanecendo nas tortas residuais, o que dificulta sua adoção em larga escala (Pighinelli, 2009; Ramalho e Suarez, 2013).

Os métodos convencionais de extração de óleos vegetais desempenham um papel crucial na indústria, sendo amplamente utilizados devido à sua simplicidade, eficiência e aplicabilidade em diferentes escalas. Entre os principais métodos estão a prensagem mecânica, a extração por solventes orgânicos, a hidrodestilação, a extração por fluídos orgânicos voláteis e a extração por água quente, cada um com características, vantagens e desvantagens específicas (Favaro *et al.*, 2022).

A extração por solventes orgânicos, introduzida no início do século XX, tornou-se o padrão industrial devido à sua alta eficiência. Utilizando solventes como o hexano, essa técnica alcança rendimentos de até 98% do óleo disponível na matéria-prima, sendo economicamente viável para grandes volumes. No entanto, o uso de solventes tóxicos apresenta sérios riscos ambientais e à saúde humana, além de gerar resíduos que podem contaminar o solo e a água, exigindo controle rigoroso no descarte e manuseio (Correia, 2009; Favaro *et al.*, 2022).

A hidrodestilação é amplamente empregada na extração de óleos essenciais, e utiliza vapor de água para volatilizar e separar compostos desejados. Essa técnica se destaca por preservar compostos voláteis e aromáticos, sendo ideal para produtos que dependem de características sensoriais específicas. Porém, o método consome grande quantidade de energia térmica, e é ineficaz para compostos não voláteis, limitando suas aplicações (Favaro *et al.*, 2022).

A extração por fluídos orgânicos voláteis, como no método Soxhlet, emprega solventes como éter ou álcool para solubilizar compostos lipídicos. Essa técnica é eficiente para compostos solúveis em solventes orgânicos, mas apresenta desvantagens como o longo tempo de processamento, alto consumo energético e riscos ambientais associados ao descarte inadequado dos solventes utilizados (Pighinelli *et al.*, 2009).

Já a extração por água quente, também conhecida como decocção ou infusão, é uma técnica tradicional amplamente usada para compostos hidrossolúveis. Nesse método, o material vegetal é aquecido em água para liberar os compostos bioativos. Sua simplicidade e baixa toxicidade são vantagens notáveis, tornando-a acessível para pequenas operações e na produção de fitoterápicos. No entanto, essa técnica é ineficaz para compostos lipofílicos, e exige um elevado consumo de energia para o aquecimento contínuo, o que limita sua eficiência em aplicações industriais maiores (Vieira, 2023).

Apesar de suas contribuições, os métodos convencionais apresentam limitações significativas que destacam a necessidade de alternativas mais sustentáveis. A prensagem mecânica, por exemplo, embora tenha menor impacto ambiental, possui rendimento limitado, especialmente para oleaginosas com baixo teor de óleo. A extração por solventes, apesar de sua eficiência, gera resíduos tóxicos que contribuem para a contaminação ambiental. Além disso, os riscos ocupacionais, associados ao manuseio de solventes como o hexano, são elevados, exigindo medidas rigorosas de segurança para os trabalhadores (Favaro *et al.*, 2022).

Métodos inovadores, como a extração por fluido supercrítico e tecnologias assistidas por ultrassom ou micro-ondas, estão sendo explorados para substituir ou complementar os métodos tradicionais. Essas alternativas oferecem vantagens como menor consumo de energia, ausência de solventes tóxicos e preservação de compostos bioativos. No entanto, desafios relacionados ao custo inicial e à escalabilidade ainda precisam ser superados antes que possam ser amplamente adotados (Temelli, 2009; Vieira, 2023).

A transição para métodos mais sustentáveis não é apenas uma exigência ambiental, mas também uma resposta às crescentes demandas do mercado por produtos mais saudáveis e ambientalmente responsáveis. Indústrias que investem em

tecnologias verdes podem não apenas reduzir sua pegada ecológica, mas também acessar mercados diferenciados e conquistar consumidores cada vez mais conscientes. Incentivos governamentais e avanços tecnológicos serão fundamentais para acelerar essa transição e atender às demandas econômicas e ambientais do futuro.

Técnicas Sustentáveis e Verdes de Extração

A extração sustentável, também conhecida como extração "verde", representa uma evolução significativa nos processos industriais, fundamentando-se nos princípios da Química Verde para minimizar impactos ambientais, reduzir o uso de solventes tóxicos e otimizar a eficiência energética. Essa abordagem é especialmente relevante para setores como a indústria farmacêutica, cosmética e alimentícia, que dependem de matérias-primas naturais e demandam métodos que preservem compostos bioativos enquanto atendem a padrões rigorosos de segurança e sustentabilidade (Favaro *et al.*, 2022; Vieira, 2023).

Além disso, a sustentabilidade agrega valor aos produtos, especialmente no segmento de cosméticos orgânicos e veganos, cujos consumidores priorizam práticas éticas e sustentáveis. No setor alimentício, a extração verde contribui para atender à crescente demanda por alimentos funcionais e ingredientes naturais livres de resíduos químicos (Furlani, 2021).

Além de ser uma exigência regulatória, a adoção de práticas verdes tornou-se um diferencial competitivo nos mercados globais. Produtos obtidos por meio de processos verdes possuem maior aceitação e podem alcançar valores diferenciados no mercado, dada a percepção de maior qualidade e responsabilidade ambiental associada a eles. Diretrizes internacionais, como as da União Europeia, reforçam a necessidade de tecnologias sustentáveis ao exigir produtos livres de resíduos tóxicos. Esse movimento está diretamente alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como os relacionados ao consumo e produção responsáveis (ODS 12) e ao combate às mudanças climáticas (ODS 13). Empresas que adotam

essas práticas reduzem sua pegada ecológica e fortalecem sua marca perante consumidores cada vez mais conscientes (Coutinho *et al.*, 2019; Favaro *et al.*, 2022).

Avanços tecnológicos, como a extração assistida por micro-ondas (MAE), ultrassom (UAE) e o uso de solventes eutéticos naturais (NADES e hNADES), têm transformado os processos industriais, aumentando a eficiência energética, preservando compostos bioativos e reduzindo custos operacionais. Essas inovações são particularmente atrativas para setores que buscam atender demandas de qualidade, inovação e sustentabilidade, consolidando-se como alternativas promissoras para um futuro mais responsável ambientalmente (Vieira, 2023; Furlani, 2021).

Extração Assistida por Micro-ondas (MAE)

A extração assistida por micro-ondas (MAE) tem se consolidado como uma tecnologia essencial no avanço dos processos de extração sustentável. Utilizando ondas eletromagnéticas, a MAE aquece seletivamente o material vegetal, promovendo a ruptura celular de forma eficiente e preservando compostos bioativos sensíveis ao calor, como antioxidantes, flavonoides e óleos essenciais. Essa técnica representa um marco em eficiência e sustentabilidade, especialmente em comparação com métodos tradicionais, que demandam longos tempos de processamento e elevado consumo energético (Tsukui e Rezende, 2014).

A MAE destaca-se por sua velocidade. Processos que antes levavam horas ou até dias, como a extração Soxhlet ou a hidrodestilação, podem ser concluídos em minutos. Essa característica reduz significativamente os custos operacionais e aumenta a produtividade industrial. Além disso, o menor tempo de exposição ao calor contribui para a preservação de compostos sensíveis, tornando a MAE ideal para a produção de extratos farmacêuticos, alimentícios e cosméticos (Vieira, 2023).

Uma das grandes vantagens da MAE é sua compatibilidade com solventes sustentáveis, como bioetanol e misturas eutéticas naturais (NADES e hNADES). Esses solventes, além de serem biodegradáveis e não tóxicos, maximizam a eficiência

da extração e reduzem os impactos ambientais. Por exemplo, estudos mostram que o uso de NADES, combinado com a MAE, aumenta o rendimento de compostos bioativos em até 40%, tornando o processo mais sustentável e rentável (Coutinho *et al.*, 2019; Ferreira, 2020).

A capacidade da MAE de aquecer seletivamente evita o superaquecimento localizado, o que minimiza a degradação térmica de compostos sensíveis. Isso é crucial para indústrias que dependem de ingredientes naturais de alta qualidade, como antioxidantes, vitaminas e óleos essenciais, cujas propriedades podem ser comprometidas por métodos que utilizam temperaturas mais altas e tempos mais longos (Furlani, 2021).

Empresas farmacêuticas têm integrado a MAE para a extração de alcaloides, flavonoides e outros princípios ativos em medicamentos fitoterápicos. No setor alimentício, ela é utilizada para obter antioxidantes de frutas e vegetais, enquanto na indústria cosmética, a técnica é aplicada para extrair compostos hidratantes e anti-inflamatórios de alta pureza para produtos premium. Esses exemplos evidenciam o potencial da MAE para atender a demandas de diferentes setores com eficiência e qualidade (Vieira, 2023).

Embora a MAE ofereça benefícios substanciais, o custo inicial dos equipamentos é uma barreira significativa, especialmente para pequenas e médias empresas. Sistemas avançados de micro-ondas exigem investimento considerável em infraestrutura e treinamento técnico, o que limita sua adoção em larga escala (Coutinho *et al.*, 2019).

A ampliação do uso da MAE para volumes industriais também apresenta desafios. Equipamentos laboratoriais, embora altamente eficientes, podem exigir adaptações significativas para processar grandes quantidades de matéria-prima de forma consistente e econômica. No entanto, empresas de engenharia de processos têm desenvolvido soluções inovadoras, como reatores contínuos de micro-ondas, que oferecem maior capacidade de produção e eficiência. Uma alternativa promissora para reduzir os custos operacionais é a integração da MAE com fontes de energias renováveis, como solar e eólica. Essa combinação não apenas diminui os gastos com consumo energético, mas também alinha o processo aos Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS), aumentando sua aceitação como uma técnica ambientalmente responsável (Furlani, 2021; Vieira, 2023).

Além dessas inovações, tendências futuras apontam para avanços tecnológicos significativos, que potencializam ainda mais a aplicação da MAE. A digitalização e automação têm desempenhado um papel importante na modernização dessa técnica. Sistemas de monitoramento em tempo real e modelagem computacional permitem ajustes automáticos de parâmetros como potência, temperatura e tempo, otimizando o processo e garantindo maior precisão e eficiência. Essas tecnologias não apenas reduzem erros operacionais, mas também aumentam a produtividade ao permitir que a MAE opere de forma mais consistente em diferentes condições de produção (Coutinho *et al.*, 2019).

Outra tendência importante é o desenvolvimento de tecnologias híbridas, que combinam a MAE com outros métodos, como ultrassom (UAE) e extração enzimática. Estudos indicam que essa integração pode elevar o rendimento da extração em até 60%, além de ampliar suas aplicações em diferentes tipos de materiais vegetais. Por exemplo, o uso conjunto de micro-ondas e ultrassom tem demonstrado resultados promissores na recuperação de compostos bioativos com alta pureza, tornando essas técnicas ideais para setores como o farmacêutico e cosmético (Furlani, 2021).

Casos de sucesso reforçam a viabilidade da MAE em escala industrial. Empresas de cosméticos, especialmente aquelas que produzem linhas veganas e orgânicas, têm liderado a adoção dessa tecnologia, aproveitando sua capacidade de oferecer produtos de alta qualidade com menor impacto ambiental. Na indústria farmacêutica, a MAE tem sido amplamente utilizada para atender às rigorosas regulamentações ambientais e às crescentes demandas por medicamentos naturais. Essa aceitação nos mercados globais demonstra como a MAE pode se tornar uma peça central na produção sustentável de diversos produtos (Vieira, 2023; Favaro *et al.*, 2022).

Sendo assim, a UAE é uma tecnologia promissora, que une eficiência, sustentabilidade e versatilidade. Com avanços contínuos e maior acessibilidade, ela se posiciona como uma solução viável para indústrias que buscam inovação e responsabilidade ambiental. A superação de desafios como escalabilidade e custos

iniciais fortalecerá ainda mais sua adoção em mercados globais, consolidando seu papel como uma ferramenta indispensável na modernização de processos industriais.

Extração Assistida por Ultrassom (UAE)

A Extração Assistida por Ultrassom (UAE) tem se consolidado como uma das técnicas mais promissoras no campo da extração sustentável, destacando-se por sua eficiência, versatilidade e menor impacto ambiental em comparação aos métodos convencionais. Baseada no uso de ondas sonoras de alta frequência, a UAE cria cavitações no meio líquido, gerando microbolhas que colapsam de forma controlada. Esse fenômeno libera energia suficiente para romper as paredes celulares do material vegetal, facilitando a extração de compostos bioativos de alto valor agregado. A UAE é amplamente utilizada para extrair óleos essenciais, polifenóis, flavonoides, carotenoides e outros compostos bioativos utilizados em indústrias como farmacêutica, alimentícia e cosmética (Vieira, 2023; Coutinho *et al.*, 2019).

Uma das grandes vantagens da UAE é sua capacidade de preservar compostos termossensíveis, como antioxidantes e vitaminas, devido à menor exposição a altas temperaturas durante o processo. Métodos convencionais, como a destilação ou a extração por solventes orgânicos, frequentemente degradam compostos sensíveis devido ao calor prolongado e ao uso de solventes químicos agressivos. A UAE, ao operar de forma rápida e eficiente, garante a manutenção das propriedades funcionais dos compostos extraídos, o que a torna uma escolha ideal para aplicações que exigem alta qualidade, como alimentos funcionais, cosméticos premium e medicamentos fitoterápicos (Favaro *et al.*, 2022; Furlani, 2021).

Outro ponto que coloca a UAE em destaque é sua eficiência energética. A técnica consome significativamente menos energia em comparação com métodos tradicionais, graças à rapidez e à eficácia do processo. Estudos apontam que a UAE pode reduzir o consumo energético em até 60%, dependendo da matriz vegetal e do composto-alvo. Essa economia não apenas reduz custos operacionais, mas também diminui a pegada de carbono associada ao processo industrial, alinhando-se aos

princípios da Química Verde e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 12, que trata de consumo e produção responsáveis (Vieira, 2023).

Além disso, a UAE é compatível com solventes verdes, como bioetanol e misturas eutéticas naturais (NADES e hNADES). Esses solventes, além de serem biodegradáveis e renováveis, aumentam a seletividade do processo, permitindo a extração de compostos bioativos com maior pureza. A integração da UAE com solventes verdes reduz significativamente os impactos ambientais, elimina o uso de solventes tóxicos, como o hexano, e promove um ciclo de extração mais limpo e sustentável (Coutinho *et al.*, 2019; Furlani, 2021).

A UAE já demonstrou sua aplicabilidade em diferentes setores industriais. Na indústria farmacêutica, a técnica é usada para extrair compostos bioativos, como alcaloides e polifenóis, que são ingredientes-chave em medicamentos fitoterápicos e suplementos. Na cosmética, a UAE tem sido amplamente utilizada para obter extratos vegetais ricos em propriedades antioxidantes, hidratantes e anti-inflamatórias, que são fundamentais em produtos de alto valor agregado, como cosméticos orgânicos e veganos. No setor alimentício, a UAE tem contribuído para o desenvolvimento de alimentos funcionais e bebidas saudáveis, utilizando compostos bioativos extraídos de frutas, sementes e ervas (Favaro *et al.*, 2022).

Casos reais mostram que empresas que adotaram a UAE alcançaram resultados significativos em termos de qualidade e sustentabilidade. Por exemplo, fabricantes de cosméticos naturais relataram maior retenção de compostos voláteis e aromáticos em óleos essenciais, enquanto indústrias farmacêuticas apontaram maior rendimento na extração de princípios ativos em comparação com métodos tradicionais (Tanaka, 2020).

Embora a UAE ofereça inúmeras vantagens, sua aplicação em escala industrial ainda enfrenta desafios. Um dos principais entraves é a escalabilidade. Enquanto equipamentos laboratoriais são eficazes para pequenas produções, o aumento de volume requer modificações significativas nos equipamentos e nos parâmetros operacionais. O custo inicial elevado também pode ser um obstáculo, especialmente para pequenas e médias empresas. Além disso, a UAE requer adaptações específicas para diferentes tipos de matrizes vegetais, o que pode aumentar a complexidade do processo (Vieira, 2023; Coutinho *et al.*, 2019).

No entanto, avanços no design de equipamentos e a integração com tecnologias emergentes têm ampliado o potencial da UAE. Reatores ultrassônicos contínuos, por exemplo, estão sendo desenvolvidos para processar grandes volumes de matéria-prima de forma eficiente. Além disso, a utilização de energias renováveis, como solar e eólica, promete reduzir ainda mais os custos operacionais e aumentar a viabilidade econômica da técnica em escala industrial (Furlani, 2021).

A UAE também tem se beneficiado da integração com outras tecnologias, como a extração assistida por micro-ondas (MAE) e a extração enzimática. Estudos mostram que a combinação dessas técnicas pode aumentar o rendimento em até 60%, além de ampliar as aplicações para diferentes tipos de materiais vegetais. Por exemplo, o uso combinado de ultrassom e enzimas facilita a quebra de estruturas celulares resistentes, permitindo a extração de compostos bioativos em matrizes vegetais complexas, como sementes e cascas de frutas (Furlani, 2021).

Além disso, a digitalização e automação têm desempenhado um papel relevante na modernização da UAE. Sistemas de monitoramento em tempo real permitem ajustes automáticos de parâmetros como frequência, potência e temperatura, otimizando o processo e reduzindo o desperdício. Essas inovações, aliadas à crescente demanda por práticas sustentáveis, indicam que a UAE continuará a ser uma tecnologia-chave na modernização de processos industriais (Vieira, 2023).

A UAE, portanto, representa um avanço significativo na extração sustentável, combinando eficiência energética, preservação de compostos bioativos e menor impacto ambiental. Apesar dos desafios de escalabilidade, os avanços tecnológicos e a integração com outras técnicas prometem superar essas barreiras, consolidando a UAE como uma ferramenta indispensável para indústrias que buscam inovação e sustentabilidade. A técnica não apenas atende às demandas de um mercado global cada vez mais consciente, mas também posiciona as empresas que a adotam como líderes em responsabilidade ambiental e competitividade.

Os Solventes Verdes e as Misturas Eutéticas (NADES e hNADES)

Os solventes verdes, como o bioetanol, e as misturas eutéticas (NADES e hNADES) têm emergido como alternativas viáveis aos solventes orgânicos convencionais amplamente utilizados em processos industriais. Esses solventes se destacam por serem biodegradáveis, renováveis e seguros, além de possibilitarem a reutilização, o que não apenas reduz custos operacionais, mas também minimiza significativamente a geração de resíduos e o impacto ambiental. Essas características os tornam alinhados aos princípios da Química Verde e altamente atrativos para indústrias que buscam soluções mais sustentáveis (Coutinho *et al.*, 2019; Favaro *et al.*, 2022).

Uma das principais vantagens dos solventes verdes e das misturas eutéticas é sua flexibilidade química, permitindo a personalização de suas propriedades para atender a necessidades específicas. Por exemplo, as misturas eutéticas podem ser ajustadas para interagir com diferentes compostos-alvo, otimizando a eficiência e a seletividade do processo de extração. Isso é particularmente importante em aplicações que exigem alta pureza, como a extração de antioxidantes, polifenóis e outros compostos bioativos utilizados em indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética (Furlani, 2021; Vieira, 2023).

Na indústria alimentícia, solventes eutéticos têm sido amplamente utilizados para a extração de compostos bioativos de frutas, vegetais e ervas aromáticas, resultando em ingredientes livres de resíduos químicos. Esses ingredientes têm sido empregados na formulação de alimentos funcionais e bebidas saudáveis, atendendo à crescente demanda por produtos naturais e sustentáveis. Além disso, o uso desses solventes evita a contaminação química, garantindo maior segurança alimentar e melhor aceitação do consumidor final (Gérios *et al.*, 2024).

A possibilidade de reaproveitamento dos solventes verdes também reduz a pegada ecológica associada aos processos industriais. Solventes como o bioetanol e as misturas NADES podem ser recuperados e reutilizados em ciclos contínuos, diminuindo a dependência de recursos fósseis e reduzindo a quantidade de resíduos

gerados. Esse reaproveitamento não apenas melhora a sustentabilidade dos processos, mas também gera economia operacional em longo prazo, o que é essencial para empresas que operam em mercados altamente competitivos (Santana *et al.*, 2021).

As empresas do setor alimentício e cosmético têm adotado solventes verdes para aumentar a eficiência de extração e melhorar a sustentabilidade de suas operações. Por exemplo, na extração de antioxidantes de cascas de frutas cítricas, as misturas eutéticas mostraram-se até 40% mais eficazes em comparação com solventes tradicionais, além de garantirem produtos finais isentos de contaminantes químicos. Na indústria cosmética, solventes verdes são empregados na obtenção de óleos essenciais e extratos ricos em propriedades antioxidantes, amplamente utilizados em produtos veganos e orgânicos (Coutinho *et al.*, 2019).

Além disso, a aplicação de misturas eutéticas tem mostrado resultados promissores na extração de compostos sensíveis, como flavonoides e alcaloides, devido à sua estabilidade térmica e seletividade química. Esses compostos são usados em suplementos alimentares e medicamentos fitoterápicos, destacando o papel dessas soluções na modernização de processos industriais com menor impacto ambiental (Furlani, 2021; Vieira, 2023).

Apesar de suas vantagens, a adoção de solventes verdes e misturas eutéticas em larga escala enfrenta desafios importantes. O custo inicial elevado, associado ao desenvolvimento e à aquisição desses solventes, é uma barreira significativa, especialmente para pequenas e médias empresas. Além disso, embora sejam eficientes em aplicações específicas, a implementação dessas soluções requer adaptações técnicas e operacionais nos processos existentes, o que pode aumentar os custos de transição (Prado, 2003).

Outro desafio é a falta de padronização na produção e uso de misturas eutéticas. Como sua formulação pode ser ajustada quimicamente, a replicação dos resultados em diferentes contextos industriais ainda exige maior controle e desenvolvimento tecnológico. Além disso, embora sejam biodegradáveis, alguns solventes verdes apresentam limitações em termos de estabilidade e durabilidade em aplicações contínuas, o que demanda investimentos em pesquisa e inovação para superar essas barreiras (Coutinho *et al.*, 2019; Favaro *et al.*, 2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de métodos inovadores com práticas sustentáveis não apenas atende às demandas regulatórias e ambientais, mas também agrega valor aos produtos finais, fortalecendo sua competitividade no mercado. No entanto, a transição para essas alternativas enfrenta desafios relacionados ao custo inicial, à escalabilidade e à adaptação das tecnologias para diferentes aplicações industriais. Superar esses obstáculos exigirá esforços conjuntos entre a academia, a indústria e os governos, envolvendo pesquisa contínua, incentivos financeiros e políticas públicas voltadas para a inovação tecnológica e a sustentabilidade.

A adoção de técnicas de extração verdes não se limita a uma exigência ambiental, mas configura uma oportunidade estratégica para empresas que buscam alinhar-se às tendências globais de consumo responsável. A modernização dos processos industriais, baseada em princípios sustentáveis, é uma rota essencial para a construção de um futuro mais equilibrado, competitivo e alinhado aos objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Por fim, pesquisas futuras devem focar na viabilidade econômica em larga escala e na implementação de padrões industriais que garantam a replicabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASTOS, G.; *et al.* O. Análise comparativa de extração do óleo essencial de ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata*) por hidrodestilação e arraste a vapor. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Curso de Engenharia Química), Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2022.

CORREIA, I. M. S. Extração e pirólise do óleo de girassol (*Helianthus annus* L.) visando a produção de biocombustíveis. 105f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Química), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

COSTA, L. D. Revisão bibliográfica sobre comparação de metodologias convencionais de extração de Óleos Vegetais. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Bacharel em Química), Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2022.

EMBRAPA. **Estudo prospectivo de óleos vegetais**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa: Brasília, 2022.

FAVARO, S. P.; *et al.* **Princípios da extração sem solvente e tecnologias potenciais para obtenção de óleos vegetais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2022.

FERREIRA, D. F. Processos verdes de extração de produtos naturais de materiais vegetais com ultrassom e micro-ondas. 116f. **Tese** (Doutorado em Ciência e Tecnologia dos alimentos), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

FURLANI, Abordagem verde e multiparamétrica para extração e análise de curcuminoides em açafraão-da-terra, utilizando solventes eutéticos e bioetanol. 88f. **Dissertação** (Mestrado em Química), Instituto de Química de Araraquara, Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Araraquara, 2021.

GÉRIOS, Y. F.; *et al.* Química verde aplicada: os Solventes Eutéticos Naturais Profundos (NADES) na extração de compostos fenólicos –uma análise cienciométrica. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v.17, n.10, p. 01-26, 2024.

JORGE, N. **Química e tecnologia de óleos vegetais**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.

LIMA, S. V. F. Avaliação da qualidade de óleos fixos vegetais produzidos numa indústria de insumos. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Farmácia), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

PIGHINELLI, A. L. M. T.; *et al.* Otimização da prensagem de grãos de girassol e sua caracterização. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 13, n. 1, fev, 2009.

PRADO, A. G. S. Química verde, os desafios da química do novo milênio. **Quím. Nova**, v. 26, n. 5, out, 2003.

RAMALHO, H. F.; SUAREZ, P. A. Z. The chemistry of oils and fats and their extraction and refining processes. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 1, p. 2–15, 2013.

RIBEIRO, M. C.; *et al.* Influence of the extraction method and storage time on the physicochemical properties and carotenoid levels of pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) oil. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 32, n. 2, p. 386- 392, 2012.

SANTANA, A. P. R.; *et al.* Solventes eutéticos naturais profundos (NADES) no preparo de amostras de rocha fosfática e suplemento mineral para determinação elementar por técnicas de plasma. **Quím. Nova**, v. 44, n. 6, jun., 2021.

SILVA, J. C. Extração do óleo essencial do rubim (*Leonurus sibiricus* L.) e aplicação em creme. **Trabalho de Conclusão de Curso**. (Curso de Engenharia Química), Instituto Municipal de Assis FEMA, 2014.

TEPELLI, F. Perspectives on supercritical fluid processing of fats and oils. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 47, n. 3, p. 583-590, jan. 2009.

TANAKA, J. K. Óleos voláteis como ingredientes na formulação de produtos cosméticos - aspectos técnicos e segurança de uso. 35f. **TCC** (Graduação em Farmácia-Bioquímica), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

TSUKUI, A.; REZENDE, C. M. Extração Assistida por Micro-ondas e Química Verde, **Rev. Virtual Quim.**, v. 6, n. 6, p. 1713-1725, 2014.

VIEIRA, I. J. M. Métodos alternativos utilizados para extração e refino de óleos vegetais. 74f. **TCC** (Bacharelado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2023.